

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique**



Université TAHRI Mohamed Béchar

Faculté de Technologie

Département d'architecture

Polycopié pédagogique

Cours d'acoustique architecturale

Destinés aux étudiants du Master I en Architecture

Dr. Abdelouahab ZIANI

2021-2022

TABLE DES MATIERES

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	X
Symboles et abréviations.....	XI
Avant-propos.....	XII
Introduction.....	1

Chapitre I : L'acoustique : notions de base

Introduction.....	3
1. L'acoustique.....	3
2. La source sonore.....	3
2.1. La source ponctuelle.....	3
2.2. La source linéaire.....	4
3. Les ondes.....	5
3.1. L'onde mécanique et l'onde électromagnétique.....	5
3.2. L'onde transversale et l'onde longitudinale.....	5
3.2.1. L'onde transversale.....	5
3.2.2. L'onde longitudinale.....	6
4. Le son et son milieu de propagation.....	6
5. L'onde sonore.....	7
6. La propagation d'une onde sonore.....	8
7. La célérité du son.....	9
7.1. Célérité du son et son milieu de propagation.....	9
7.2. Relation entre la célérité du son et la température.....	9
8. Les grandeurs physiques du son.....	10
8.1. La pression acoustique (P).....	10
8.2. Le niveau de pression acoustique (L_p).....	11
8.3. La puissance acoustique.....	12
8.4. Le niveau de puissance sonore.....	12
8.5. L'intensité sonore (puissance surfacique moyenne) (I).....	12
8.6. Le niveau d'intensité sonore (L_i).....	13
8.7. La fréquence et l'amplitude.....	13

9.	Les types du son.....	15
9.1.	Le son pur.....	15
9.2.	Le son complexe.....	16
9.3.	Le son confus.....	16
9.4.	Le son musical.....	17
10.	Infrasons, sons et ultrasons.....	17
11.	L'analyse spectrale d'un son.....	17
12.	Le bel et le décibel.....	18
12.1.	Addition des décibels.....	21
12.1.1.	L'addition de deux niveaux sonores.....	22
12.1.2.	Addition de plus de deux niveaux sonores.....	24
12.2.	Soustraction de deux niveaux sonores.....	24
13.	La physiologie de l'acoustique.....	26
13.1.	La physiologie de l'oreille humaine.....	26
13.1.1.	L'oreille externe.....	26
13.1.2.	L'oreille moyenne.....	26
13.1.3.	L'oreille interne.....	26
13.2.	La sensation auditive.....	28
13.2.1.	Courbe d'audibilité et courbes isosoniques.....	28
13.2.2.	Le décibel pondéré.....	30
13.2.3.	Le niveau équivalent.....	32
14.	Le bruit.....	32
14.1.	Définition.....	32
14.2.	Acouphène et hyperacousie.....	32
14.3.	Le bruit de fond.....	33
14.4.	Le bruit ambiant.....	33
14.5.	Le bruit résiduel.....	33
14.6.	Le bruit émergence.....	33
14.7.	Courbes d'évaluation du bruit.....	33
14.7.1.	Courbes NR.....	33
15.	Le sonomètre : la mesure de bruit.....	34
	Conclusion.....	35

Chapitre II : L'acoustique architecturale

Introduction.....	36
1. L'acoustique architecturale.....	36
2. Le comportement du son dans un espace clos.....	36
2.1. Le son direct, le son réverbéré et la réponse impulsionnelle.....	36
2.2. Le champ direct et le champ diffus.....	37
2.3. Quelques phénomènes sonores dans une salle.....	40
2.3.1. La réflexion spéculaire.....	40
2.3.1.1. Les sources images.....	41
2.3.1.2. Panneau réflecteur.....	41
2.3.2. La réflexion diffuse.....	42
2.3.3. La diffraction.....	43
2.3.4. L'absorption.....	44
2.3.4.1. Absorption par matériau poreux.....	44
2.3.4.2. Les panneaux acoustiques.....	45
2.3.4.3. L'absorption par résonateur.....	45
2.3.5. La réfraction.....	46
2.4. La réverbération.....	47
2.5. Le temps de réverbération.....	47
2.5.1. La formule de Sabine.....	48
2.5.2. La formule d'Eyring.....	52
2.6. L'intelligibilité de la parole.....	52
2.7. L'écho.....	52
2.8. La focalisation.....	53
2.9. L'effet de masque.....	53
2.10. L'effet cocktail party.....	53
3. L'aspect subjectif de la qualité acoustique d'une salle.....	54
3.1. La sensation de la réverbération dans une salle.....	54
3.1.1. TR optimal.....	54
3.1.2. Early Decay Time.....	55
4. Le comportement du son dans un champ libre.....	55
5. Se protéger contre les bruits extérieurs.....	57
5.1. Choix de terrain et identification des sources sonores.....	57
5.2. Protection extérieure.....	57

5.3. La disposition des bâtiments et l'organisation spatiale intérieure.....	59
Conclusion.....	62

Chapitre III : L'isolation acoustique

Introduction.....	63
1. L'isolation acoustique.....	63
1.1. Local d'émission et local de réception.....	64
1.2. L'isolement acoustique.....	66
1.2.1. L'isolement acoustique brut D , D_b	66
1.3. L'indice d'affaiblissement acoustique R	66
1.4. Le facteur de transmission (t).....	67
1.5. L'indice d'affaiblissement acoustique pondéré R_w R_A	67
1.6. L'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi simple.....	69
1.6.1. Loi expérimentale de masse.....	69
1.6.2. Loi expérimentale de fréquence.....	70
1.7. L'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi double.....	72
1.8. L'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi comportant plusieurs éléments.....	73
1.9. La paroi séparative horizontale.....	74
1.9.1. Paroi simple.....	74
1.9.2. Paroi double.....	75
1.10. La protection contre le bruit solidien.....	76
2. La correction acoustique.....	79
2.1. Le coefficient d'absorption acoustique.....	79
2.2. Traitement des locaux.....	80
2.2.1. Les salles d'enseignement.....	80
2.2.2. L'amphithéâtre.....	81
2.2.3. L'atelier.....	82
Conclusion.....	83
Conclusion.....	84

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : L'acoustique : notions de base

Figure I.1 : Les domaines d'étude de l'acoustique (Auteur, 2020).....	3
Figure I.2 : La propagation d'une onde sonore ponctuelle (Tran, 1996).....	4
Figure I.3 : La propagation d'une onde sonore linéaire (Tran, 1996).....	4
Figure I.4 : La propagation omnidirectionnelle et la propagation directionnelle. (a) onde sonore générée par un avion qui vole, (b) onde sonore générée par une voiture en marche dont l'obstacle est le sol, (c) onde sonore générée par un <i>Sheikh</i> qui donne une leçon à ses <i>Tolbas</i> dans une salle de prière d'une medersa dont les obstacles sont les parois (Auteur, 2020).....	4
Figure I.5 : une onde transversale générée par une corde (Auteur, 2020).....	5
Figure I.6 : Une onde transversale à la surface de l'eau (Giancoli, 1993).....	6
Figure I.7 : Une onde longitudinale générée par un ressort (Auteur, 2020).....	6
Figure I. 8 : Quelques sources sonores : (a) les cordes vocales d'un chanteur (Alier, 2006), (b) la peau d'un tambour (Comtet, 2012), (c) les bruissements des feuilles d'un arbre (Dupérat <i>et al</i> ; 2008).....	7
Figure I.9 : Le principe de propagation d'une onde sonore (Chagué, 2001).....	8
Figure I. 10 : Les molécules se déplacent parallèlement au sens de propagation de l'onde sonore générée par un diapason (Hamayon, 2008).....	8
Figure I. 11 : Représentation schématique des molécules des trois milieux de propagation (de gauche à droite) ; l'air, l'eau et l'acier (Auteur, 2020).....	9
Figure I. 12 : Variation ponctuelle de la pression en un point de l'espace soumis à une onde acoustique (Hamayon, 2008).....	10
Figure I.13 : Le niveau de pression acoustique de quelques sources sonores (Choclea.org).....	11
Figure I.14 : L'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore de quelques sources sonores (Rey, 2021).....	12
Figure I.15 : Schéma représentatif de la surface d'une onde sonore (Auteur, 2020).....	13
Figure I.16 : La fréquence et l'amplitude d'une onde sonore présentée sur un oscillogramme (Auteur, 2020).....	14
Figure I.17 : La différence entre le son fort et le son faible (Auteur, 2020).....	15
Figure I.18 : Le son aigu en haut, le son grave en bas (Auteur, 2020).....	15

Figure I.19: Le son pur et le son complexe (Hamayon, 2008).....	16
Figure I. 20 : Le son confus (Hamayon, 2008).....	16
Figure I. 21 : Les infrasons, les sons et les ultrasons (Choclea.org).....	17
Figure I.22: La décomposition spectrale d'un son (Thomas, 2006).....	18
Figure I.23 : L'intensité sonore de référence et l'intensité sonore maximale chez l'être humain (Auteur, 2020).....	19
Figure I.24 : L'atome et l'Atomium : deux grandeurs différentes, deux échelles différentes (Clipedia, 2015).....	19
Figure I. 25: L'échelle logarithmique appliquée aux sons (Auteur, 2020).....	20
Figure I. 26 : I par rapport à I_0 (Clipedia, 2015).....	20
Figure I. 27 : De I_0 au bel (Clipedia, 2015).....	21
Figure I. 28 : Du bel au décibel (Clipedia, 2015).....	21
Figure I. 29 : L'addition de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008).....	23
Figure I. 30 : La soustraction de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008).....	25
Figure I.31: La physiologie de l'oreille humaine (Sherwood, 2012).....	27
Figure I.32 : Schéma représentatif de la voix auditive (Pritchard <i>et al</i> , 2002).....	27
Figure I.33: L'audiogramme humain (Munot <i>et al</i> , 2002).....	28
Figure I.34 : Les courbes isosoniques (Margollé <i>et al</i> , 2016).....	29
Figure I.35 : Les courbes de pondération (energieplus-lesite.be).....	30
Figure I. 36 : Les courbes de NR50 (Migeot <i>et al</i> , 2016).....	34
Figure I.37 : Le sonomètre (decibelmetre.info).....	34
Chapitre II : L'acoustique architecturale	
Figure II.1 : Le son direct et le son réverbéré (Auteur, 2020).....	37
Figure II.2 : La réponse impulsionnelle d'une salle (Fischetti, 2003).....	37
Figure II.3 : La répartition du champ direct et du champ réverbéré (Chagué, 2001).....	38
Figure II.4 : La salle anéchoïque (raykingtek.com).....	40
Figure II.5 : La salle réverbérante (Xu <i>et al</i> , 2019).....	40
Figure II.6 : La réflexion spéculaire d'une onde sonore (Fischetti, 2003).....	40
Figure II.7 : Tracé des sources images (Fuschitti, 2003).....	41
Figure II.8 : La réflexion diffuse (Fischetti, 2003).....	42

Figure II.9 : La réflexion diffuse générée par les colonnades, les statues et les fioritures dans une salle de concert à l'italienne (opera-online.com).....	42
Figure II.10 : Les panneaux diffuseurs de Schroeder (lairdubois.fr/).....	43
Figure II.11 : Quelques exemples de la diffraction d'une onde sonore ((Fischetti, 2003).....	43
Figure II.12 : a) porosité fermée, b) porosité ouverte (Hamayon, 2008).....	44
Figure II.13 : Les panneaux acoustiques absorbants (batiproduits.com).....	45
Figure II.14 : Les vases acoustiques (Desarnaulds, 2002).....	46
Figure III.15 : La réfraction sur le public (Fischetti, 2003).....	46
Figure II.16 : Les trois phases de la réverbération d'une salle (Fischetti, 2003).....	48
Figure II.17 : Le temps de réverbération (Navi, 2006).....	48
Figure II.18 : Le son réfléchi, absorbé et transmis (Roulet, 2012).....	49
Figure II.19 : La variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence (Navé, 2006).....	50
Figure II. 20 : Le temps de réverbération pour diverses fonctions (Roulet, 2012)....	50
Figure II.21 : La focalisation du son due au toit de forme concave (Hmayon, 2008)53	
Figure II.22 : Les courbes usuelles du TR optimal (Fischetti, 2003).....	54
Figure II.23 : La propagation d'une onde sonore ponctuelle en champ libre (Hamayon, 2008).....	56
Figure II.24 : La propagation d'une onde sonore linéaire dans un champ libre (Hamayon, 2008).....	56
Figure II.25 : Le système de chicane dans les voies : un dispositif pour diminuer le bruit routier (Cerema, 2019).....	58
Figure II.26 : Le comportement de l'onde sonore devant un écran antibruit (bruitparif.fr).....	59
Figure II.27 : Les écrans antibruit absorbants (Bruxelles environnement, 2018).....	59
Figure II.28 : Quelques exemples de disposition des bâtiments (Hamayon, 2008)..	60
Figure II.29: La disposition des parties de l'hôpital Robert Debré à Paris par rapport au boulevard (Google Earth).....	60
Figure II.30 : La création des espaces tampons pour diminuer le bruit (Hamayon, 2006 ; paulchemetov.com).....	61

Figure II.31 : L'implantation des logements à l'opposé de la source du bruit (paulchemetov.com ; Hamayon, 2006).....	61
Figure II.32 : L'environnement sonore de la medersa maghrébine (Ziani, 2020)....	61
Figure II.33 : L'utilisation des espaces fermés dans le côté bruyant (Hamayon, 2006).....	62
Chapitre III : L'isolation acoustique	
Figure III.1 : Type de bruit (Hamayon, 2008).....	65
Figure III.2 : Les différents chemins de transmission de l'énergie acoustique (Hamayon, 2006).....	65
Figure III.3 : Les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique (Hamayon, 2006).....	67
Figure III.4 : Le facteur de transmission (Chagué, 2001).....	68
Figure III.5 : La représentation du bruit rose par bandes d'octave (Hamayon, 2006).....	68
Figure III.6 : La représentation du bruit routier par bandes d'octave (Hamayon, 2006).....	68
Figure III.7 : L'évolution de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi en fonction de sa masse M (Hamayon, 2008).....	69
Figure III.8 : L'évolution de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi en fonction de la fréquence (Hamayon, 2008).....	70
Figure III.9 : L'évaluation de l'indice d'affaiblissement acoustique (Hamayon, 2008).....	72
Figure III.10 : L'estimation de l'indice R résultats (Hamayon, 2006).....	74
Figure III.11 : Les coupures acoustiques par des matériaux résilients (Hamayon, 2008).....	76
Figure III.12 : La pose d'un sol flottant comme isolation phonique (Isolation-phonique.com).....	77
Figure III.13 : Le plafond suspendu comme dispositif d'isolation phonique (Hamayon, 2008).....	78
Figure III.14 : Le système « boîte dans la boîte » (Hamayon, 2008).....	78
Figure III.15 : Coefficient d'absorption en fonction de la fréquence (Hamayon, 2006).....	80
Figure III.16 : coefficient d'absorption par bandes d'octave (Hamayon, 2006).....	80
Figure III.17 : La durée de réverbération préconisée pour quelques salles (Hamayon, 2008).....	81

Figure III.18 : L'intégration des panneaux réfléchissants au-dessus du conférencier pour favoriser la réflexion (Hamayon, 2006).....	82
Figure III.19 : Traitement de l'énergie réfléchie par le plafond et les murs (Hamayon, 2006).....	81
Figure III.20 : Traitement de l'énergie directe par l'emplacement d'un écran (Hamayon, 2006).....	83

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : L'acoustique : notions de base

Tableau I. 1 : La célérité du son dans des milieux de propagation différents (Hamayon, 2008).....	9
Tableau I.2 : L'addition de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008).....	23
Tableau I.3 : La soustraction de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008).....	25
Tableau I.4 : Réparation fréquentielle de deux sons ayant le même niveau en décibel (Fischetti, 2003).....	30
Tableau I.5 : Les valeurs de la pondération A (Hamayon, 2008).....	31
Tableau I.6 : Les valeurs pondérées pour chaque bande (Fischetti, 2003).....	31

Chapitre II : L'acoustique architecturale

Tableau II.1 : L'indice G selon la position de la source (Tran, 1996).....	39
Tableau II. 2 : Calcul de la surface absorbante pour un bureau d'un volume $V=53 \text{ m}^3$ (Roulet, 2012).....	48

Chapitre III : L'isolation acoustique

Tableau III.1 : Les bruits selon l'endroit de l'émission (Auteur, 2020).....	64
Tableau III.2 : Les valeurs de la masse volumique des matériaux selon le Référentiel Qualitel (Hamayon, 2008).....	71
Tableau III.3 : Les coefficients d'affaiblissement de quelques matériaux de construction (bruit.fr).....	71

Symboles et abréviations

Symbole	Unité	Définition
c	m/s	Célérité du son
P	Pa	Pression instantanée
P₀	Pa	Pression acoustique de référence
L_P	dB	Niveau de pression acoustique
W	W	Puissance acoustique
L_W	dB	Niveau de puissance acoustique
W₀	W	Puissance acoustique de référence
I	W/S	Intensité acoustique
L_I	dB	Niveau d'intensité acoustique
I₀	W/S	Intensité acoustique de référence
f	Hz	Fréquence
T	s	Nombre de vibration par seconde
f₁	Hz	Fréquence fondamentale
dB	dB	Décibel
L_r	dB	Niveau sonore résultant
dBA	dB	Niveau sonore pondéré
NR		Noise rating
L_x	dB	Niveau sonore à une distance x
L_S	dB	Niveau sonore de la source
TR	s	Temps de réverbération
A	M ²	Aire d'absorption équivalente
α		Coefficient d'absorption
h	%	Taux de l'humidité de l'air
EDT	s	Early Decay Time
D	dB	Isolement acoustique brut
R	dB	Indice d'affaiblissement acoustique
t		Facteur de transmission de la paroi séparative
f_c	Hz	Fréquence critique
R_w R_A	dB	Indice d'affaiblissement pondéré
R_{résultant}	dB	Indice d'affaiblissement résultant
f_{pq}	Hz	Fréquence de résonance
k_i		Coefficient représentatif du mode d'attache de la dalle
C_t	m/s	Vitesse de propagation longitudinale dans le matériau
E_A	W/m ²	Energie absorbée
E_I	W/m ²	Energie incidente

Avant-propos

Le présent manuel est destiné aux étudiants de la première année Master en architecture. Il porte uniquement sur une partie du programme de la matière « Construction durable » à savoir, l'acoustique architecturale. En outre, il se centre seulement sur l'environnement sonore dans la construction. Il se veut explorateur de différentes notions liées à l'acoustique dans une construction ainsi que les solutions architecturales et constructives pour protéger l'utilisateur contre le bruit. En effet, il vise les deux objectifs suivants (cités dans le canevas) :

1. Acquérir les fondamentaux pour la construction et réhabilitation durable des bâtiments,
2. Intégrer le projet de construction dans son environnement, mener une analyse de site performante et identifier l'ensemble des impacts environnementaux maîtrisables sur le cadre bâti.

Un élément clé de la construction durable, le confort acoustique doit être pris en considération par l'étudiant dans son projet architectural. Partant, ce support pédagogique aide l'étudiant à se familiariser avec les notions clés de l'acoustique en proposant des orientations quant aux solutions architecturales et constructives qui peuvent être adoptées dans son processus conceptuel.

Avant d'être un objet à contempler, l'espace architectural que nous occupons, est un espace sensoriel par excellence. Il entreprend une relation corrélative avec son usager. Cette interdépendance, permet à l'espace d'être un partenaire qui vit (sous la condition d'être occupé) (Merleau-Ponty, 2005).

En tant qu'initiateur de l'espace, l'architecte se glorifie de vouer l'espace d'une ambiance spécifique et, de lui conférer un langage, voire un pouvoir de communication avec son usager. En effet, la spécificité de l'architecte est d'animer l'espace, de bien penser à la gestion de cet espace, pour concevoir des lieux confortables et significatifs. La conception architecturale (étant, un processus complexe dans lequel des entités de diverses natures (hétérogènes) sont manipulées d'une manière homogène fait appel à plusieurs théories. A l'instar de la lumière naturelle et/ou artificielle, le son est un élément de composition et d'esthétique architecturale. On compose avec le son par l'intégration des projets architecturaux dans les paysages naturels pour bénéficier d'une sonorité naturelle. Dans le cas des salles de spectacle et des salles d'enseignement, le son est géré de façon à acquérir une bonne intelligibilité de la parole. Mais en cas de nocivités préjudiciables, on doit se protéger contre le bruit intérieur et extérieur pour avoir des espaces confortables. Les sons sont même conservés, le cas des ambiances patrimoniales faisant partie de la mémoire sensible d'une architecture ancienne d'une ville.

Censé donc concevoir des espaces acoustiquement confortables, l'architecte doit prendre le son en considération dans sa conception. La compréhension du son, sa nature et son comportement dans l'espace est indispensable. La présence de l'acousticien est nécessaire, mais son intervention arrive en dernier quand tout est déjà en place. Par conséquent, l'acoustique architecturale n'est pas un accessoire, elle n'est pas secondaire non plus (Hamayon, 2008). On doit y méditer durant la phase de la conception. Prendre en charge l'acoustique architecturale, c'est construire avec le son, se protéger des bruits et corriger l'acoustique des espaces.

Introduction

Le présent manuel est un support pédagogique pour les étudiants du Master I en architecture. Il a pour but de donner des éclaircissements sur l'acoustique architecturale, une thématique vaste voire compliquée, souvent considérée comme accessoire à la conception. Ainsi donc, l'objectif est de la simplifier en proposant des définitions accompagnées d'illustrations (figures et schémas) pour que l'étudiant puisse comprendre les notions de bases liées à l'acoustique en général et, à l'acoustique architecturale en particulier.

Ce manuel est composé de trois chapitres. Dans le premier, nous explorons les notions clés de la physique de l'acoustique. L'onde sonore, le comportement du son dans l'air, les décibels, la perception du son par l'oreille humaine, etc., une pluralité de notions clés sont définies, afin d'avoir une base liminaire sur l'acoustique architecturale. Le deuxième chapitre porte sur l'acoustique architecturale. Nous nous intéressons beaucoup plus à l'espace architectural. Nous faisons un zoom sur le comportement du son dans une salle, la réverbération et autres phénomènes sonore tels l'écho, la focalisation etc. Le troisième chapitre, quant à lui, traite de l'isolation acoustique. Des formules de calcul sont ici expliquées pour permettre à l'étudiant de calculer les indices d'affaiblissement et, d'autres indices liés à l'isolement.

Par ce manuel, nous essayons d'une part d'inculquer les notions de bases relatives à l'acoustique architecturale et, de sensibiliser l'étudiant à la nécessité du son dans la conception architecturale d'autre.

Chapitre I :
L'acoustique : notions de base

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder les notions de base de l'acoustique. L'objectif est d'apporter à l'étudiant des éléments d'éclaircissement sur les notions physiques de l'acoustique. Une pluralité de définitions accompagnées d'illustrations (figures et schémas) est présentée dans le but de simplifier la complexité de la thématique. Nous allons également éclaircir comment l'être humain perçoit le son en faisant appel à quelques notions relatives à la médecine. Dans cette partie, il est primordial de rappeler puis sensibiliser l'étudiant à la multidisciplinarité de l'architecture.

1. L'acoustique

Étymologiquement parlant, le mot « *Acoustique* » vient du grec et signifie entendre. L'acoustique est la science ou disons, une partie des sciences physiques relative à l'étude des sons et les bruits (tout ce qui a rapport aux sons). Elle étudie le son du point de vue de leur émission, leur propagation et de leur réception (Figure I.1).



Figure I.1 : Les domaines d'étude de l'acoustique (Auteur, 2020)

2. La source sonore

On appelle « source sonore », tout sujet émettant des ondes sonores: un homme parlant, machine en marche, haut-parleur, feuillage devant le vent etc. Il existe deux types de sources sonores: sources ponctuelles et sources linéaires (Tran, 1996).

2.1. La source ponctuelle

C'est toute source dont les dimensions sont négligeablement petites par rapport aux distances de propagation des ondes tels que : un instrument musical, une voiture en marche, un haut- parleur etc. (Tran, 1996). Elle peut être fixe (instrument

musical) ou mobile (voiture en marche). Les ondes ponctuelles produisent des ondes sphériques dans l'atmosphère (Figure I.2).

2.2. La source linéaire

C'est toute source se composant de plusieurs sources ponctuelles qui se rangent en ligne (une ligne de voiture en marche) (Figure I.3). Les ondes linéaires produisent des ondes cylindriques (Tran, 1996).

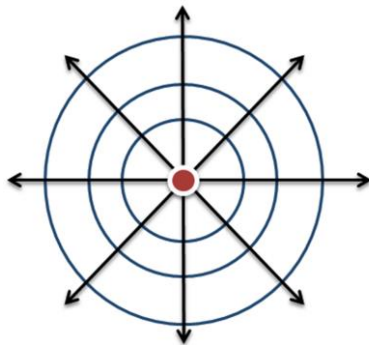


Figure I.2 : La propagation d'une onde sonore ponctuelle (Tran, 1996)

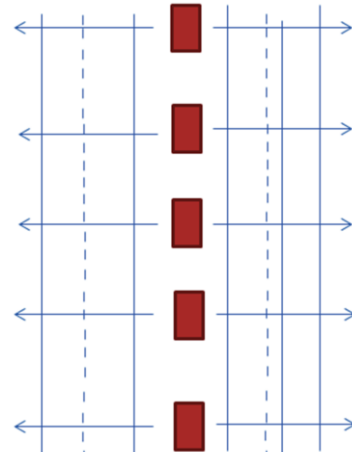


Figure I.3 : La propagation d'une onde sonore linéaire (Tran, 1996)

On distingue également deux types de propagation sonore dans l'air : la propagation omnidirectionnelle et la propagation directionnelle. La première, se produit dans l'air libre sans la présence d'un quelconque obstacle (Figure I.4-a). Par contre, la propagation directionnelle se produit dans un air limité par un ou plusieurs obstacles (Figure I.4-b, I.4-c). Les obstacles pourraient être le sol, les murs, les objets etc.

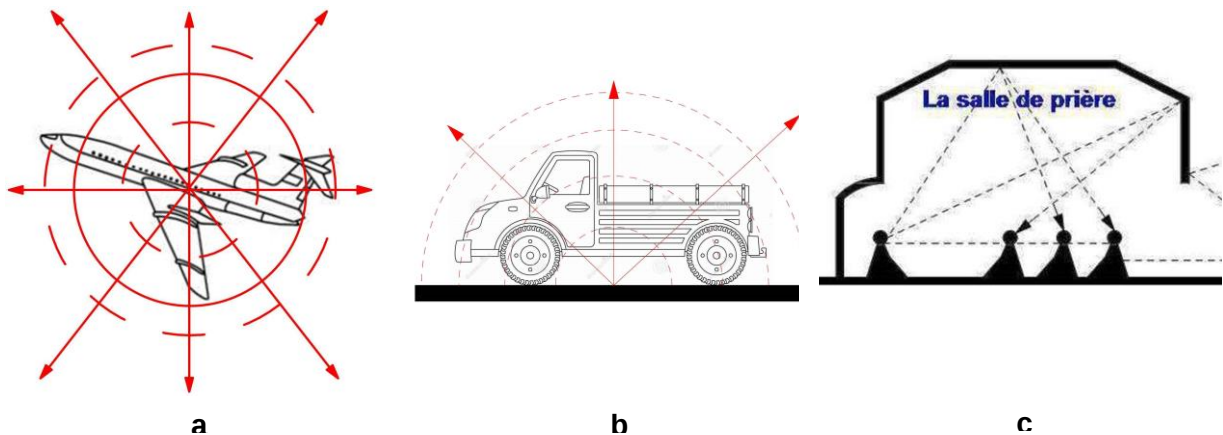


Figure I.4 : La propagation omnidirectionnelle et la propagation directionnelle. (a) onde sonore générée par un avion qui vole, (b) onde sonore générée par une voiture en marche dont l'obstacle est le sol, (c) onde sonore générée par un Sheikh qui donne une leçon à ses Tolbas dans une salle de prière d'une medersa dont les obstacles sont les parois (Auteur, 2020).

3. Les ondes

L'onde se définit comme une perturbation qui se propage. On distingue deux types : les ondes mécaniques et les ondes électromagnétiques (Margollé *et al*, 2016).

3.1. L'onde mécanique et l'onde électromagnétique

Une onde est une perturbation ou une oscillation qui se propage à travers un milieu (l'air, une corde, l'eau, la terre). C'est un déplacement de l'énergie qui se produit de proche en proche sans transport de matière.

Les ondes électromagnétiques (lumière) n'ont pas besoin d'un support matériel pour se propager. Elles peuvent se propager dans le vide (les communications radio dans l'espace, la lumière venue des étoiles etc.).

3.2. L'onde transversale et l'onde longitudinale

3.2.1. L'onde transversale

Une onde est dite transversale si les particules oscillent dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Pour qu'une onde transversale puisse se propager, il faut que le milieu soit suffisamment rigide. Si on prend l'exemple de la corde (Figure I.5), les particules vont osciller verticalement. Autrement dit, elles bougent alternativement en haut puis en bas. Un autre exemple est celui des ondes à la surface de l'eau (Figure I.6) où la direction de l'oscillation est perpendiculaire à la direction de propagation.

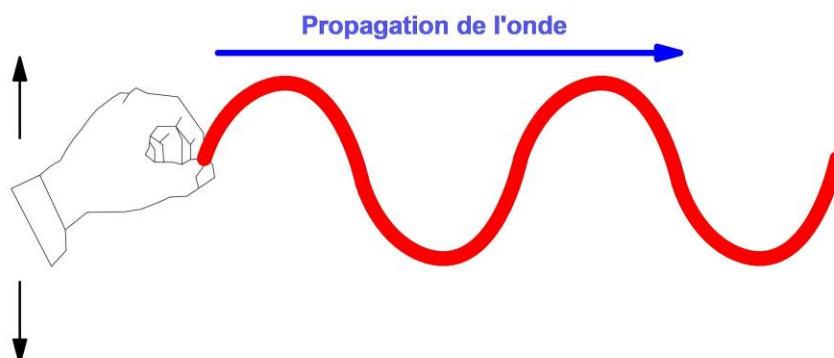


Figure I.5 : une onde transversale générée par une corde (Auteur, 2020)



Figure I.6 : Une onde transversale à la surface de l'eau (Giancoli, 1993)

3.2.2. L'onde longitudinale

Une onde est dite longitudinale si les particules oscillent dans la même direction que celle de la propagation de l'onde (Figure I.7). L'air n'est pas rigide pour permettre une onde transversale. On peut citer l'exemple d'un ressort tendu horizontalement puis lâché. Chaque spire va se déplacer par rapport à sa position d'équilibre.

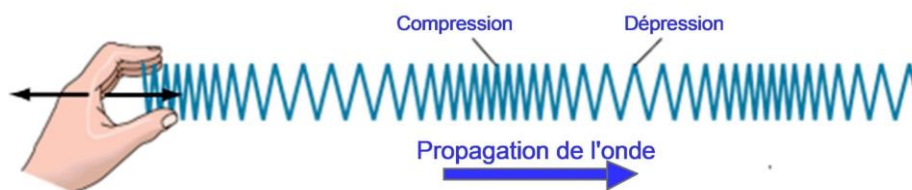


Figure I.7 : Une onde longitudinale générée par un ressort (Auteur, 2020)

4. Le son et son milieu de propagation

Physiologiquement parlant, le son est une sensation auditive engendrée par une vibration acoustique. Dans le domaine physique, le son est un phénomène vibratoire. Son origine émane de la vibration d'un objet matériel dans un milieu matériel (composé de molécules) comme l'air, les gazes, les vapeurs, l'eau (liquides), le béton, la terre etc.

Dans l'air, le son met en vibration une surface (lorsqu'une personne parle devant une feuille de papier, celle-ci vibre). Autrement dit, il peut être produit par la vibration d'une surface (peau d'un tambour, membrane d'un haut-parleur etc.). Le son ne se

propage pas dans le vide¹. Ceci dit, les vibrations d'un objet ne peuvent pas se propager en absence de la matière (absence d'atomes). Ainsi, il n'y a pas de son dans l'espace du fait qu'il n'y a pas d'air voire pas de matière².

5. L'onde sonore

L'onde sonore est produite par la vibration d'un objet (Les cordes vocales d'un chanteur, la peau d'un tambour, les bruissements des feuilles d'un arbre, la membrane d'un haut-parleur etc.) (Figure I.8). S'agissant d'une interaction mécanique entre deux structures: main et peau d'un tambour, doigt et corde d'une guitare, etc. Ce mouvement vibratoire se propage dans un milieu matériel, entre la source et l'oreille de l'auditeur. Les molécules du milieu matériel sont alternativement comprimées et dilatées, donnant naissance à une onde sonore. La propagation du son se fait sans transport de la matière: l'onde sonore issue d'un haut-parleur ne crée pas de courant d'air.



a



b



c

Figure I. 8 : Quelques sources sonores : (a) les cordes vocales d'un chanteur (Alier, 2006), (b) la peau d'un tambour (Comtet, 2012), (c) les bruissements des feuilles d'un arbre (Dupérat *et al* ; 2008)

¹ Une expérience simple faite au laboratoire illustrant le principe de la propagation du son est celle de la cloche à vide. Pour ce faire, nous avons besoin d'une source sonore (un réveil, une enceinte etc.), une cloche à vide, un sonomètre placé à côté de la source sonore et un aspirateur. Ce dernier a pour but d'aspirer l'air qui existe dans la cloche. Il est remarqué que plus l'air est aspiré, plus le niveau sonore mesuré par le sonomètre est diminué.

² Comme il a été mentionné ci-dessus, le son ne se propage pas dans le vide. Dans l'espace où règne le vide, la densité de la matière est trop faible (quasi-absence des particules ; une particule par centimètre cube). S'agissant de la communication entre la terre et l'espace, elle se fait par les ondes radios, des ondes électromagnétiques, qui ressemblent aux ondes lumineuses qui se propagent dans le vide avec une vitesse de $3 \cdot 10^8$ m/s.

6. La propagation d'une onde sonore

La propagation du mouvement vibratoire correspond à un transport d'énergie et non pas de la matière (molécules) (Figure I. 9). Chaque molécule composant l'air en contact avec une source sonore, vibre à son tour. Cette vibration est ensuite transmise à la molécule voisine, puis à la voisine de cette voisine, etc. (une propagation de proche en proche). L'onde sonore est une onde mécanique longitudinale du fait que les molécules se déplacent parallèlement au sens de propagation de l'onde (Figure I. 10).

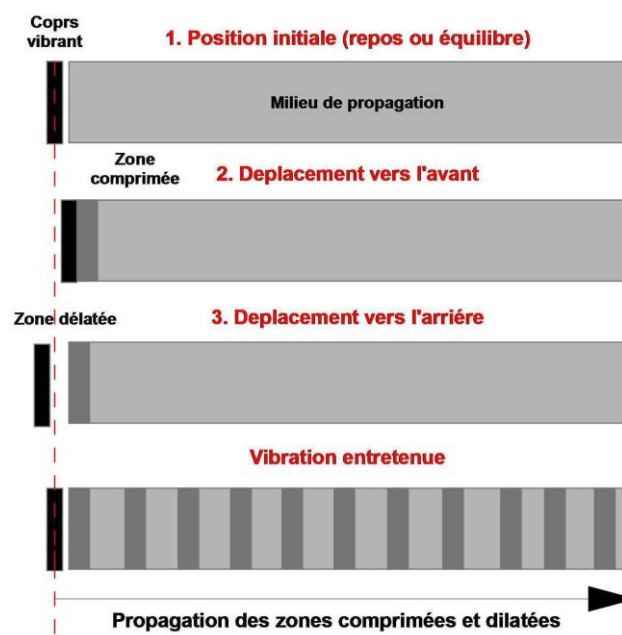


Figure I.9 : Le principe de propagation d'une onde sonore (Chagué, 2001).

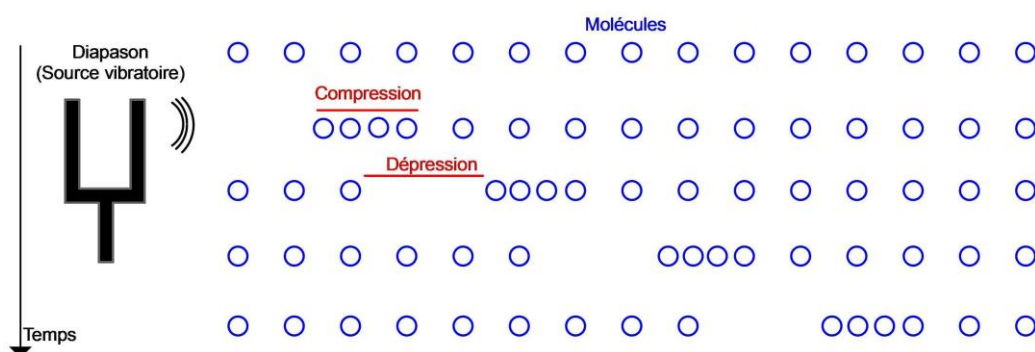


Figure I. 10 : Les molécules se déplacent parallèlement au sens de propagation de l'onde sonore générée par un diapason (Hamayon, 2008)

7. La célérité du son

7.1. Célérité du son et son milieu de propagation

La célérité³ du son dépend du milieu de propagation de l'onde sonore (Air, eau, terre, béton etc.) (Tableau I. 1). En fonction du milieu de propagation, les ondes sonores vont se propager plus au moins vite. Dans l'eau les molécules sont plus proches les unes des autres que dans l'air⁴. Partant, l'onde sonore a plus de facilité de se propager dans l'eau que dans l'air (4 fois plus rapidement dans l'eau que dans l'air). Autrement dit, plus les molécules sont rapprochées, plus le son se déplace promptement (Figure I. 11).

Milieu de propagation	Célérité du son
L'air	340 m/s
L'eau	1425 m/s
L'acier	5000 m/s

Tableau I. 1 : La célérité du son dans des milieux de propagation différents (Hamayon, 2008)

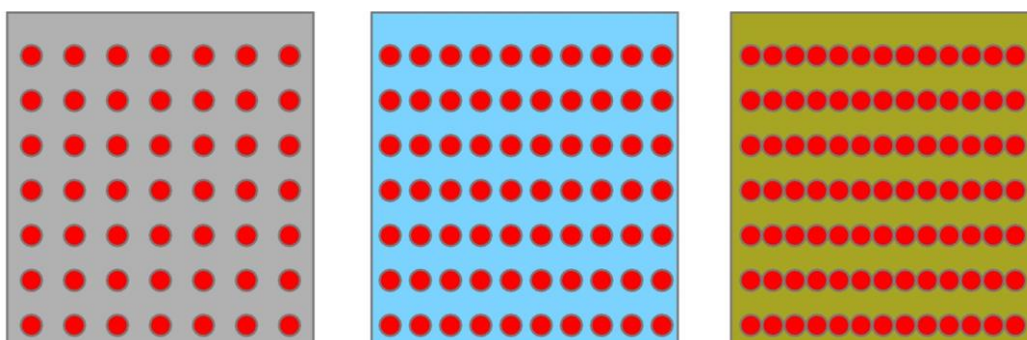


Figure I. 11 : Représentation schématique des molécules des trois milieux de propagation (de gauche à droite) ; l'air, l'eau et l'acier (Auteur, 2020).

7.2. Relation entre la célérité du son et la température

Dans l'air, la célérité du son (c) dépend également de sa température (t). La célérité du son augmente avec l'augmentation de la température. Elle augmente de 0,6m/s pour un 1°C. Il ne faut pas confondre entre la vitesse du son qui est la vitesse de propagation des ondes dans l'air selon des sphères concentriques et la vitesse des

³ On utilise le terme « célérité du son » au lieu de « vitesse du son » parce que l'énergie qui se transfère et non pas la matière.

⁴ Le son se propage mieux dans l'eau que dans l'air du fait que les molécules sont plus proches dans l'eau que dans l'air. Par exemple, on entend mieux les sons des gens dans la piscine.

particules qui se déplacent très légèrement autour de leur position d'équilibre. Pour calculer la célérité du son, on utilise la formule suivante (Hamayon, 2008) :

$$c = 20 \sqrt{t} \quad (I.1)$$

On trouve également la formule suivante (Hamayon, 2008) :

$$c = 331.4 + 0,607 t \quad (I.2)$$

c : célérité du son (m/s), t : température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

8. Les grandeurs physiques du son

8.1. La pression acoustique (P)

La pression atmosphérique est la pression qu'exerce l'air sur tous les corps. En l'absence d'une onde sonore, les particules aériennes sont réparties de manière régulière, la pression est en tout point égal la pression atmosphérique. Par contre, en présence d'une onde sonore, on aura des zones de pression et de dépression (Figure I. 12). La pression acoustique s'exprime en Pascals ($P_a = 1\text{N/m}^2$). On appelle pression instantanée P , la somme de la pression atmosphérique ou statique de l'ordre de 10^5 (une valeur variable selon les conditions climatiques) et de la pression acoustique P_a (P) (Hamayon, 2008).

$$P = P_0 + P_a \quad (I.3)$$

P : pression instantanée(P), P_0 : pression acoustique(P), P_a : pression atmosphérique(P)

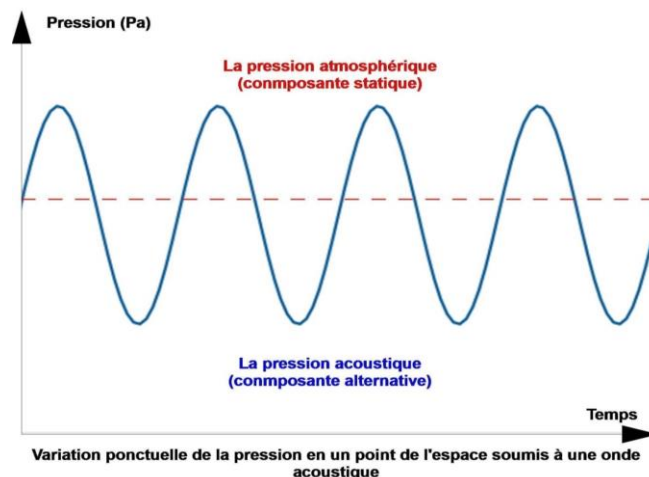


Figure I. 12 : Variation ponctuelle de la pression en un point de l'espace soumis à une onde acoustique (Hamayon, 2008)

8.2. Le niveau de pression acoustique (L_p)

L'oreille humaine est sensible à des variations de pression variant, de **$2 \cdot 10^{-5}$ Pascal** à **20 Pascal**. (20 Pa est le seuil de douleur). Pour calculer le niveau de pression acoustique, on utilise la formule suivante (Hamayon, 2008) :

$$L_p = 20 \lg p/p_0 \quad (I.4)$$

p : pression acoustique mesurée (P).

p_0 : pression acoustique de référence (P).

Le niveau de pression du seuil d'audibilité est de 0 dB et le seuil de douleur est de 120 dB. Il est à signaler que l'intensité ou le volume d'un son dépend de la pression acoustique créée par la source sonore (Figure I.13). Plus la pression est importante, plus le volume est élevé.

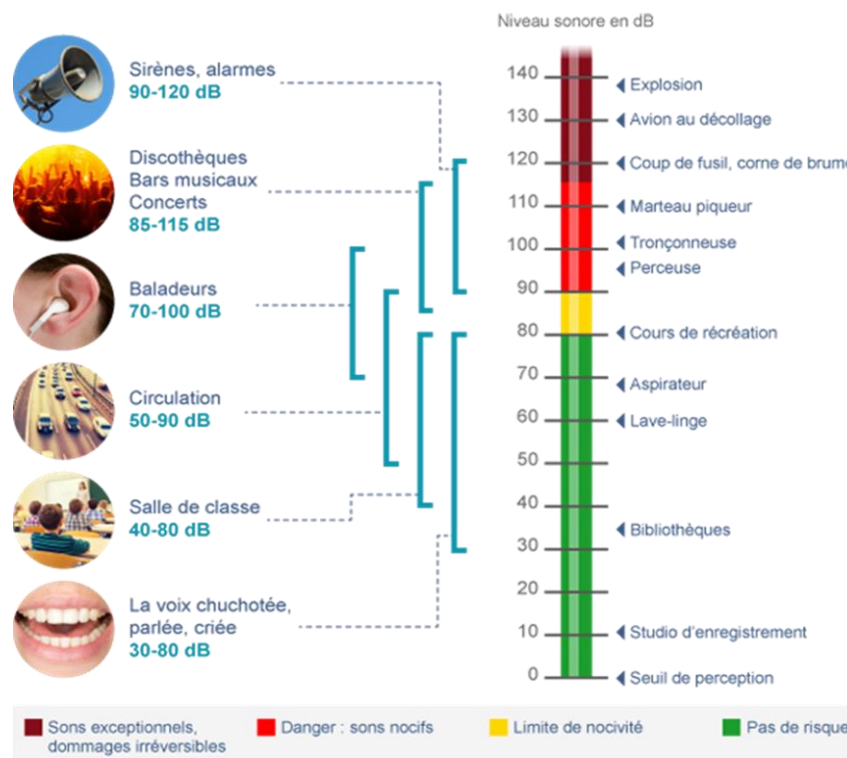


Figure I.13 : Le niveau de pression acoustique de quelques sources sonores (Choclea.org)

8.3. La puissance acoustique

La puissance acoustique (W ou P) est l'énergie libérée par une source sonore par unité de temps qui se répartit dans l'espace pour arriver à l'oreille. Elle s'exprime en watts (W). Le seuil d'audibilité d'un son est de 10^{-12} watt à la fréquence 10000 hertz.

8.4. Le niveau de puissance sonore

La formule de calcul du niveau de puissance acoustique est la suivante (Hamayon, 2008) :

$$L_w = 20 \lg W/W_0 \quad (I.5)$$

W : Puissance acoustique mesurée (w).

W_0 : Puissance acoustique de référence (w).

8.5. L'intensité sonore (puissance surfacique moyenne) (I)

L'intensité sonore (I) est la grandeur qui nous informe sur la force d'un son. Ainsi, plus l'intensité sonore est élevée, plus le son perçu est fort par l'oreille humaine. L'intensité sonore s'exprime en watt par mètre carré ($W.m^{-2}$). Il existe une intensité sonore minimale sous laquelle on n'entend pas le son ; c'est le seuil d'audibilité. Il vaut $I_0 = 10^{-12} W.m^{-2}$ (Figure I.14).

$$I = P/S \quad (I.6)$$

I : L'intensité sonore (W/S)

P : La puissance acoustique (W)

S : La surface de l'onde (S)

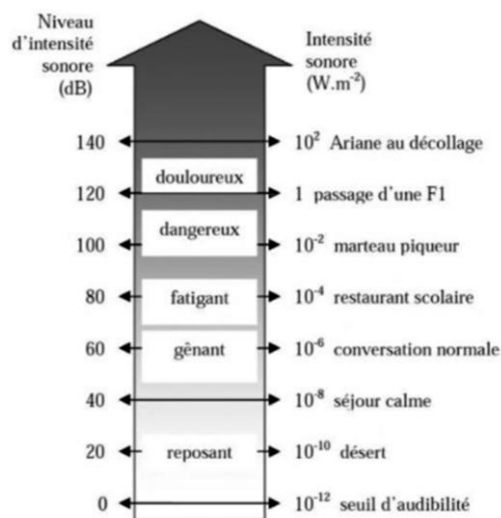


Figure I.14 : l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore de quelques sources sonores (Rey, 2021).

L'onde sonore se propage d'une manière sphérique (dans toutes les directions) (Figure I.15). La surface d'une sphère est $4 \pi r^2$, ainsi donc, la formule de calcul de de l'intensité sonore est la suivante (Hamayon, 2008) :

$$\begin{aligned} I &= P/S \\ I &= P/4 \pi r^2 \end{aligned} \quad (I.7)$$

r : la distance entre la source sonore et là où on se situe

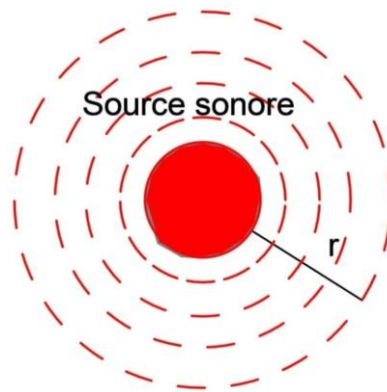


Figure I.15 : Schéma représentatif de la surface d'une onde sonore (Auteur, 2020)

8.6. Le niveau d'intensité sonore (L_i)

Pour calculer le niveau d'intensité sonore (L_i), on utilise l'équation suivante (Hamayon, 2008) :

$$L_i = 20 \lg I/I_0 \quad (I.8)$$

L_i : le niveau d'intensité sonore (dB)

I : l'intensité sonore (W.m^{-2})

I_0 : l'intensité sonore de référence-le seuil d'audibilité ($I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$)

8.7. La fréquence et l'amplitude

La fréquence est le nombre de périodes par seconde. Autrement dit, c'est le nombre de vibrations par seconde (Figure I.16). Elle s'exprime en Hertz (Hz). Par exemple, 200 Hz correspondent à 200 vibrations par seconde.

La période est le temps mis par la molécule d'air pour parcourir un seul aller-retour (vibration pour un aller-retour). C'est le nombre de secondes par oscillation (Hamayon, 2008).

$$f=1/t \quad (1.9)$$

f: le nombre de vibration par seconde

t: le nombre de secondes par vibration

L'amplitude de l'onde sonore est le déplacement maximal de la molécule d'air depuis sa position du repos.

L'intensité sonore que perçoit l'homme dépend de l'amplitude. Plus l'amplitude d'une onde sonore est grande, plus le son est fort. (Figure I.17). Lorsque vous augmentez le son de la télévision, par exemple, vous augmentez l'amplitude de l'onde sonore qui en émane.

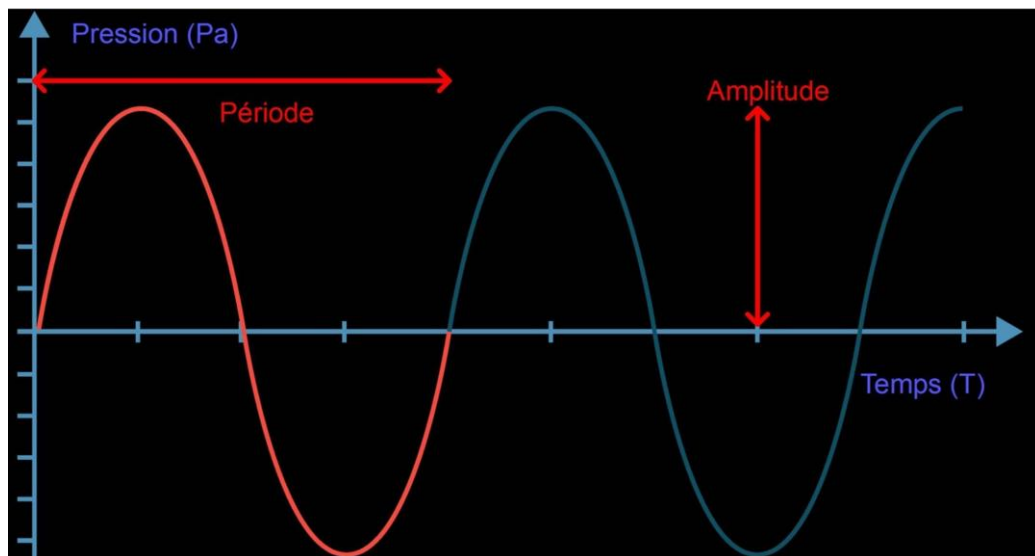


Figure I. 16 : La fréquence et l'amplitude d'une onde sonore présentée sur un oscillogramme (Auteur, 2020)

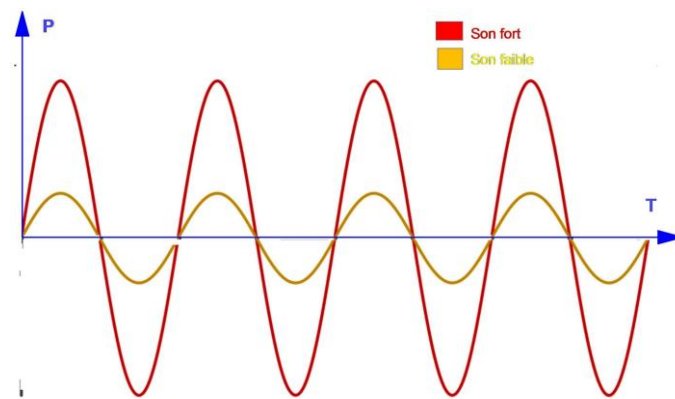


Figure I.17 : La différence entre le son fort et le son faible (Auteur, 2020).

La fréquence nous permet de distinguer les sons graves des sons aigus (Figure I.18). Un son paraît d'autant plus aigu que sa fréquence est élevée et d'autant plus grave que sa fréquence est basse. La fréquence est la hauteur du son au langage du musicien.

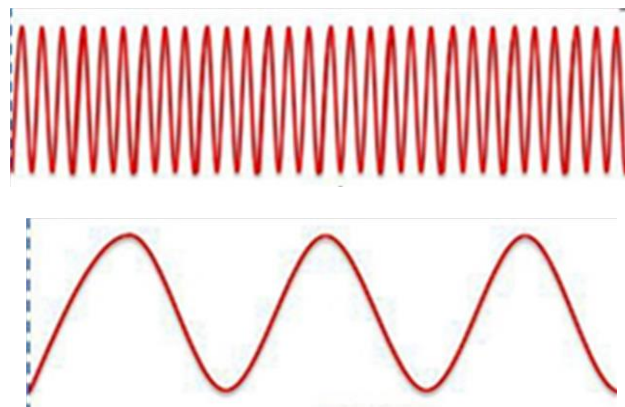


Figure I.18 : Le son aigu en haut, le son grave en bas (Auteur, 2020)

9. Les types du son

9.1. Le son pur

Le son pur est une sensation auditive provoquée par une onde de pression périodique purement sinusoïdale. Il n'est composé que d'une seule fréquence (Figure I. 19).

9.2. Le son complexe

Le son complexe est un mélange de sons purs. Autrement dit, c'est la superposition d'un certain nombre de sons purs (Figure I.19). Les sons complexes sont les sons naturels, ils comportent plusieurs sons purs qui peuvent être séparés lors d'une analyse spectrale.

9.3. Le son confus

C'est un mélange de sons sans périodicité précise comme les bruissements des feuilles dans les arbres (Figure I.20).

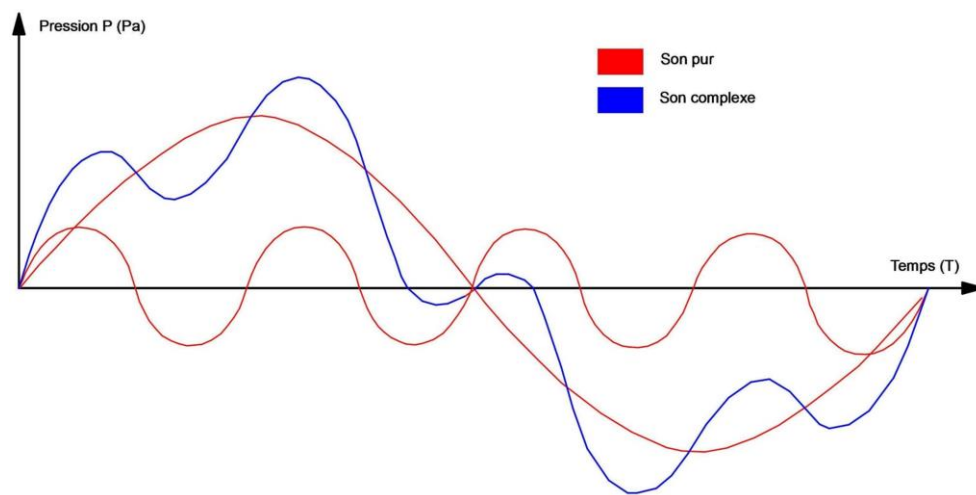


Figure I.19 : Le son pur et le son complexe (Hamayon, 2008)

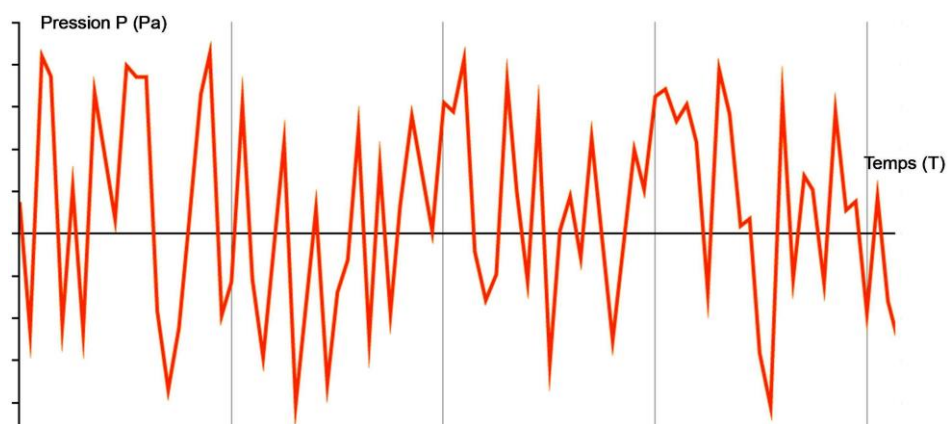


Figure I. 20 : Le son confus (Hamayon, 2008)

9.4. Le son musical

La musique est l'art de combiner les sons de manière à produire des successions agréables à l'oreille. À l'instar du bruit, la musique découle de plusieurs sons. C'est une juxtaposition harmonieuse des sons. Le bruit procure la gêne alors que la musique génère le bien être.

10. Infrasons, sons et ultrasons

L'homme entend des sons ayant des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz (Figure I. 21). Cette fauchette dépend de la personne. Elle diminue avec l'âge. Les infrasons sont les sons ayant une fréquence inférieure à 20 Hz. ils ne sont pas audible par l'oreille humaine mais quelques animaux peuvent entendre ces sons. Les ultrasons sont les sons ayant une fréquence supérieure à 20 000 Hz.

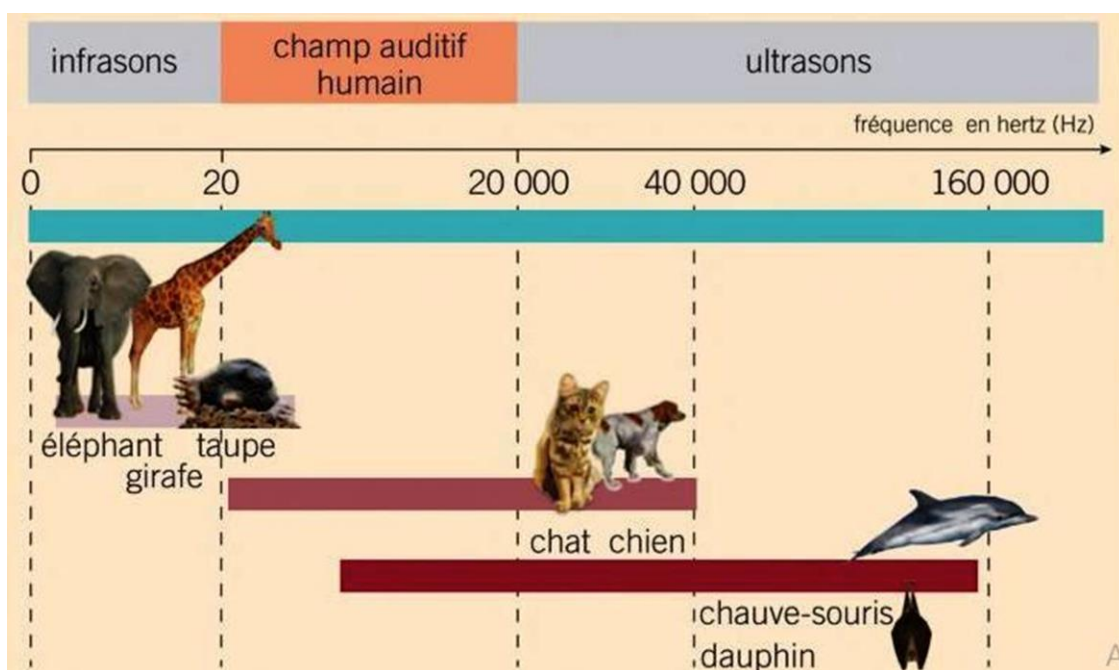


Figure I. 21 : Les infrasons, les sons et les ultrasons (Choclea.org)

11. L'analyse spectrale d'un son

Fourrier a montré que tout signal périodique peut être en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence f_n multiple d'une fréquence dite fondamentale f_1 . Ces signaux sinusoïdaux s'appellent harmoniques, leurs fréquences sont multiples de f_1 (f , $2f$, $3f$, $4f$, etc.) (Fischetti, 2003).

On appelle spectre, la décomposition du son en harmonique. Graphiquement, le spectre se compose des fréquences en abscisse et, l'énergie des harmoniques en ordonnée (Figure I.22). Il s'obtient à l'aide de l'appareil « analyseur de spectre ».

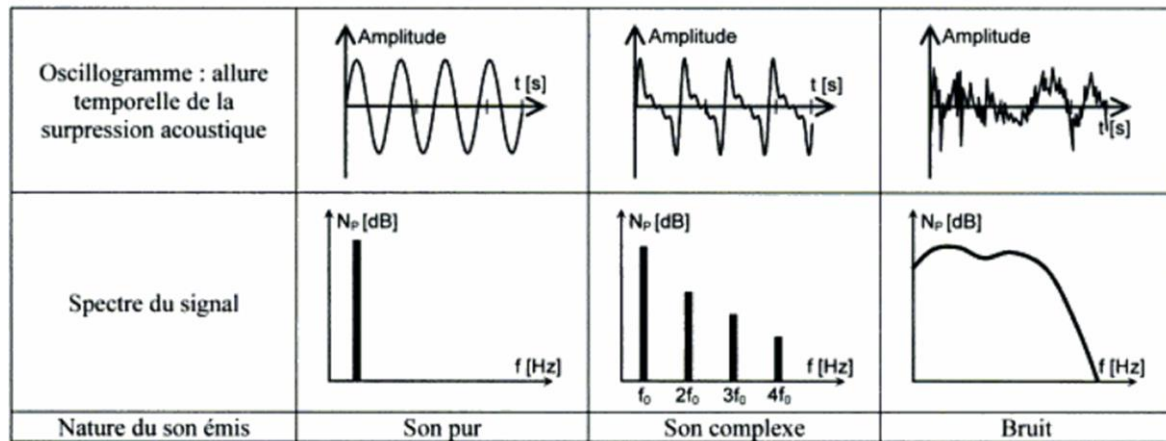


Figure I.22 : La décomposition spectrale d'un son (Thomas, 2006)

12. Le bel et le décibel

Le décibel est l'unité de mesure des sons, sans dimension. Elle est utilisée pour la mesure de l'intensité sonore et d'autres grandeurs physiques. En effet, elle permet d'exprimer le rapport entre l'intensité sonore mesurée et l'intensité sonore de référence (l'intensité la plus petite audible par l'être humain). Le décibel se compose de déci et bel, le bel vaut dix fois le décibel.

Le Bel est nommé en l'honneur du son inventeur Graham Bell. En acoustique, le bel est le logarithme base 10 du quotient d'une grandeur physique mesurée à une grandeur physique de référence.

L'oreille est un détecteur unique des sons dans la mesure où il capte des sons sur une diversité de grandeurs extrêmement grandes (Figure I.23). Le logarithme permet de traduire notre manière de percevoir les sons. En conséquence, on utilise le bel.



Figure I.23 : L'intensité sonore de référence et l'intensité sonore maximale chez l'être humain (Auteur, 2020)

Pour comprendre le principe, on peut imaginer un dispositif qui mesure la taille d'un atome et la taille d'un Atomium (Clipedia, 2015). La première mesure 10-10 m égale à 1 Å (ångström), tandis que le deuxième mesure 10² m. Un dispositif qui mesure une telle variété de longueurs n'existe pas (Figure I. 24). Par exemple, la latte ne s'adapte ni à la mesure d'un atome, ni à la mesure de l'Atomium. Par contre, l'oreille peut capter une grande variété sonore. Pour faire la représentation de la mesure de l'atome et celle de l'Atomium sur une même échelle, on utilise une échelle logarithmique. Le même principe est appliqué aux sons (Figure I. 25).

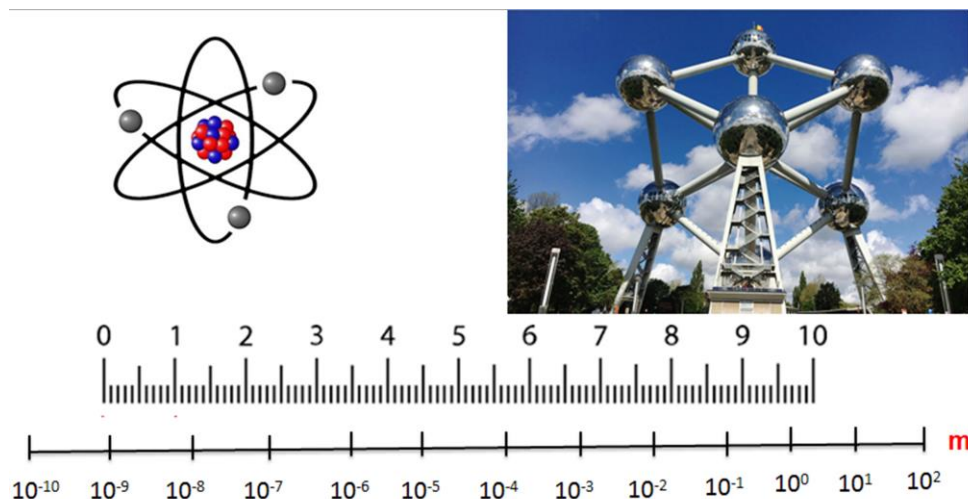


Figure I. 24 : L'atome et l'Atomium : deux grandeurs différentes, deux échelles différentes (Clipedia, 2015)

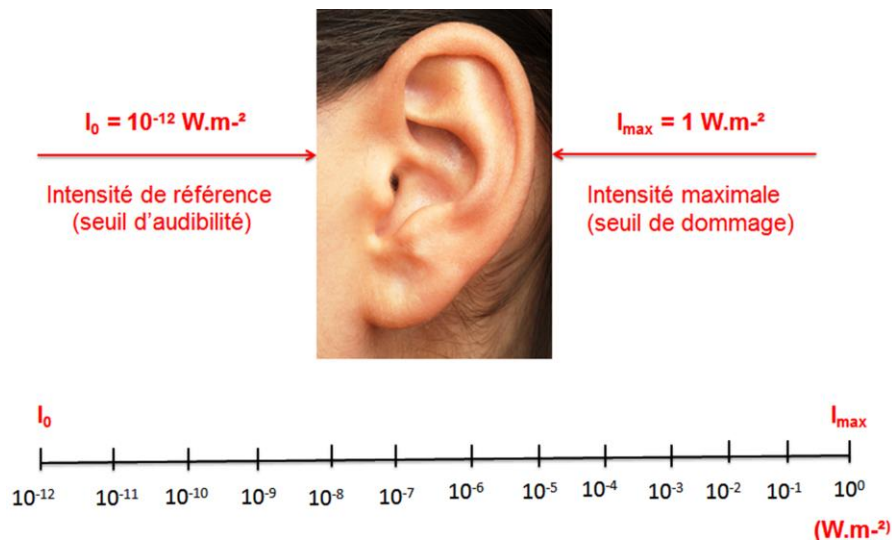


Figure I. 25 : L'échelle logarithmique appliquée aux sons (Auteur, 2020)

De l'intensité au décibel (Figure I. 26), nous avons:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$$

$$I_{\max} = 1 \text{ W.m}^{-2}$$

Si on veut écrire $I_{\max}$ par rapport à I_0 , on aura :

$$I_{\max} = X I_0$$

$$I_{\max} = 10^{12} \times I_0 = 10^{12} \times 10^{-12} = 1.$$

$$I_0 = 10^{-12} = 10^0 \times 10^{-12} = 10^{-12}$$

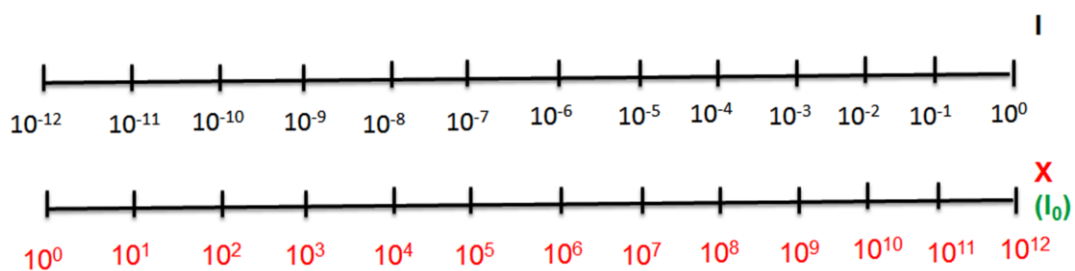


Figure I. 26 : I par rapport à I_0 (Clipedia, 2015)

La relation entre l'intensité physique et l'intensité perçue par l'oreille est (Clipedia, 2005) :

$$y = \log(x) \quad (I.10)$$

y: l'intensité perçue par l'oreille

x: l'intensité physique exprimée en W.m^{-2}

$$1 = \log(10^1)$$

$$2 = \log(10^2)$$

$$3 = \log(10^3)$$

$$4 = \log(10^4) \text{ (Figure I. 27)}$$

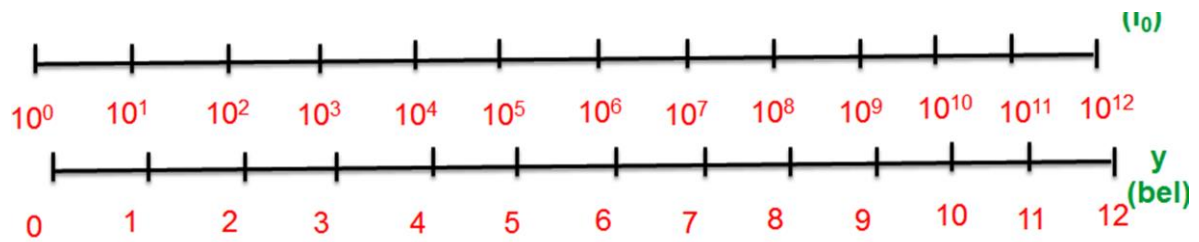


Figure I. 27 : De I_0 au bel (Clipedia, 2015)

1 bel = 10 décibel

$y = 10 \log(x)$ dB (Figure I. 28)

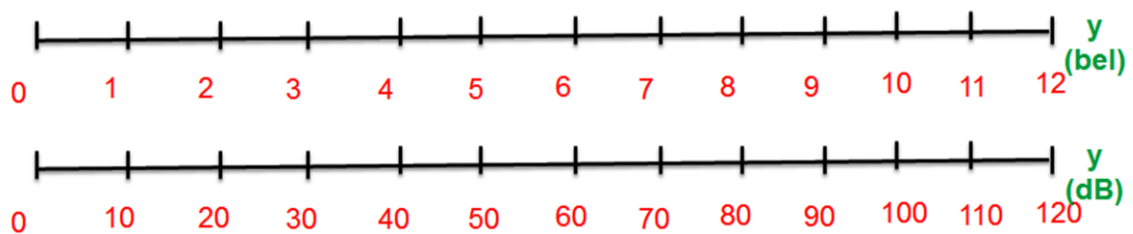


Figure I. 28 : Du bel au décibel (Clipedia, 2015)

12.1. Addition des décibels

Ce qu'il faut retenir, c'est qu'on additionne les intensités et les puissances sonores mais on n'additionne jamais les décibels (Hamayon, 2008).

$$\begin{aligned} I_{\text{Total}} &= \sum I \\ P_{\text{Total}} &= \sum P \end{aligned} \quad (I.11)$$

Un son de faible intensité ajouté à un son de forte intensité ne change pas ce dernier. Par contre, deux sons de même intensité ajoutés l'un à l'autre augmentent de **3dB** le niveau de l'un d'eux.

12.1.1. L'addition de deux niveaux sonores

Si on a deux sources S_1 et S_2 , la superposition de deux niveaux sonores L_1 et L_2 (les deux sources fonctionnent simultanément), émis par les deux sonores est réalisée en suivant la formule suivante (Hamayon, 2008):

$$L_r = 10 \log (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2}) \quad (I.12)$$

L_1 (dB): le niveau sonore en provenance de la première source S_1 fonctionnant seule

L_2 (dB): le niveau sonore en provenance de la première source S_2 fonctionnant seule

L_r (dB): le niveau sonore résultant au point de réception en provenance des deux sources sonores.

Pour additionner deux niveaux sonores, il convient en premier lieu de calculer leur différence, puis, d'utiliser le tableau ci-dessous (Tableau I. 2) ou l'abaque (Figure I. 29).

Différence entre les deux niveaux	Nombre de décibels à ajouter au niveau plus élevé
0	3
0.5	2.8
1	2.5
1.5	2.3
2	2.1
2.5	1.9
3	1.8
3.5	1.6
4	1.5
4.5	1.3
5	1.2
5.5	1.1
6	1
6.5	0.9
7	0.8
7.5	0.7
8	0.6
8.5	
9	0.5
9.5	
10	0.4

10.5	0.3
11	
11.5	
12	
12.5	0.2
13	
13.5	
14	
14.5	0.1
15	
15.5	
16	

Tableau I.2 : L'addition de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008)

Application

On a deux sources S_1 et S_2

$L_1 = 40$ dB

$L_2 = 45$ dB

$45 - 40 = 5$ dB

$45 + 1,2 = 46,2$ dB

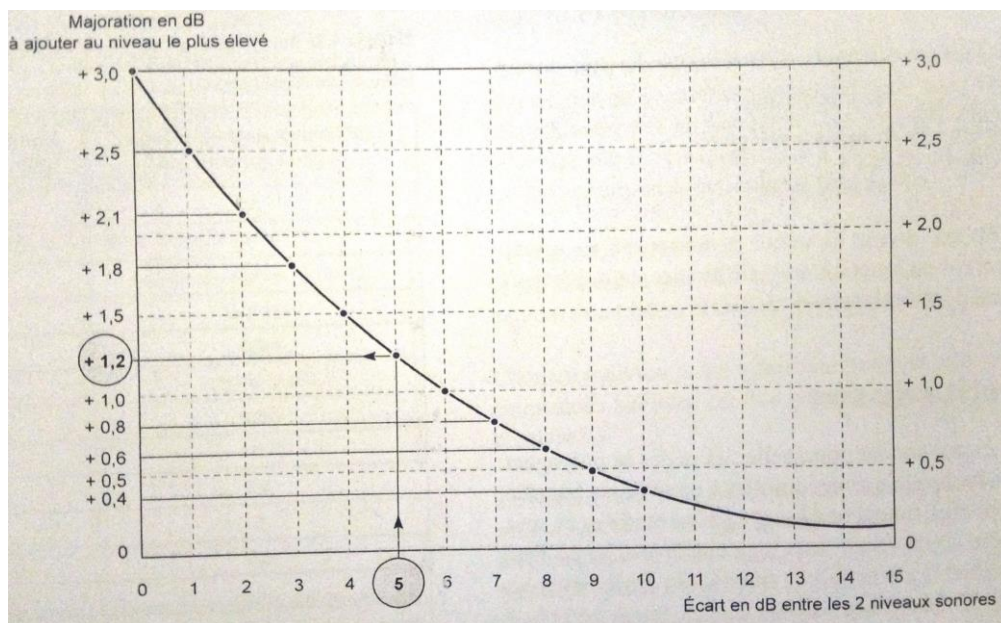


Figure I. 29 : L'addition de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008).

12.1.2. Addition de plus de deux niveaux sonores

Pour additionner plus de deux niveaux sonores, nous utilisons la formule suivante (Hamayon, 2008):

$$L_r = 10 \log (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n}) \quad (I.13)$$

$$L_r = \sum 10^{0,1L} \quad (I.14)$$

L_r : le niveau sonore résultant au point de réception en provenance des sources sonores

L : le niveau sonore de chacune des sources quand elle fonctionne seule (dB)

Application

Soit quatre sources sonores qui fonctionnent simultanément dont les niveaux sonores sont les suivants:

$L_1 = 40$ dB

$L_2 = 40$ dB

$L_3 = 37$ dB

$L_4 = 47$ dB

Le niveau sonore résultant est égal à:

$$L_r = 10 \log (10^4 + 10^4 + 10^{3,5} + 10^{4,7})$$

$$L_r = 47,38 \text{ dB}$$

12.2. Soustraction de deux niveaux sonores

Pour soustraire deux niveaux sonores, nous utilisons la formule suivante (Hamayon, 2008):

$$L_r = 10 \log (10^{0,1L_1} - 10^{0,1L_2}) \quad (I.15)$$

L_r : le niveau sonore résultant (dB)

L_1 : le niveau sonore provenant de l'une des sources (dB)

L_2 : le niveau sonore provenant de l'autre source (dB)

Pour soustraire deux niveaux sonores, il convient en premier lieu de calculer leur différence, puis, d'utiliser le tableau ci-dessous (Tableau I. 3) ou l'abaque (Figure I.30)

Différence entre les deux niveaux	Nombre de décibels à ajouter au niveau plus élevé
0.5	9.6
1	6.9
1.5	5.3
2	4.3
2.5	3.6
3	3
3.5	2.6
4	2.2
4.5	2
5	1.7
5.5	1.4
6	1.3
6.5	1.1
7	1
7.5	0.9
8	0.7
8.5	
9	0.6
9.5	0.5
10	
10.5	0.4
11	
11.5	0.3
12	
12.5	
13	0.2
13.5	
14	
14.5	
15	0.1
15.5	
16	

Tableau I.3 : La soustraction de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008)

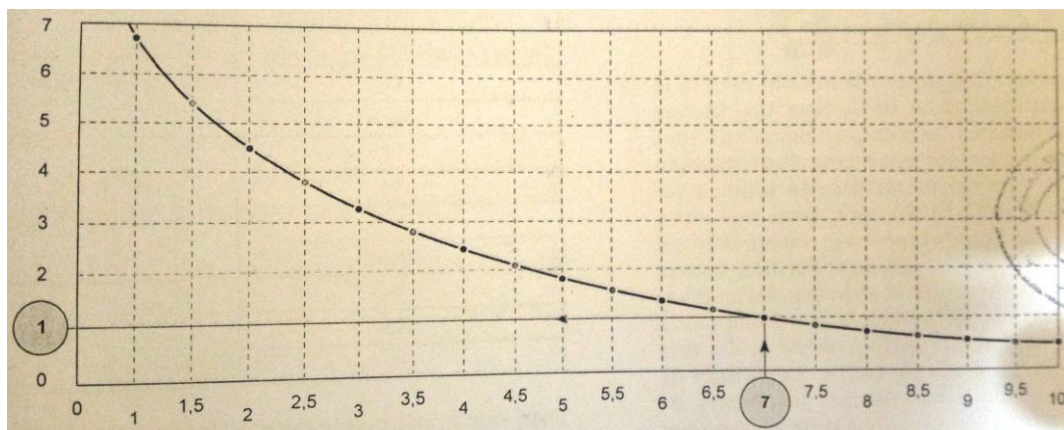


Figure I. 30 : La soustraction de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008)

13. La physiologie de l'acoustique

13.1. La physiologie de l'oreille humaine

L'oreille humaine comporte trois parties assurant chacune une fonction précise: externe, moyenne et interne (Figure I.31).

13.1.1. L'oreille externe

L'oreille externe a pour but de capter les ondes sonores. Elle se compose des éléments suivants:

1. Le pavillon
2. Le conduit auditif externe
3. Le tympan

13.1.2. L'oreille moyenne

L'oreille moyenne est composée d'une chambre creusée dans un os (le rocher), une chaîne des osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier) et la trompe d'Eustache (Sherwood, 2012).

13.1.3. L'oreille interne

L'oreille externe est composée de l'organe vestibulaire et la cochlée. Le premier, représente l'organe de l'équilibre. La cochlée, quant à elle, constitue l'organe de l'audition. Ayant une forme d'escargot, elle est remplie d'endolymphe. Elle englobe également un grand nombre de cellules ciliées, stimulées par le mouvement de l'endolymphe. Le nerf cochléaire transmet les informations au cerveau qui interprète le message sonore (Sherwood, 2012). Les sons sont captés par l'oreille externe qui se compose du pavillon auriculaire, un canal auditif externe. Le son traverse le canal auditif externe pour arriver à l'oreille moyenne. Il arrive au tympan. Ce dernier est une membrane circulaire flexible qui commence à vibrer une fois l'onde sonore l'atteinte (comme une membrane de microphone). Les ondes sonores sont véhiculées jusqu'à l'oreille moyenne par le mouvement du tympan (Bagot, 1999). L'oreille moyenne se compose d'une chaîne ossiculaire (le marteau, l'enclume et l'étrier), le marteau est soudé sur le tympan. Cette chaîne relie le tympan à l'entrée de l'oreille interne (la fenêtre ovale). Elle joue le rôle d'un amplificateur (50 à 60 fois) (sans elle, très grande partie de l'énergie acoustique est perdue) et d'un adaptateur d'impédance entre le milieu aérien du conduit auditif externe et le milieu liquidien de

la cochlée en optimisant le transfert d'énergie sonore (Bagot, 1999). Dans l'oreille interne, on trouve la cochlée (qui ressemble à une coquille d'escargot). C'est l'organe principal de la perception auditive qui contient entre 15 et 20 mille cellules ciliées qui détectent les vibrations du liquide en générant l'influx nerveux qui est acheminé vers le cerveau par le nerf auditif (Figure I.32).

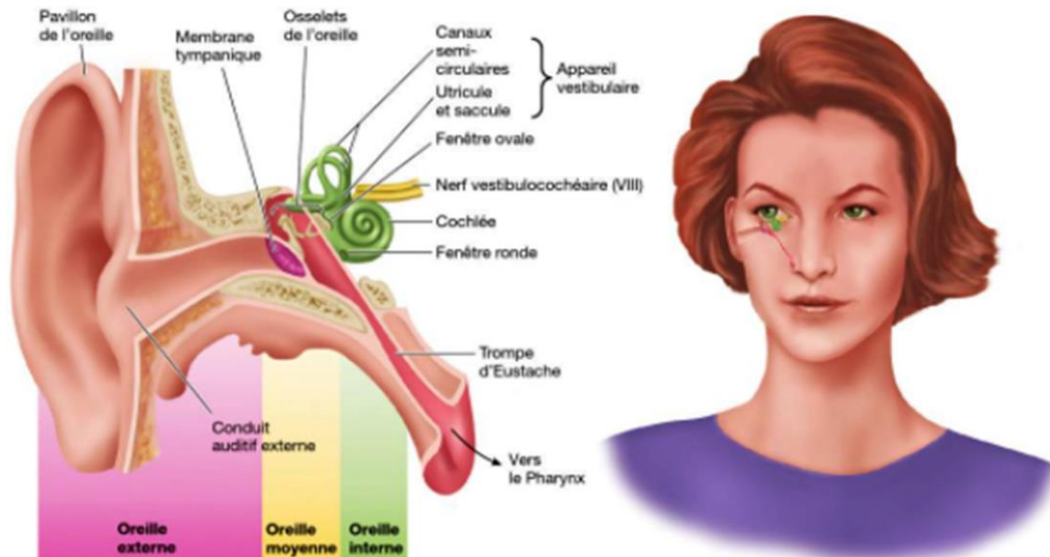


Figure I.31 : La physiologie de l'oreille humaine (Sherwood, 2012)

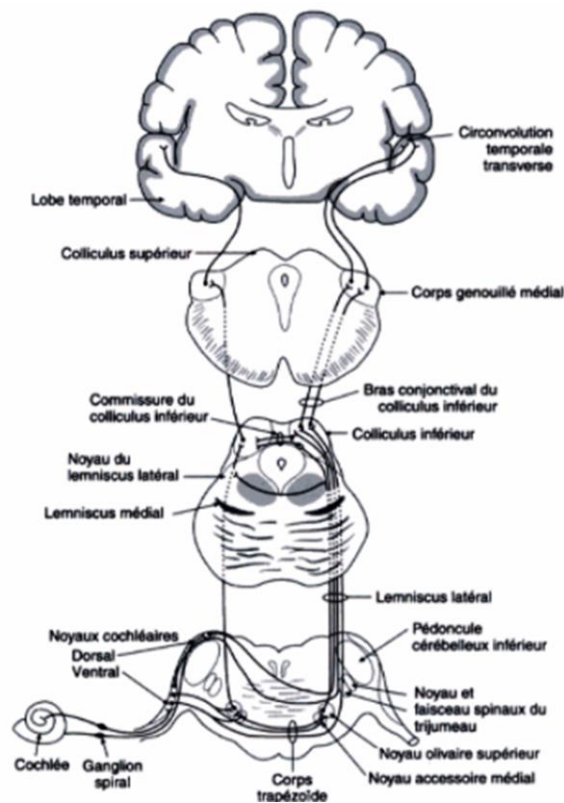


Figure I.32 : Schéma représentatif de la voie auditive (Pritchard *et al*, 2002)

13.2. La sensation auditive

13.2.1. Courbe d'audibilité et courbes isosoniques

Comme il a été mentionné avant, les fréquences audibles se situent entre 20Hz et 20000 Hz. Aussi, la hauteur du son dépend de sa fréquence, il est aigu lorsque sa fréquence est élevée. Par contre, il est grave lorsque sa fréquence est basse. Les infrasons et les ultrasons ne sont pas audibles par l'être humain. Par conséquent, si l'oreille humaine est sensible aux fréquences graves, elle est également sensible aux fréquences médiums et aux fréquences aigues. Il est confirmé que le champ auditif varie d'une personne à une autre selon l'âge, l'état de santé etc. Ce champ commence par le seuil d'audibilité (la limite inférieure de l'audition) de 0dB⁵ jusqu'au seuil de douleur (bruit fort) de 130dB. La zone comprise entre les deux courbes représente la zone de l'audition humaine moyenne (Figure I. 33). S'agissant des points situés sur les deux courbes, ils représentent les sons à la limite de l'audibilité. Tous les points situés hors des deux courbes, représentent les sons inaudibles.

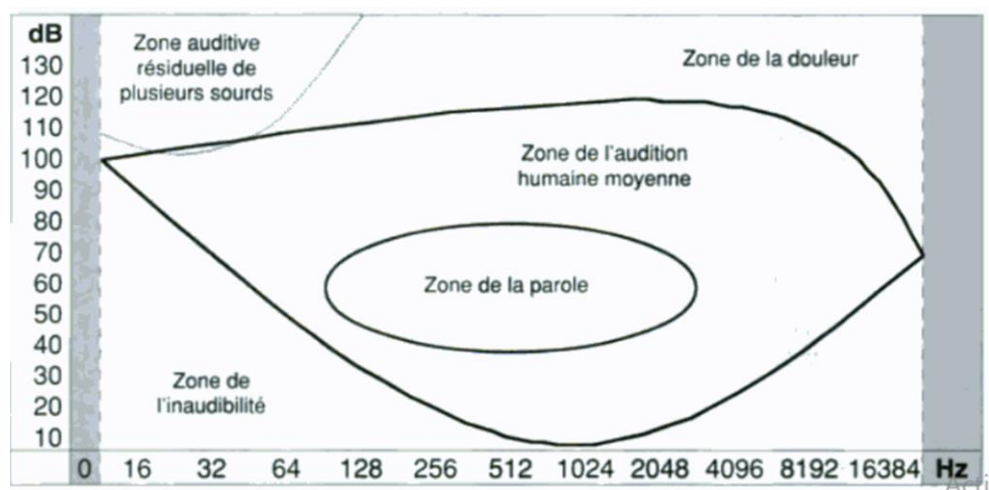


Figure I.33: L'audiogramme⁶ humain (Munot et al, 2002)

Les fréquences audibles se situent entre 500 et 5000Hz. Des courbes isosoniques ont été établies par Fletcher et Munson en 1930 (Figure I.34). Elles ont pour but de représenter les niveaux d'égale sensation de l'oreille humaine en fonction de la fréquence (Margollé et al, 2016). Le phone est l'unité utilisée pour caractériser le niveau d'isotonie d'un son. En ordonnées, s'indique le niveau sonore de la source.

⁵ La valeur 0db ne dit pas qu'il y a une absence totale de bruit.

⁶ L'audiogramme est un graphique qui nous informe sur la capacité auditive d'une personne. Ce graphique est le résultat d'un test auditif fait par un spécialiste pour savoir si le patient souffre ou pas d'une déficience auditive.

En abscisses, s'indique la fréquence du son émis par la source. Quant aux lignes bleues (courbes de même sensation auditive), elles représentent le niveau sonore perçu par l'oreille. Un son de fréquence 1000 Hz et 50 dB de niveau d'intensité, paraît aussi fort qu'un son de fréquence 300 Hz et de niveau d'intensité 58 dB.

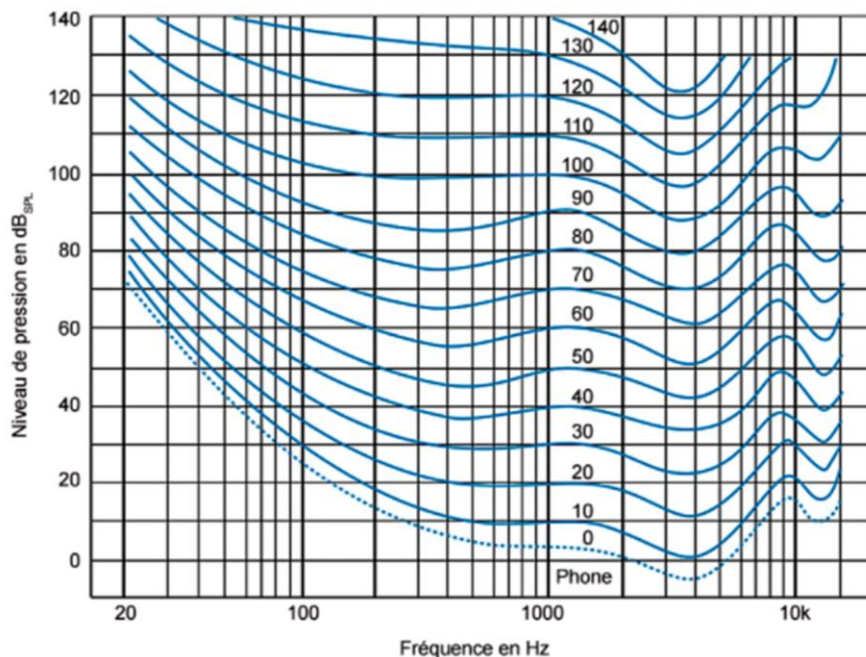


Figure I.34 : Les courbes isosoniques (Margollé et al, 2016)

Application

1. A quel niveau sonore sera perçu un son de fréquence 100 Hz émis à 50 dB?
On va tracer un trait vertical sur la fréquence de 100 Hz, puis on va tracer un trait horizontal sur le niveau sonore de 70 dB. L'intersection entre les deux traits donne le niveau sonore perçu par l'oreille qui est d'environ 62 dB.
2. Une source sonore émet un son ayant une fréquence de 100 Hz. Quel doit être le niveau sonore pour que l'oreille puisse le détecter ?
On va tracer un trait vertical correspondant à la fréquence 100 Hz puis réaliser l'intersection entre ce trait et la courbe de niveau 0 dB (Le seuil d'audibilité). La valeur projetée sur l'axe des coordonnées nous donne un niveau sonore de la source de 25 dB.

13.2.2. Le décibel pondéré

Nous avons vu dans ce qui précède, que l'oreille humaine ne perçoit pas les fréquences de la même manière. Aussi, deux sons ayant le même niveau sonore en dB peuvent offrir deux sensations différentes (Fischetti, 2003). Si on prend deux sons : S_1 et S_2 dont le niveau sonore est le même. Leurs répartitions fréquentielles sont montrées dans le tableau ci-dessous (Tableau I.4).

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000
Son 01	65	60	65	80	70	85
Son 02	85	70	80	65	65	60

Tableau I.4 : Répartition fréquentielle de deux sons ayant le même niveau en décibel (Fischetti, 2003)

En mesurant le niveau global de deux sons en dB, on trouve la même valeur. Par contre, la sensation auditive pourrait être différente du fait que l'énergie du son 01 est concentrée sur les hautes fréquences tandis que celle du son 02 est concentrée sur les basses fréquences. Ainsi, le son 02 pourrait être perçu avec un taux plus faible que celui du son 01. Par conséquent, le décibel est inapproprié pour traduire la sensation subjective (Fischetti, 2003). Le décibel pondéré a pour objectif de compenser les variations de perception auditive selon la fréquence pour le même niveau sonore en dB. Il y a trois courbes pondérations A, B et C (Figure I.35).

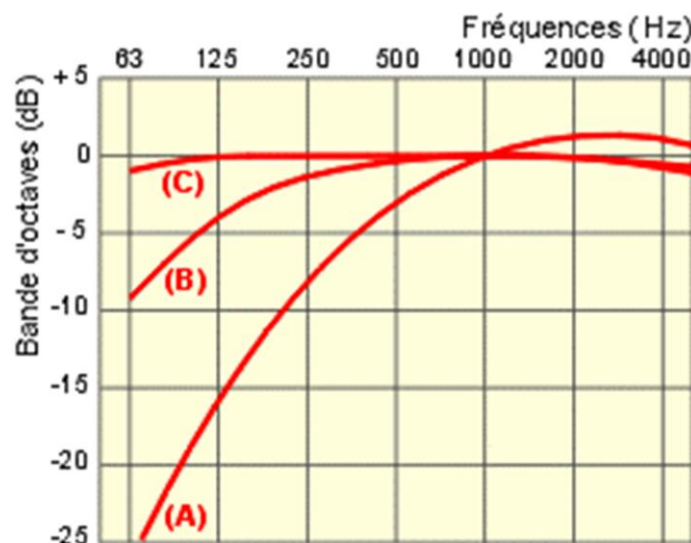


Figure I.35 : Les courbes de pondération (energieplus-lesite.be)

La courbe de pondération A correspond aux niveaux sonores inférieurs à 55 dB dont le niveau mesuré s'exprime en dB(A). La courbe de pondération B correspond aux niveaux sonores compris entre 55 dB et 85 dB dont le niveau mesuré s'exprime en dB(B). La courbe de pondération C, quant à elle, est pour les niveaux supérieurs à 85 dB. Le niveau sonore mesuré s'exprime en dB (C) (Hamayon, 2008).

La pondération A est la plus utilisée du fait qu'elle correspond aux niveaux sonores les plus fréquents dans la vie quotidienne. Par contre, les pondérations B et C sont utilisées pour les niveaux forts (milieu industriel et autres). Dans le domaine du bâtiment, on utilise la courbe de pondération A (Tableau I. 5) du fait que l'amplitude des niveaux de pressions transmis est généralement faible.

Fréquences (Hz)	Pondération (dB)
63	-26.2
125	-16.1
250	-8.6
500	-3.2
1000	0
2000	+1.2
4000	+1
8000	-1.1

Tableau I.5 : Les valeurs de la pondération A (Hamayon, 2008)

Pour calculer le niveau pondéré, on calcule la valeur de pondération A de chaque bande puis, on fait l'addition des niveaux dans chaque bande. Si on prend le même exemple en dessus, on aura le résultat mentionné dans le tableau ci-dessous (Tableau I.6). Après le calcul du niveau global (addition des niveaux pour chaque son), on obtient 87 dB pour le son 01 et 78.4 dB pour le son 02.

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000
Son 01 (dB)	65	60	65	80	70	85
Son 01 (dBA)	49.5	51.5	62	80	71	86
Son 02 (dB)	85	70	80	65	65	60
Son 02 (dBA)	69.5	61.5	77	65	66	61

Tableau I.6 : Les valeurs pondérées pour chaque bande (Fischetti, 2003)

13.2.3. Le niveau équivalent

Dans le cas de l'évaluation d'une nuisance sonore, il ne suffit pas de mesurer le niveau à un instant donné du fait que le bruit est fluctuant au cours du temps (Fischetti, 2003). Partant, on effectue une moyenne pendant une certaine durée T. On appelle cette moyenne « niveau de bruit équivalent ». La durée peut être une heure, une journée, une soirée, ou une nuit.

14. Le bruit

14.1. Définition

Le bruit est un son ou un ensemble de sons gênants. C'est un signal nuisible pour l'être humain, en gênant son activité normale. Le bruit est un mélange de sons, de plusieurs fréquences, de plusieurs niveaux.

La nuisance de bruit pourrait être l'origine de quelques problèmes qui sont:

1. La surdité: si son niveau dépasse la valeur critique.
2. La réduction du rendement du travail
3. Le bruit peut être simplement ennuyeux et provoquant ainsi la perte du sommeil, les crises nerveuses et, le stress.

14.2. Acouphène et hyperacousie

L'acouphène est une sensation auditive anormale que seule la personne atteinte perçoit. Autrement dit, la personne ayant le symptôme d'acouphène entend occasionnellement ou continuellement des sifflements sans stimulation sonore extérieure (Sarzod, 2015 ; Larousse 2010).

L'hypoacousie est un trouble qui affecte l'audition. Dans ce cas, La personne atteinte devient hypersensible aux sons qui sont habituellement tolérés chez la personne non atteinte. En d'autres termes, le seuil de tolérance au bruit de cette personne atteinte est plus faible (Larousse, 2010).

14.3. Le bruit de fond

Le bruit de fond désigne les signaux parasites existant pendant une période. C'est une multitude de fréquence qui va s'ajouter à un signal sonore. Ça peut être généré par le vent, les conversations, les machines ou les équipements, la circulation, les sons provenant des couloirs, des autres pièces etc...

14.4. Le bruit ambiant

Le bruit ambiant est défini comme étant l'ensemble des bruits environnants. Au moment où il y a une source sonore particulière, le bruit ambiant englobe le bruit émis par cette source et les autres bruits résiduels. Bref, il désigne l'ensemble des bruits émis par toutes les sources proches ou lointaines.

14.5. Le bruit résiduel

Le bruit résiduel est le niveau sonore en l'absence de bruit particulier généré par exemple par une machine.

14.6. Le bruit émergence

L'émergence est la différence entre le bruit ambiant (contenant le bruit particulier) et le bruit résiduel composé de bruits habituels extérieurs ou intérieurs (Croguennoc et al, 2011).

14.7. Courbes d'évaluation du bruit

14.7.1. Courbes NR

Définies par la norme NF S 30-010, les courbes NR sont des courbes qui représentent une impression auditive égale. Le numéro de chaque courbe correspondant à son niveau à 1000Hz (Hamayon, 2008). Pour le respect de la courbe NR, il faut que le niveau de bruit mesuré pour chaque fréquence se situe en dessous de la courbe de référence. En d'autres termes, pour avoir un confort acoustique, on doit imposer un niveau de bruit maximal à ne pas dépasser. Si un indice d'évaluation NR20 est imposé pour un local, l'ensemble des bruits ne dépassent pas la courbe NR40 (Hamayon, 2008). Le niveau NR est défini par la courbe NR la plus élevée atteinte par le spectre. Dans le domaine de l'acoustique architecturale, les courbes NR sont utilisées pour définir les niveaux admissibles en fonction de l'usage de l'espace (Migeot, et al, 2016). La courbe NR 50 donne pour chaque fréquence les niveaux maximaux de pression acoustique à respecter en dB (Figure I.36). Les conditions d'écoute normale de la vie quotidienne se situent entre 35 et 40.

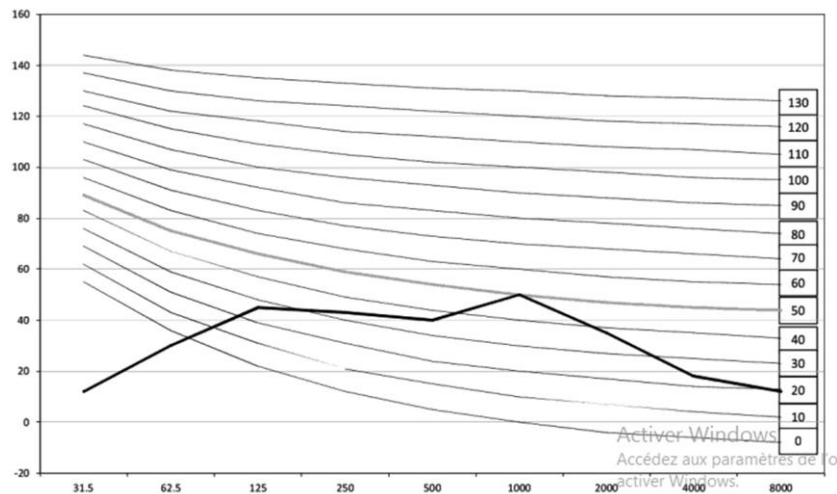


Figure I. 36 : Les courbes de NR50 (Migeot et al, 2016)

Les courbes NR sont utilisées comme suit : on trace le spectre du bruit par bandes d'octave sur le réseau de courbes NR. Puis, on prend l'indice de la courbe NR du rang le plus élevé atteint par le spectre. Ensuite, on verra sur quelles fréquences, il faudra porter de l'attention afin de diminuer la gêne. Il existe d'autres courbes d'évaluation du bruit comme les courbes ISO et NC. NC est utilisé aux États-Unis.

15. Le sonomètre : la mesure de bruit

Le sonomètre est un appareil de mesure de la pression acoustique (Figure I. 37). Il se compose d'un microphone qui réagit à la pression acoustique, un préamplificateur des filtres, un amplificateur et un galvanomètre. Aujourd'hui, les sonomètres sont plus développés. Cet appareil permet de mesurer le niveau de la pression global en linéaire, le niveau de pression non pondéré par octave, le niveau de pression global pondéré, le niveau de pression pondéré par octave et le temps de réverbération (Desmons, 2003).



Figure I.37 : Le sonomètre (decibelmetre.info)

Conclusion

Ce chapitre, résume l'essentiel des notions liées à la physique de l'acoustique, en concédant à l'étudiant les éléments de compréhension. L'objectif est d'initier l'étudiant aux notions clé qui lui permettent d'entamer aisément le domaine de l'acoustique architecturale. Une partie est consacrée à la physiologie de l'acoustique, en faisant un zoom sur le système auditif humain ainsi que la perception du son. Plusieurs concepts ont été définis, mais la liste n'est pas exhaustive, vu la complexité du domaine de l'acoustique.

Chapitre II :
L'acoustique architecturale

Introduction

Ayant précédemment expliqué quelques notions fondamentales de la physique et de la physiologie de l'acoustique, le présent chapitre se centre sur l'acoustique architecturale. L'objectif est de mettre en exergue, et l'importance de l'environnement sonore dans l'espace architectural et, la nécessité d'approfondir les connaissances sur le comportement du son dans une salle. Et ce, en guise de promouvoir et enrichir la conception architecturale, soit de se protéger des bruits nocifs. Dans une première phase, nous allons présenter le comportement d'une onde sonore dans une salle, ainsi que les éléments architecturaux qui influent l'environnement sonore. La seconde, éclaircira quelques phénomènes acoustiques tels que la réverbération, l'écho etc. La troisième phase, quant à elle, porte sur l'aspect subjectif de l'acoustique architecturale. En dernier, nous relaterons la propagation du son en champ libre et la proposition de quelques solutions architecturales et urbaines pour se protéger contre le bruit extérieur.

1. L'acoustique architecturale

L'acoustique architecturale est le domaine d'étude des sons dans les bâtiments (espace fermés et ouverts). Elle s'intéresse aux bruits dans l'espace architectural et les solutions proposées contre les nuisances sonores. Elle s'intéresse également à la perception des sons par les usagers de l'espace (Val, 2008).

2. Le comportement du son dans un espace clos

2.1. Le son direct, le son réverbéré et la réponse impulsionnelle

Dans un espace clos, le son émis par une source sonore se propage dans toutes les directions. On appelle le son direct, le son qui atteint directement le point de réception (Figure II.1). Il dépend uniquement des caractéristiques de la source comme la puissance et la directivité. Les caractéristiques de l'espace n'interviennent pas. Le son réverbéré représente, quant à lui, les ondes sonores réfléchies par les parois (Figure II.1). Les premières réflexions arrivant au récepteur (dans les 100 premières millisecondes suivant le son direct) s'appellent les réflexions précoces.

S'agissant de la réponse impulsionnelle, elle est la signature acoustique d'une salle. La pression recueillie en un point donné la réponse impulsionnelle (Feschetti, 2003). Cette dernière dépend des positions de la source et de récepteur, elle nous informe sur la manière dont la salle modifie le son émis par une source sonore. On peut décomposer l'impulsion d'une salle en trois parties : le son direct, les réflexions précoces et le champ diffus (Figure II.2).

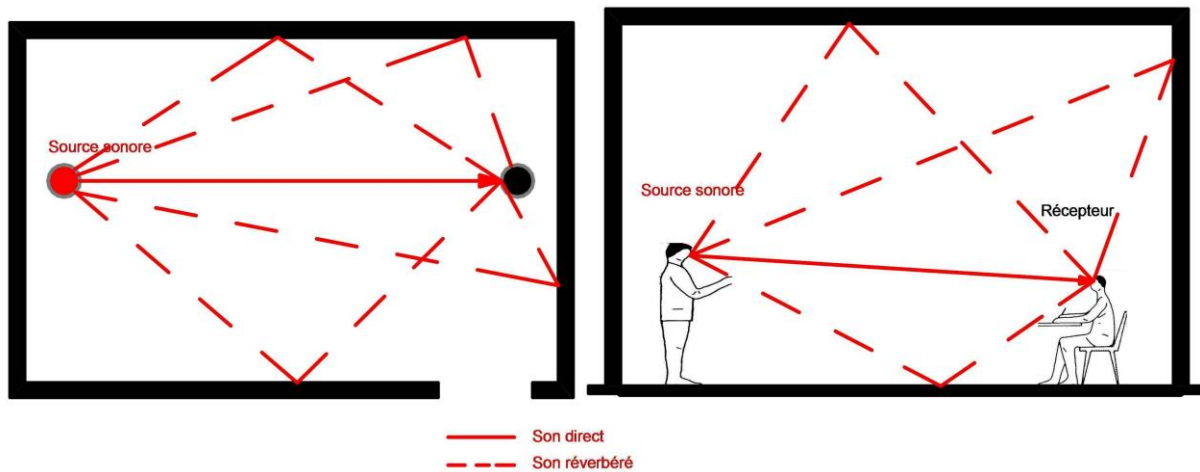


Figure II.1 : Le son direct et le son réverbéré (Auteur, 2020)

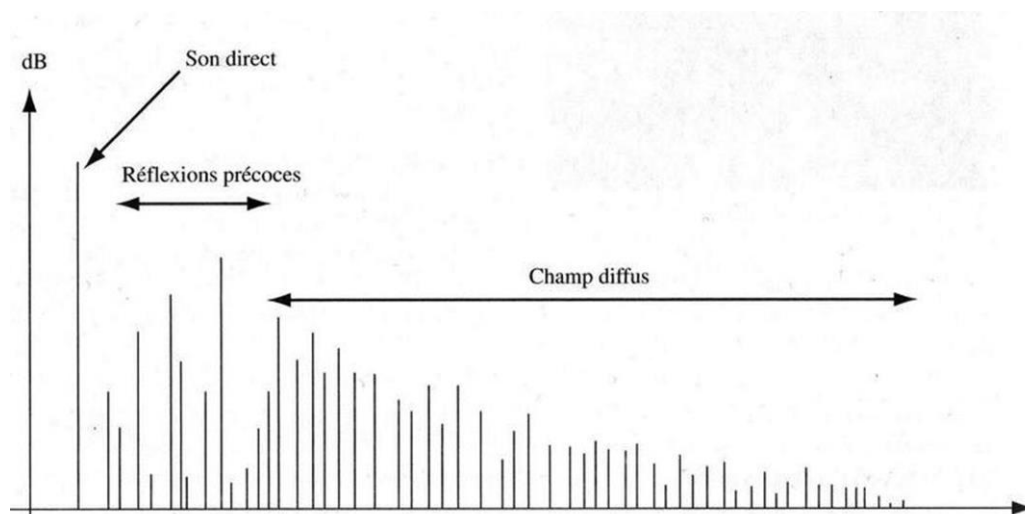


Figure II.2 : La réponse impulsionnelle d'une salle (Feschetti, 2003)

2.2. Le champ direct et le champ diffus

Dans une salle donnée, la source sonore rayonne dans toutes les directions. Le champ direct dépend de la salle, de la source et du récepteur, occupe l'espace qui se situe à une faible distance de la source sonore. Après l'arrivée du son direct au

récepteur, il reçoit le champ diffus¹. Ce dernier est homogène dans une salle dont l'intensité sonore est identique quel que soit la position. Le passage du champ direct au champ diffus s'effectue à la distance critique (Chagué, 2001) (Figure II.3). Le récepteur doit recevoir plus d'énergie sonore directe possible. Dans les points où l'énergie sonore directe n'est pas suffisante, on se doit de la renforcer par l'énergie sonore réfléchi (Tran, 1996).

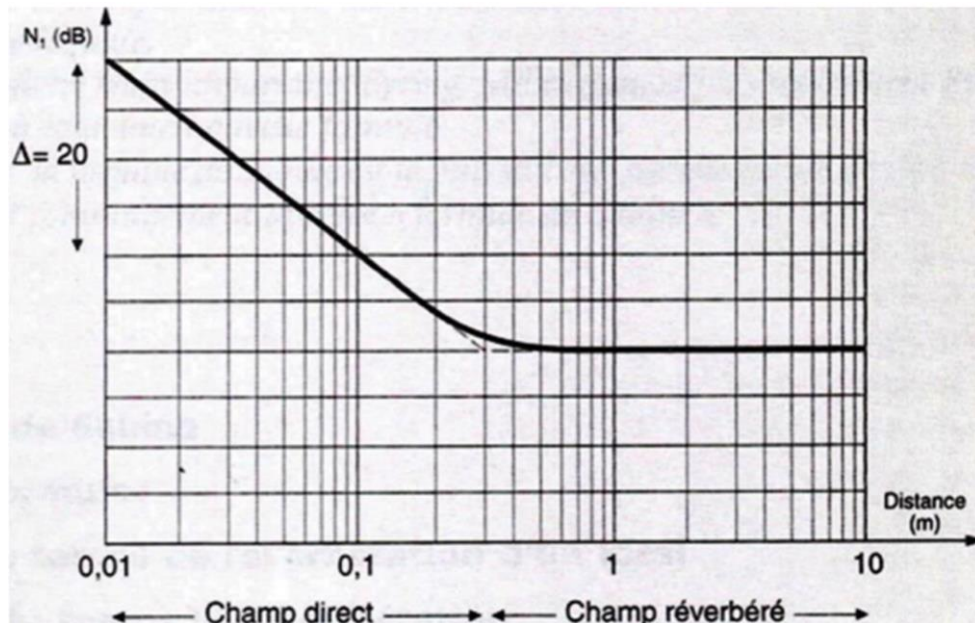


Figure II.3 : La répartition du champ direct et du champ réverbéré (Chagué, 2001)

A une distance quelconque x , le son direct est déterminé par la formule suivante (Fischetti, 2003) :

$$L_x = L_s - (20 \lg x + 11) \quad (\text{II.1})$$

L_x : le niveau sonore, en dB, à la distance où se trouve le récepteur

L_s : le niveau sonore de la source qui égale : $L_s = 10 \lg W / W_0$

Application

Une source sonore de puissance $W = 3.16 \times 10^{-4}$. Déterminez le niveau sonore à une distance de 9m.

Nous avons $W_0 = 10^{-12}$, $L_s = 10 \lg W / W_0 = 10 \lg 3.16 \times 10^{-4} / 10^{-12} = 85$ dB.

$L_x = L_s - (20 \lg x + 11) = 85 - (20 \lg 9 + 11) = 54.9$ dB

Si la propagation est directionnelle, le niveau sonore à une distance x est déterminé par la formule suivante (Fischetti, 2003) :

$$L_x = L_s - (20 \lg x + 11) + G \quad (II.2)$$

G est l'indice de directivité qui change selon la position de la source (Tableau II.1)

Situation de la source	G en dB
Dans l'air libre, ou bien au centre du local	0
Contre une paroi du local	3
Dans un angle du local	6
Dans un coin du local	9

Tableau II.1 : L'indice G selon la position de la source (Tran, 1996)

Application

Une source sonore située contre une paroi d'une salle de puissance $W=3.16 \times 10^{-4}$. Déterminez le niveau sonore à une distance de 9 m.

Nous avons $W_0=10^{-12}$, $L_s=10 \lg W / W_0 = 10 \lg 3.16 \times 10^{-4} / 10^{-12} = 85$ dB. $L_x = L_s - (20 \lg x + 11) + 3 = 85 - (20 \lg 9 + 11) + 3 = 57.9$ dB

Dans le cas d'une salle anéchoïque² (sourde), le champ direct est augmenté du fait que les parois sont absorbantes (Figure II.4). Par contre dans une salle réverbérante³ où il y a peu d'absorbants, le champ diffus augmente au moment où le champ direct diminue (Figure II.5).

² La salle anéchoïque ou la salle sourde est un espace d'expérimentation dont les parois (murs et plafond) sont entièrement absorbantes. D'où l'absence totale du champ diffus voire de la réverbération et du bruit de fond n'existe pas. Les parois sont tapissées de dièdres (cônes) pour augmenter la surface. Les matériaux utilisés sont absorbants comme la laine de roche, les mousses polymères ou les fibres de verre.

³ Par contre, la salle réverbérante est construite en matériaux qui n'absorbent aucun bruit. Une grande réverbération est enregistrée dans cet espace où le son est uniformément diffusé sur toutes les parois.



Figure II.4 : La salle anéchoïque (raykingtek.com)

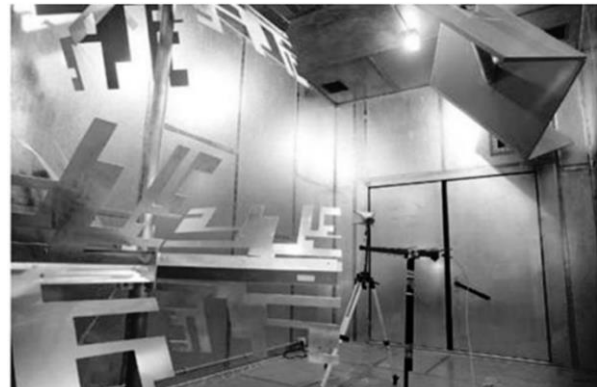


Figure II.5 : La salle réverbérante (Xu et al, 2019)

2.3. Quelques phénomènes sonores dans une salle

2.3.1. La réflexion spéculaire

La réflexion spéculaire est générée lorsque la longueur d'onde est petite par rapport aux dimensions de l'obstacle (paroi). Cette onde sonore se comporte comme une balle frappant le mur et, obéit, dans ce cas, aux lois de Descartes (Fischetti, 2003). L'angle d'incidence (i) est l'angle de l'onde incidente avec la perpendiculaire à la paroi. L'angle de réflexion (r), quant à lui, est l'angle de l'onde réfléchie avec cette même perpendiculaire (Figure II.6). L'angle de réflexion est égale l'angle d'incidence. Il est à noter que pour que l'onde sonore subisse une réflexion spéculaire, il faut que les dimensions de l'obstacle soient dix fois plus grandes de sa longueur d'onde (dont la fréquence est supérieure à 3400 Hz).

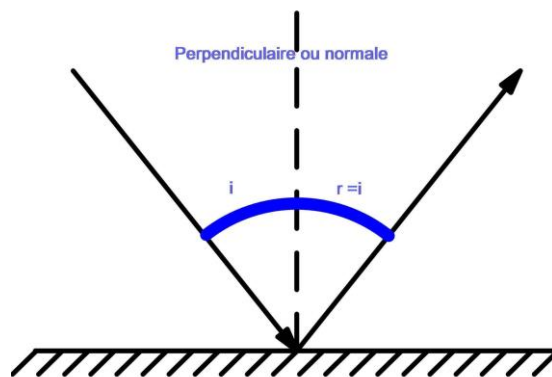


Figure II.6 : La réflexion spéculaire d'une onde sonore (Fischetti, 2003)

2.3.1.1. Les sources images

Dans la théorie de l'acoustique géométrique, la source image est le symétrique de la source sonore qui subit une réflexion spéculaire par rapport à l'obstacle (Fischetti, 2003). En d'autres termes, s'il y a une source sonore (S) placée contre une paroi et un auditeur qui se trouve au point M, on obtient la source image en dessinant le trajet de l'onde réfléchie qui part de la source (S) pour arriver à (M). On place la source image (S') puis, on trace la droite S'M. Le point (P) est l'endroit où se produit la réflexion (Figure II.7. a). Dans le cas où l'onde se réfléchit sur les deux parois, on place la source image (S') par rapport à la paroi (1). Ensuite, on place (S'') le symétrique de (S') par rapport à la paroi (2). Puis, on trace la droite S''M, cela permet de déterminer le point P : l'endroit de la réflexion de l'onde sur la paroi (2). On trace la droite S'P, on obtient Q ; l'emplacement de la réflexion sur la paroi (1). Enfin, on trace le rayon sonore qui va de S à Q, puis Q à P et enfin de P à M (Figure II.7.b).

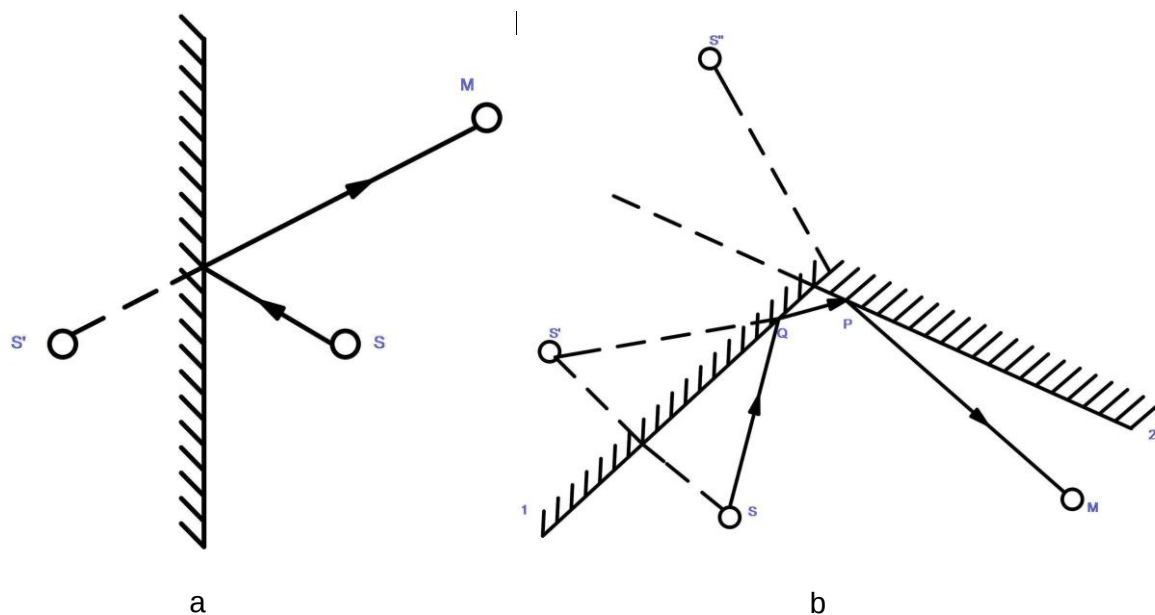


Figure II.7 : Tracé des sources images (Fuschitti, 2003)

2.3.1.2. Panneau réflecteur

Tel que submentionné, la réflexion spéculaire d'une onde sonore se produit si sa longueur d'onde est plus petite par rapport aux dimensions de l'obstacle. Dans le cas d'un son complexe qui bute sur une paroi, les harmoniques aigus y sont réfléchis, tandis que les harmoniques graves contournent la paroi.

2.3.2. La réflexion diffuse

La réflexion diffuse d'une onde sonore est la réflexion de l'onde incidente selon multiples directions (Figure II.8). La surface sur laquelle la réflexion diffuse se produit, s'appelle la surface diffuse (Fischetti, 2003). Dans un espace architectural, il est souhaitable d'avoir des réflexions diffuses, cela donne l'impression de baigner dans le son. Elle est générée par des éléments architecturaux dissymétriques et irréguliers (Figure II.9). Il existe plusieurs générateurs de réflexion diffuse, on peut citer à titre d'exemple, les panneaux diffuseurs (Figure II.10).

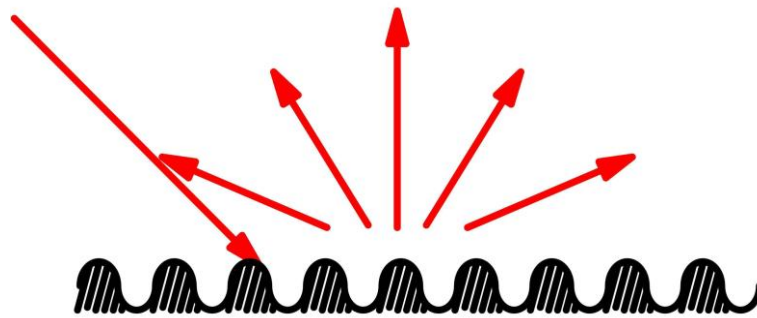


Figure II.8 : La réflexion diffuse (Fischetti, 2003)



Figure II.9 : La réflexion diffuse générée par les colonnades, les statues et les fioritures dans une salle de concert à l'italienne (opera-online.com)



Figure II.10 : Les panneaux diffuseurs de Schroeder (lairdubois.fr)

2.3.3. La diffraction

La diffraction est un phénomène qui se produit lorsque l'onde sonore frappe un obstacle pour le couronner (Fischetti, 2003), et lorsque la longueur d'onde est plus grande par rapport aux dimensions de l'obstacle (essentiellement pour les basses fréquences) (Figure II.11.a). L'onde sonore peut être diffractée en rencontrant une ouverture avec des dimensions très inférieures à la longueur d'onde (Figure II.11.b). Chaque point de l'ouverture est considéré comme une source sonore secondaire.

Si on a une source sonore (S) et un auditeur (A) placé derrière un pilier, l'auditeur entend plus les sons graves que les sons aigus qui sont réfléchis par le pilier (Figure II.11.c). Dans ce cas, les sons graves couronnent le pilier.

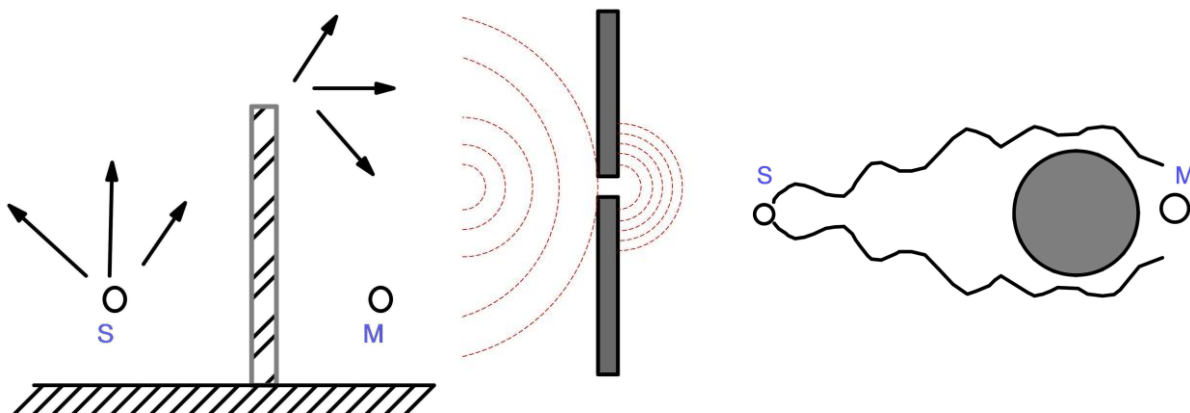


Figure II.11 : Quelques exemples de la diffraction d'une onde sonore ((Fischetti, 2003)

2.3.4. L'absorption

Lorsqu'une onde sonore frappe une paroi, une partie de l'énergie acoustique est absorbée. Ce phénomène est appelé l'absorption acoustique (Hamayon, 2006). La qualité acoustique d'un local dépend de la réverbération dont sa qualité désirée (selon l'usage de la salle) suit l'énergie absorbée (les matériaux absorbants). De plus, plus les parois d'une salle est absorbantes, plus la durée de réverbération est courte.

2.3.4.1. Absorption par matériau poreux

Le matériau poreux est une surface qui contient des petites cavités remplies d'air comme les tissus, la laine de verre, la peau humaine etc. (Fischetti, 2003). La porosité d'un matériau est le rapport du volume des vides d'un matériau au volume total (Hamayon, 2008). On distingue deux types de porosités : fermée et ouverte ou connectée (Degallaix, 2007 ; Schaer *et al*, 2019) (Figure II.12). Dans le domaine de l'acoustique, les matériaux à porosité ouverte (communication directe entre les pores) sont les absorbants. Dans ce cas, l'air est mis en mouvement par une onde sonore qui perd de l'énergie par les frottements des particules d'air sur le matériau, en transformant l'énergie acoustique en chaleur (Hamayon, 2008). Il est à mentionnée que les matériaux poreux sont plus importants aux fréquences aigues qu'aux fréquences basses.

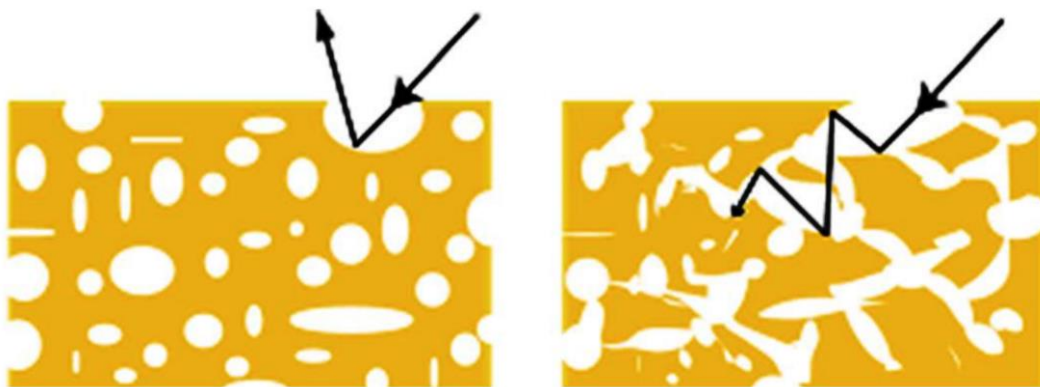


Figure II.12 : a) porosité fermée, b) porosité ouverte (Hamayon, 2008)

Dans les salles recevant un public, les personnes sont considérées comme des matériaux poreux (peau, cheveux, vêtements). Une personne assise sur un siège présente une surface de 1.3m x 0.3m (pour les deux faces, on multiplie la surface

fois deux). L'absorption est d'environ $A=0.5M^2$, le coefficient d'absorption α égal à 0.8 (à 500 Hz). On trouve une absorption de $A= S \alpha=0.6M^2$ (Hamayon, 2008).

2.3.4.2. Les panneaux acoustiques

Les panneaux acoustiques ou les diaphragmes sont des panneaux placés à une distance (d) d'un mur ou d'un plafond (Figure II.13). Le panneau et la masse d'air situé entre le mur et le panneau, forment une masse lourde qui oscille sur des basses fréquences qui seront par la suite absorbées (Fischetti, 2003).

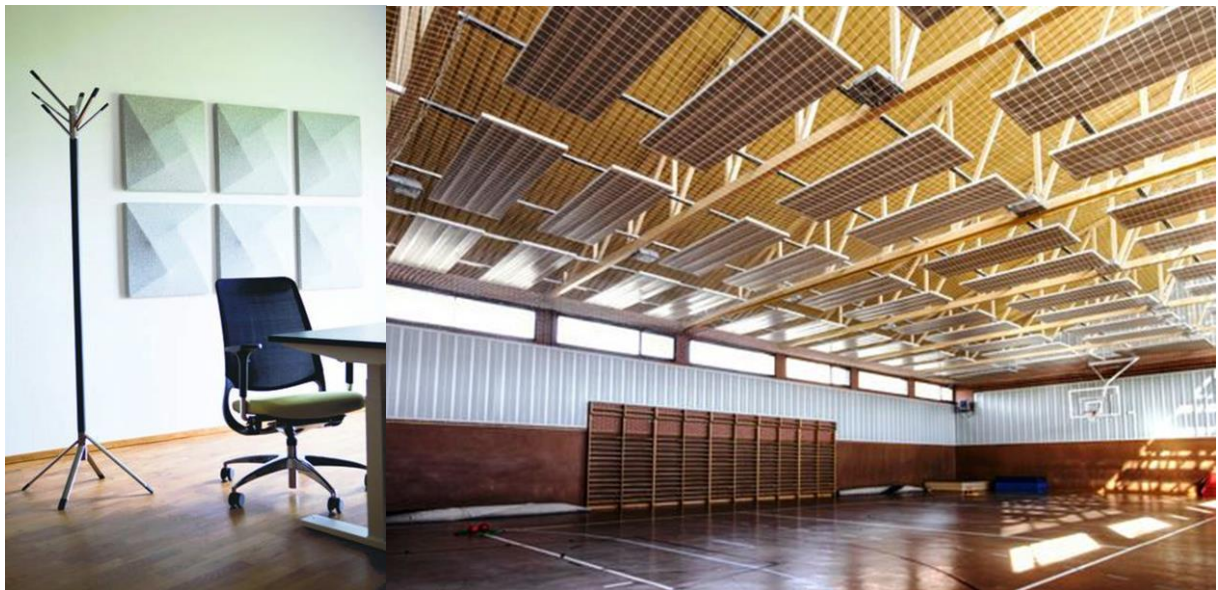


Figure II.13 : Les panneaux acoustiques absorbants (batiproduits.com)

2.3.4.3. L'absorption par résonateur

Le résonateur de Helmholtz, est un élément composé d'un goulot et une cavité. Ce résonateur a la forme d'une bouteille. Si on souffle sur le sommet de la bouteille, un son plus ou moins grave s'y produit, il correspond à la fréquence de résonance de la bouteille (Hamyon, 2008). Lorsque la pression acoustique agit sur l'entrée du résonateur (le col), l'air contenu dans le col se déplace et comprime la masse d'air contenue dans le résonateur. Cela crée une vibration. Si la fréquence du son est la même que celle du résonateur, une résonance se produit et la vitesse de l'air dans le col augmente. Dans les salles, les résonateurs de Helmholtz peuvent être des cavités dans les murs qui prennent des tailles différentes tels que les vases acoustiques (Figure II.14), la brique creuse et les panneaux acoustiques dotés de

trous. Les panneaux acoustiques avec des cavités sont performants. Le panneau absorbe les basses fréquences tandis que les cavités absorbent les fréquences dont les longueurs d'onde correspondent aux diamètres des trous (Fischetti, 2003).

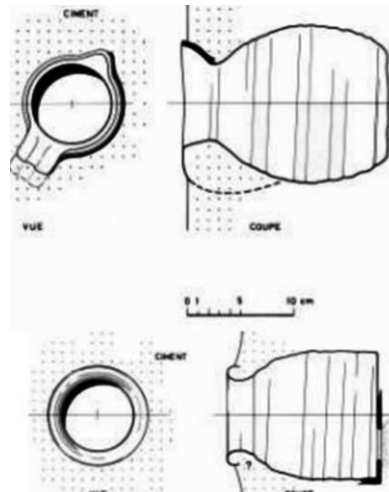


Figure II.14 : Les vases acoustiques (Desarnaulds, 2002)

2.3.5. La réfraction

La réfraction est un phénomène acoustique qui se produit dans les salles accueillant un public. Elle est produite par un changement de température ; le son va plus vite dans l'air chaud pour dévier du côté de la température la plus faible (Fischetti, 2003). L'air chaud est plus proche du public et l'onde sonore dévie vers le plafond (le son monte). Dans ce cas, les personnes situées au fond de la salle n'entendent pas parfaitement le son. L'un des moyens pour pallier à ce défaut est d'incurver le plancher (Figure III.15).

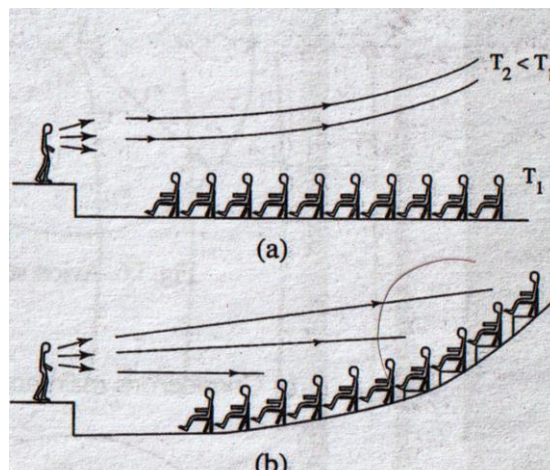


Figure III.15 : La réfraction sur le public (Fischetti, 2003)

2.4. La réverbération

La réverbération⁴ est un phénomène acoustique qui désigne la persistance d'un son dans une salle lorsque la source sonore a cessé d'émettre. Autrement dit, elle est un effet de propagation par lequel les sons perdurent après l'arrêt de l'émission (Augoyard *et al*, 1995). Sur le plan perceptuel, l'oreille n'arrive pas à différencier un son du précédent dans le cas de la réverbération. D'autres chercheurs voient que la réverbération existe si le son parvenant à l'auditeur après réflexion n'est pas distinct du son direct (le son semble prolongé) (Hamayon, 2008). Par contre, si le son réverbéré parvenant à l'auditeur est distinct du son direct, on aura un écho.

Nous avons trois phases dans le cas d'une réverbération d'une salle (Figure II. 16) : a) la phase d'établissement du son réverbéré (ce son augmente progressivement dans la salle), b) la phase stationnaire (le niveau réverbéré reste constant), c) la phase d'extinction (la diminution du son réverbéré jusqu'à devenir inaudible) (Fischetti, 2003).

2.5. Le temps de réverbération

Le temps de réverbération est noté TR ou RT60 correspond à la durée nécessaire à une diminution de 60 dB du niveau sonore après l'arrêt de la source (Figure II.17) (Chagué, 2001). Dans d'autres termes, c'est le temps que met le son pour que son intensité devienne le millionième de ce qu'elle était au départ (Hamayon, 2008).

$$L_{t-60} = 10 \lg I / I_0 - 10 \lg 10^6 = 10 \lg I / I_0 \cdot 10^6 \quad (II.3)$$

On peut également mesurer la décroissance du niveau sonore dans les 100 premières millisecondes puis, on déduit le temps correspond à une décroissance de 60 dB.

⁴ La réverbération est appelée aussi l'effet cathédrale

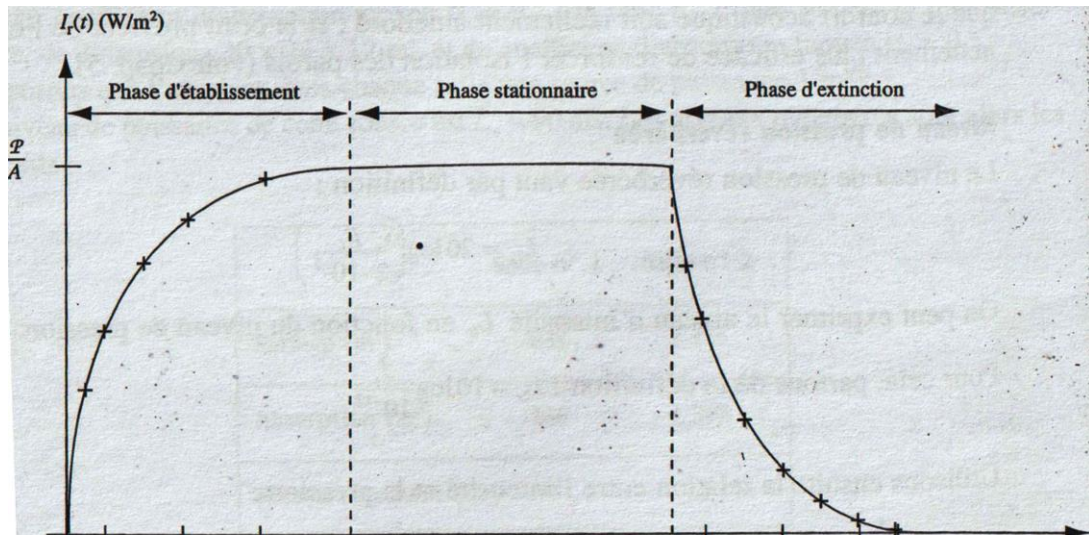


Figure II.16 : Les trois phases de la réverbération d'une salle (Fischetti, 2003)

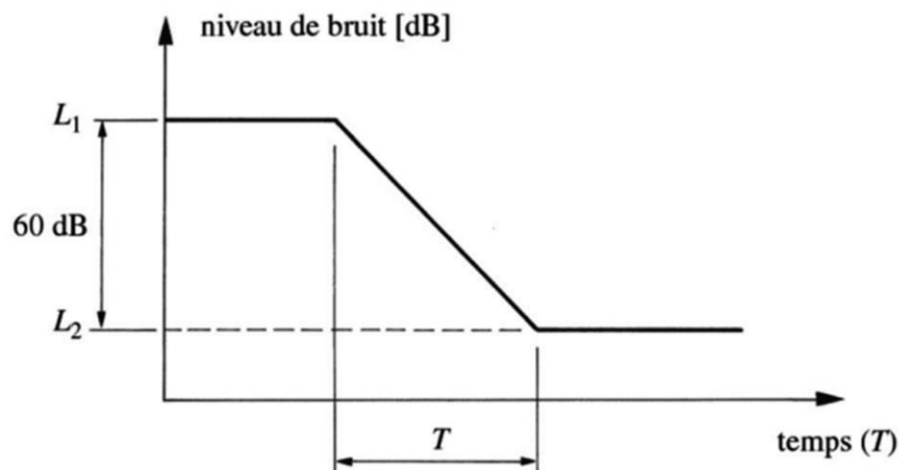


Figure II.17 : Le temps de réverbération (Navi, 2006)

2.5.1. La formule de Sabine

La formule de Sabine est utilisée pour calculer le temps de réverbération (TR) en fonction des caractéristiques de la salle. La théorie de Sabine considère que le son réverbéré est uniformément réparti dans la salle (Fischetti, 2003).

$$TR = 0.16V/A \quad (II.5)$$

V : le volume de la salle (m^3)

S : aire d'absorption équivalente (m^2) qui égale $\alpha \times S$

α : le coefficient d'absorption S surface correspondante du matériau.

Si la salle est construite par plusieurs matériaux $A_T = \sum \alpha S$ (Tableau II.2). Il est à noter que le coefficient d'absorption d'un matériau est caractérisé par le coefficient α qui est déterminé par la formule suivante (Roulet, 2012):

$$\alpha = W_{\text{absorbée}} / W_{\text{incidente}} \quad (\text{II.6})$$

L'énergie incidente est l'énergie qui tombe sur les surfaces des parois. Une partie de cette énergie est réfléchiée, une partie est absorbée, et une partie transmise plus loin (Figure II.18) (Roulet, 2012). Le coefficient α ($0 < \alpha < 1$) varie avec la fréquence de l'onde incidente (Figure II.19).

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000
m ² Matériau	Surfaces absorbantes					
15 Béton lisse (plafond)	0,15	0,15	0,15	0,30	0,30	0,30
25 Maçonnerie nue (mur)	0,75	0,75	0,75	0,75	1,00	1,25
9 Vitrages doubles(fenêtres fermées)	0,90	0,36	0,27	0,18	0,18	0,18
20 Enduit de plâtre (mur)	0,40	0,40	0,60	0,60	0,60	0,60
15 Tapis caoutchouc (sol)	0,75	0,75	1,50	1,50	1,50	1,50
2 Portes en bois	0,40	0,30	0,20	0,20	0,10	0,10
Surface absorbante totale A (m ²)	3,35	2,71	3,47	3,53	3,68	3,93
Temps de réverbération 0,163 V/A (s)	2,55	3,16	2,47	2,42	2,33	2,18

Tableau II. 2 : Calcul de la surface absorbante pour un bureau d'un volume $V=53 \text{ m}^3$ (Roulet, 2012)

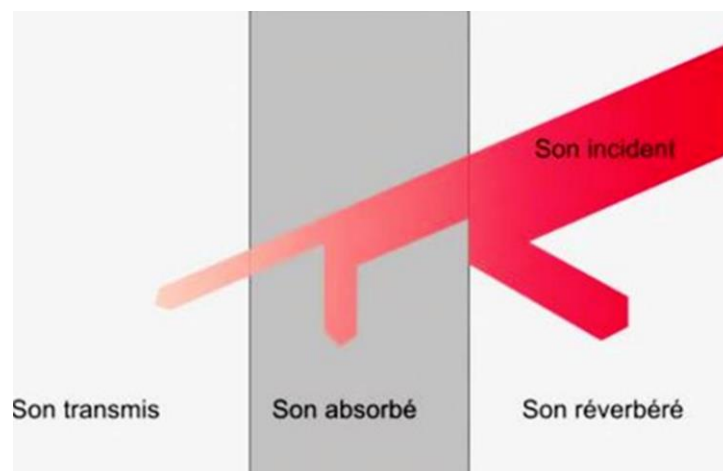


Figure II.18 : Le son réfléchi, absorbé et transmis (Roulet, 2012)

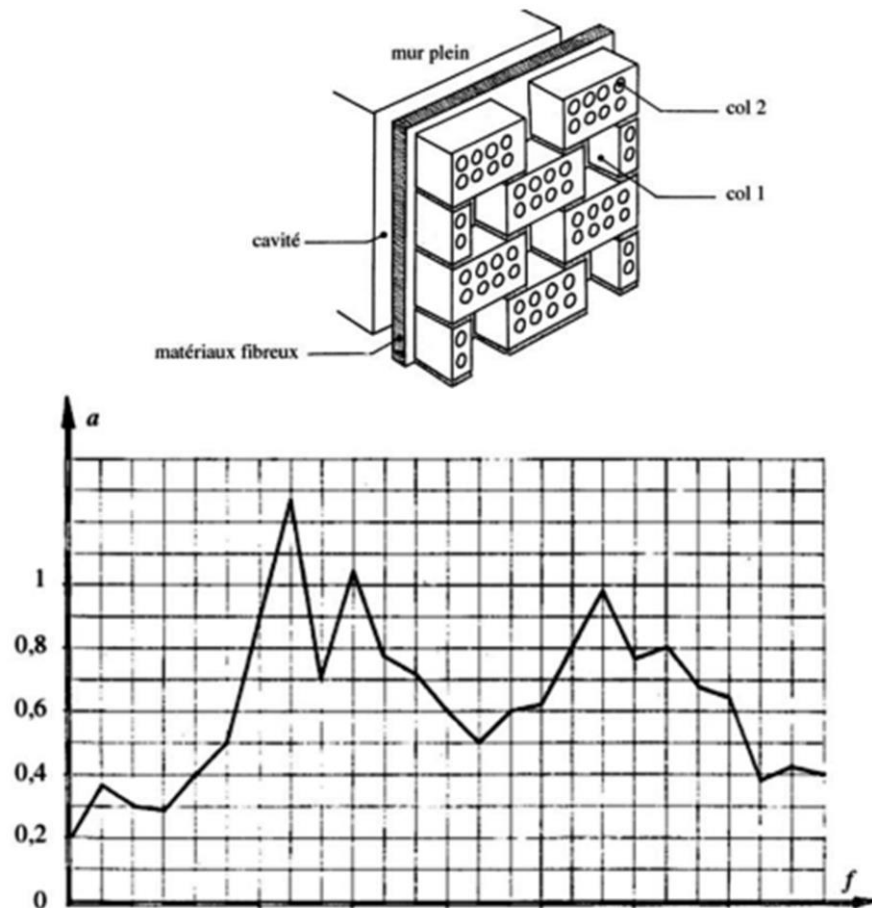


Figure II.19 : La variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence (Navé, 2006)

Le temps de réverbération trop long, comme le cas des cathédrales, permet de donner l'ampleur à la musique de l'orgue. Dans ce cas, l'intelligibilité de la parole est faible. Par contre, dans les salles de classe où l'intelligibilité de la parole est primordiale, le temps de réverbération est court (Figure II.20) (Roulet, 2012).

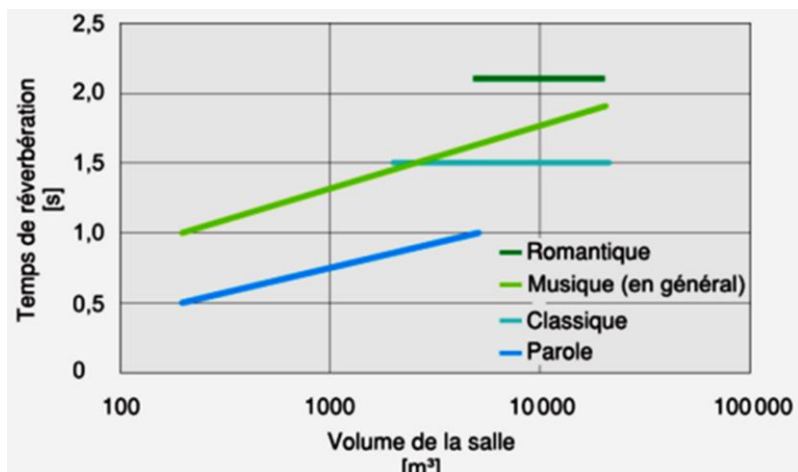


Figure II.20 : Le temps de réverbération pour diverses fonctions (Roulet, 2012)

Il est à noter que l'énergie réverbérée est non seulement absorbée par les parois, mais notamment dissipé dans l'air au cours de son parcours. Par conséquent, une autre absorption supplémentaire **A'** s'ajoute.

$$\begin{aligned} TR &= 0.16V / (A + A') \\ A' &= 0.1V/h (f/1000)^{1.7} \end{aligned} \quad (II.7)$$

V : Le volume de la salle

h : Le taux de l'humidité de l'air

f : La fréquence du son

L'effet de l'absorption par l'air se manifeste essentiellement au-delà de 1000Hz. Ainsi, la réverbération est plus élevée pour les basses fréquences que les hautes fréquences.

La formule de Sabine est la plus utilisée pour calculer le temps de réverbération mais, elle représente certaines imperfections qui sont (Feschetti, 2003) :

1. Dans une salle réverbérante, le coefficient d'absorption acoustique α est très faible, la valeur de l'aire d'absorption **A** tend vers une valeur nulle. Par conséquent, le temps de réverbération tend vers une grande valeur. Par contre, dans une salle très absorbante où le coefficient d'absorption acoustique α tend vers le 1, le temps de réverbération ne tend pas vers une valeur nulle, ce qui n'est pas logique.
2. La théorie de Sabine considère que le champ réverbéré est uniformément réparti dans la salle. Alors, cette théorie est plus valide pour une salle réfléchissante qu'une salle absorbante. Elle est également utilisée lorsque le coefficient d'absorption acoustique équivalent est inférieur à 0.2.
3. Dans une salle donnée, le temps de réverbération dépend de la position de l'auditeur. Si on prend deux positions différentes dans la salle, on perçoit différemment la réverbération. La théorie de Sabine ne prend pas en compte ce point. La sensation de réverbération est associée à l'énergie réverbérée précoce qui dépend, à son tour, de la position de la salle.
4. La théorie de Sabine ne prend pas en considération la position des matériaux absorbants dans les parois. Par contre, la salle est mieux absorbante lorsque les matériaux sont répartis en plusieurs surfaces.

2.5.2. La formule d'Eyring

Proposée par Eyring, la formule d'Eyring est une autre formule utilisée pour calculer le temps de réverbération. Cette formule est utilisée dans le cas où la salle est très absorbante. Comme il a été mentionné ci-dessus, la formule de Sabine considère que le champ réverbéré est uniformément répartie dans la salle (l'absorption doit être faible). Par contre, la formule d'Eyring considère que l'énergie réverbérée est absorbée de la même manière dans la salle (Feschetti, 2003).

$$TR_e = 0.16V/S \ln(1 - \alpha) \quad (II.8)$$

2.6. L'intelligibilité de la parole

L'intelligibilité de la parole la capacité une conversation d'être comprise par un auditeur. Prenons l'exemple d'une salle de classe où le professeur (la source sonore) explique le cours à ses élèves. Pour que le message soit clair et net et que les élèves entendent parfaitement leur professeur, quatre facteurs influent sur l'intelligibilité de la parole (Tran, 1996) : i) Le niveau sonore du son : l'intelligibilité de la parole augmente avec l'augmentation du niveau sonore de l'émetteur (la voix d'un professeur), ii) Le temps de réverbération : l'intelligibilité de la parole diminue avec l'augmentation du temps de réverbération de la salle, iii) Le rapport physique des bruits de fond sur celui des sons utiles : l'intelligibilité de la parole diminue avec l'augmentation du bruit de fond, iv) La forme architecturale de la salle :

2.7. L'écho

Dans une salle donnée, si le son réfléchi parvient à l'auditeur avec une intensité et un retard suffisant (1/10 s) pour être perçu comme étant distinct du son direct (et ne pas perçu comme prolongé comme le cas de la réverbération), on aura un écho (Hamayon, 2008). Autrement dit, si les deux sons (direct et réfléchi) arrivent l'un après l'autre avec un retard qui dépasse la valeur du « retard critique », les deux sons sont perçus comme deux sons séparés dont l'écho est le son réfléchi (Tran, 1996). Pour ne pas avoir l'écho dans une salle, ce retard doit être limité à 35 millisecondes.

2.8. La focalisation

Le phénomène de focalisation du son existe si l'énergie sonore réfléchissante se concentre en un point au détriment d'autres zones. Dans les salles avec des plafonds concaves, les ondes sonores se réfléchissent en un point qui s'appelle le foyer (Hamayon, 2008). Pour ne pas avoir ce phénomène, les surfaces concaves doivent être traitées par des matériaux absorbants et diffusants (Figure II.21).

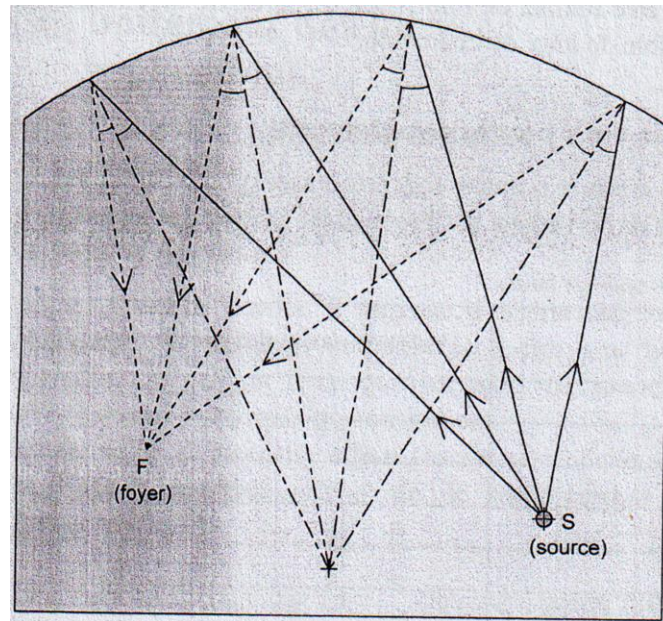


Figure II.21 : La focalisation du son due au toit de forme concave (Hamayon, 2008)

2.9. L'effet de masque

L'effet de masque est réduction de l'intensité d'un bruit par la présence un autre bruit (Hamayon, 2008). Dans une salle de classe, la présence d'un bruit fort à coté influe sur l'intelligibilité de la parole de l'enseignant. D'autre part, la musique est utilisée pour voir un effet de masque.

2.10. L'effet cocktail party

Dans une salle de fête remplie de personnes qui s'assissent côte à côte, le niveau sonore augmente. En conséquence, l'intelligibilité de la parole diminue, de ce fait, les personnes n'arrivent pas à s'entendre, ils augmentent leurs voix. Le niveau sonore inconfortable augmente, ce qui engendre un effet cocktail party (Hamayon, 2008).

3. L'aspect subjectif de la qualité acoustique d'une salle

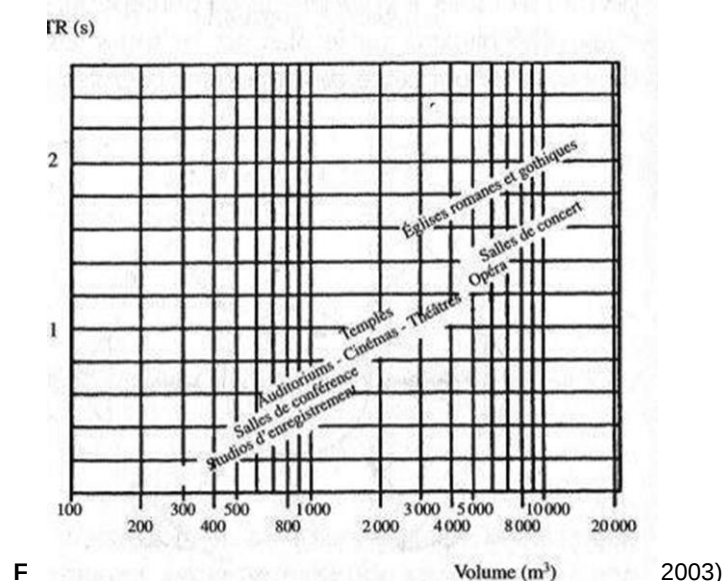
Après avoir abordé quelques grandeurs physiques objectives, nous allons voir d'autres grandeurs subjectives qui sont liées à l'utilisateur.

3.1. La sensation de la réverbération dans une salle

Nous avons deux temps de réverbération ; le premier physique TR60 qui se calcule (grandeur objective). Le deuxième, quant à lui, est subjectif du fait qu'il soit lié à la sensation de l'oreille.

3.1.1. TR optimal

On appelle TR optimal le temps de réverbération qui convient le mieux à un type de fonctionnalité sonore (musique, parole, chant etc.) et à un volume de la salle. L'évaluation subjective de cette grandeur se fait par des tests d'écoute effectués sur des échantillons d'auditeurs. Cette grandeur dépend de plusieurs critères qui sont : les goûts individuels, la culture et l'époque. Comme évoqué, la grande salle exige un temps de réverbération plus élevé qu'une petite salle (Figure II.22). De plus, dans les salles de musique, le TR varie selon le genre musical (le TR pour le jazz est faible par rapport à une pièce pour orgue). L'absorption des parois joue également un rôle déterminant dans la réverbération. Une petite salle réfléchissante peut avoir un temps de réverbération plus élevé qu'une grande salle absorbante (Fischetti, 2003).



3.1.2. Early Decay Time

Le temps de réverbération n'est pas le seul critère pour décrire la sensation de réverbération d'une salle. La réverbération précoce influe sur la sensation de la réverbération d'une salle. Elle joue un rôle important par rapport à la réverbération tardive (Fischetti, 2003). Le EDT est le temps mis par un le son réverbéré pour décroître de 10 dB après extinction de la source (Fischetti, 2003).

4. Comportement du son dans un champ libre

Dans un champ libre, l'onde sonore se propage librement sans aucun obstacle. Tel que cité dans le premier chapitre, l'onde sonore se propage sous forme d'ondes sphériques centrées sur un point en tant que source sonore ponctuelle (Hamayon, 2008). Le clocher, la voiture ou une éolienne sont des sources ponctuelles. Un bâtiment industriel géant un bruit est une source ponctuelle lorsque le point d'observation est situé à une distance supérieure à quatre fois la plus grande dimension du bâtiment (Hamayon, 2008).

Il est à rappeler que le niveau sonore ponctuel décroît de 6 dB chaque fois que la distance qui sépare la source sonore du point de mesure est doublée. Dans ce cas, le niveau sonore est déterminé par la formule suivante (Fischetti, 2003):

$$L_I = L_W - 10 \log 4 \pi r^2 \quad (II.9)$$

L_I : niveau d'intensité acoustique à une distance r (m) de la source sonore

L_W : niveau de puissance acoustique de la source sonore

Le doublement de la distance (le rayon de la sphère) permet à l'énergie acoustique de se propager sur une surface quatre fois plus grande (Figure II.23). Du coup, l'énergie passant par unité de surface est quatre fois plus petite qu'au début (Chagué, 2001 ; Hamayon, 2008). Dans le cas où la source sonore est située sur le sol, une partie de l'énergie est absorbée. Ainsi, l'énergie se répartit sur un hémisphère au lieu d'une sphère dont la surface est $4 \pi r^2$.

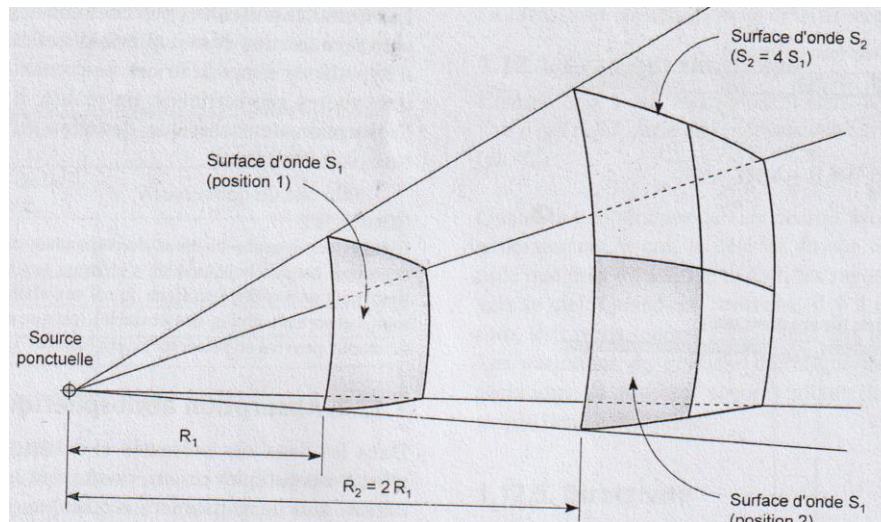


Figure II.23 : La propagation d'une onde sonore ponctuelle en champ libre (Hamayon, 2008)

Pour les sources linéaires, le son se propage selon des ondes sphériques centrées sur la source sonore linéaire qui se compose de plusieurs sources ponctuelles (Hamayon, 2008). A l'inverse des ondes ponctuelles, le niveau sonore décroît de 3dB chaque fois que la distance séparant la source et le point de mesure est doublée (Figure III.24).

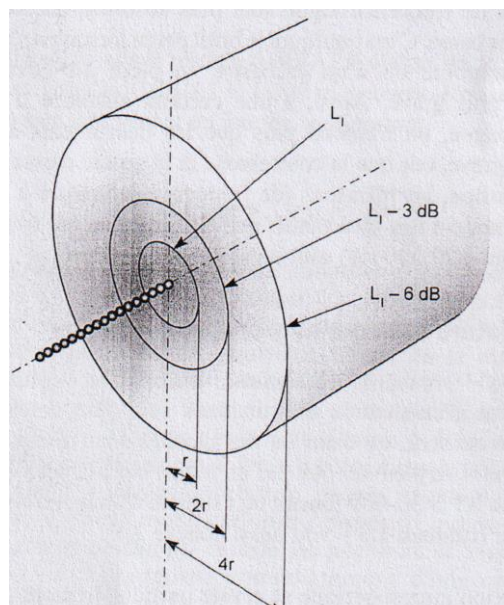


Figure II.24 : La propagation d'une onde sonore linéaire dans un champ libre (Hamayon, 2008)

Dans un champ libre, les fréquences aiguës sont plus absorbées que les fréquences basses. Par exemple, l'éloignement d'une autoroute ou d'un orchestre permet aux sons de devenir graves. Aussi, les ultrasons sont rapidement dispersés, alors que les infrasons se transmettent énergiquement (Hamayon, 2008). Deux autres paramètres influent sur la propagation du son, il s'agit de la température et du degré hygrométrique de l'air. La température de l'air augmente la célérité du son et permet la réfraction du son. Exemple, on perçoit mieux les sons quand il pleut que quand il fait beau temps.

Le vent influe également sur la propagation du son en champ libre, il le répond. Si l'onde sonore se propage dans le sens du vent, la vitesse du son devient plus importante en altitude qu'au niveau du sol, ce qui permet aux rayons sonores de s'incurver vers le sol. Par contre, si le son se propage dans le sens opposé du son, sa vitesse est moins importante et les rayons sonores s'incurvent vers le ciel (Hamayon, 2008).

5. Se protéger contre les bruits extérieurs

5.1. Choix de terrain et identification des sources sonores

Pour chaque emplacement du projet, il est indispensable d'identifier les sources sonores dans le site. Ceci permet le choix de la stratégie de protection mise en place. En effet, il faut avoir savoir si la source sonore est fixe (usine, chantier etc.), ou mouvante (bruit d'avion). La durée et le temps (jour, nuit, etc.) dans lesquels le bruit se produit sont également essentiels. De plus, il faut faire une lecture prospective de l'évolution du niveau sonore dans le futur (l'augmentation du trafic, par exemple) pour parvenir à des solutions (dès le début). S'agissant du bâtiment, il faut bien implanter les espaces par rapport aux sources de bruits (selon leur usage). Lors de la phase de la conception du projet, il faut éloigner le bâtiment de la source du bruit.

5.2. Protection extérieure

Pour protéger le bâtiment, il faut maîtriser les sources sonores qui l'environnent. On peut citer quelques stratégies :

a) La diminution du bruit routier par la réduction de la vitesse du trafic en mettant en place des obstacles qui assurent la sécurité (passage à niveau pour piétons, système de chicane etc.) (Figure II.25).

b) Le traitement acoustique des chaussées c) La végétation est l'un des dispositifs naturels qui assure la réduction du bruit par trois mécanismes : l'effet du son, l'absorption due à la vibration des éléments de l'arbre et, la réflexion et la diffusion des ondes sonores par les éléments de l'arbre (Koussa, 2013).

d) L'utilisation des écrans antibruit : il existe plusieurs types d'écrans acoustiques pour se protéger contre le bruit routier et autres bruits extérieurs. Ils ont pour but de modifier le chemin de propagation de l'onde sonore en réduisant le niveau de pression acoustique au niveau du récepteur (Figure II.26). L'un des écrans antibruit est celui qui réduit le champ réfléchi sur l'écran par l'utilisation des matériaux absorbants tels que le béton poreux, la laine de verre etc. (Figure II.27). Un autre type d'écran antibruit est le mur antibruit végétal qui a pour objectif d'assurer une isolation acoustique. On peut aussi citer les cristaux soniques et les merlans acoustiques.



Figure II.25 : Le système de chicane dans les voies : un dispositif pour diminuer le bruit routier (Cerema, 2019)

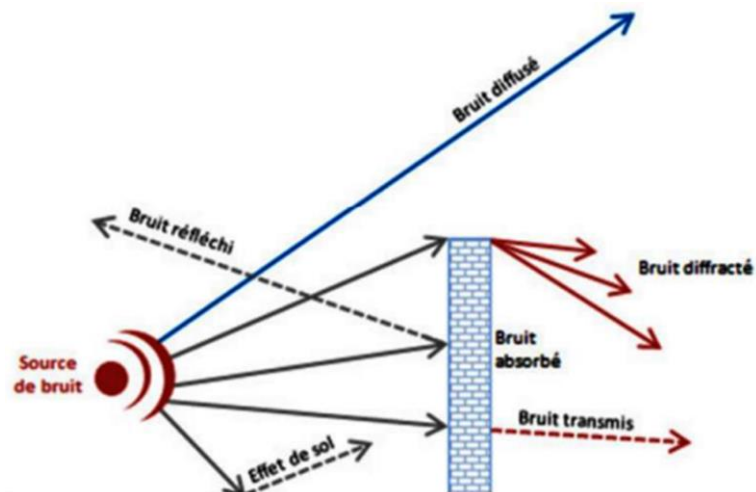


Figure II.26 : Le comportement de l'onde sonore devant un écran antibruit (bruitparif.fr)



Figure II.27 : Les écrans antibruit absorbants (Bruxelles environnement, 2018)

5.3. La disposition des bâtiments et l'organisation spatiale intérieure

Un bâtiment peut être un écran antibruit pour un autre bâtiment. La disposition des bâtiments les uns par rapport aux autres peuvent réduire la nuisance sonore. Pareillement, la disposition du bâtiment par rapport à la source de nuisance peut protéger quelques parties (Figure II.28). L'un des exemples les plus illustratifs est l'hôpital Robert Débré à Paris (Hamayon, 2008). Le bâtiment technique sert d'écran antibruit qui protège la partie d'hébergement (qui nécessite du calme), du bruit émanant du boulevard (Figure II.29). Un autre exemple : l'immeuble conçu par Paul

Chemetov, où les logements sont orientés à l'opposé de la source sonore (la voie). Des espaces tampons ont été implantés, tels que les coursives, pour diminuer le bruit (Figure II.30, Figure III.31). La compacité joue également un rôle prépondérant dans la diminution du bruit. Elle favorise une hiérarchisation sonore en procurant une ambiance sonore calme à l'intérieur des bâtiments. L'architecture introvertie est également une stratégie efficace pour la diminution du bruit de l'extérieur. La cour centrale est un dispositif architectural qui assure un environnement sonore calme différent de celui de l'extérieur (Ziani, 2020) (Figure II.32). Le vestibule est lui aussi considéré comme un écran entre l'environnement sonore extérieur et l'environnement sonore de la maison (Ziani, 2020). L'éloignement de la source sonore diminue plus ou moins la nuisance sonore. Pour le bruit routier, l'aménagement d'un recul avant l'entrée du bâtiment joue un rôle d'écran acoustique.

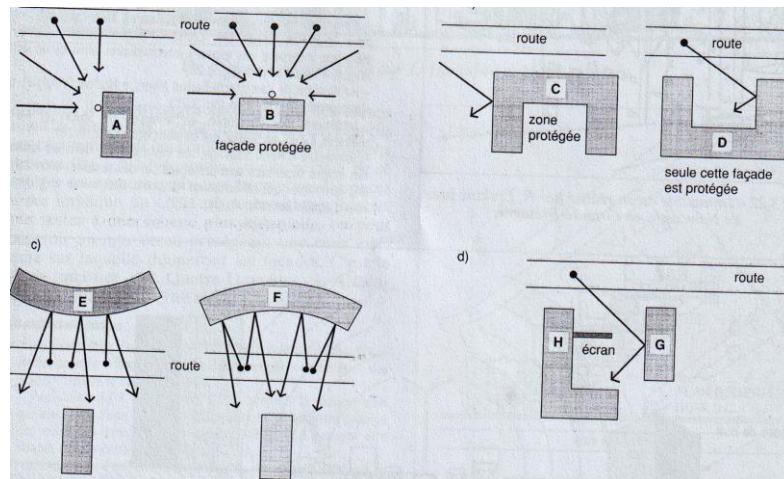


Figure II.28 : Quelques exemples de disposition des bâtiments (Hamayon, 2008)

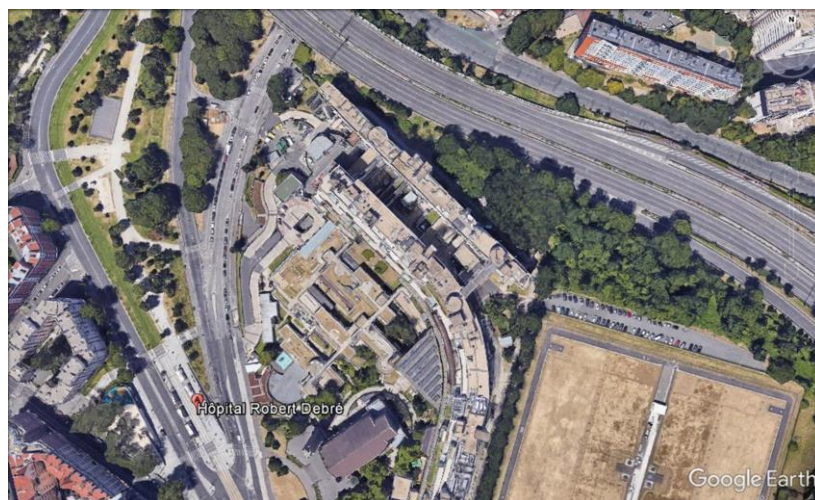


Figure II.29: La disposition des parties de l'hôpital Robert Debré à Paris par rapport au boulevard (Google Earth)

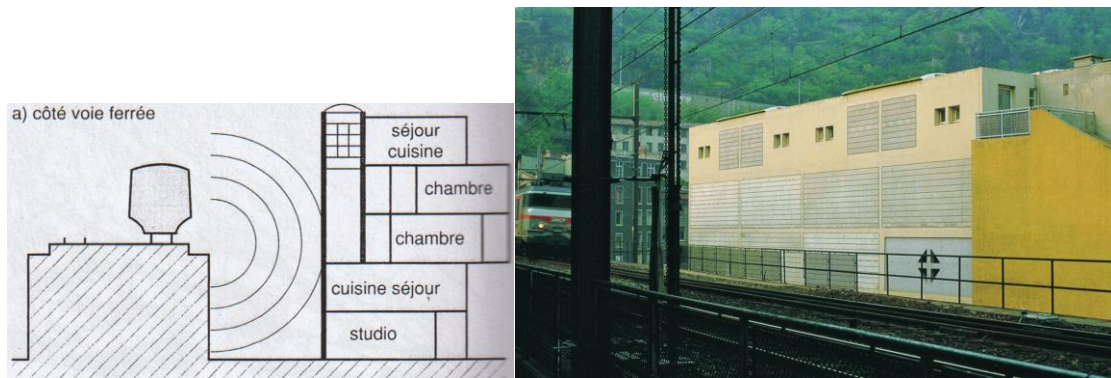


Figure II.30 : La création des espaces tampons pour diminuer le bruit (Hamayon, 2006 ; paulchemetov.com)



Figure II.31 : L'implantation des logements à l'opposé de la source du bruit (paulchemetov.com ; Hamayon, 2006)

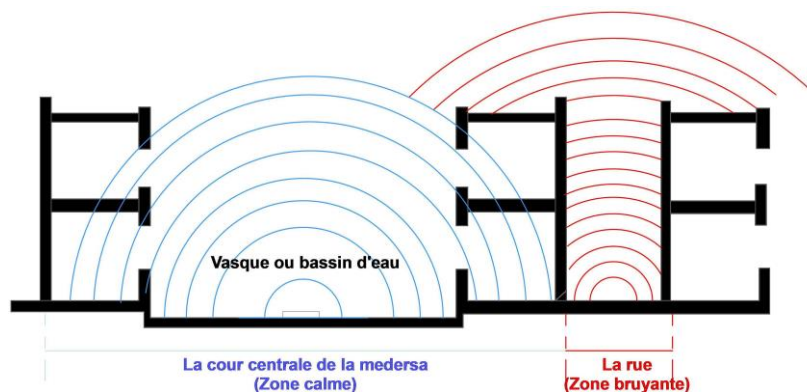


Figure II.32 : L'environnement sonore de la medersa maghrébine (Ziani, 2020)

Les balcons et les loggias apportent une diminution du bruit à l'intérieur de des bâtiments. Lorsqu'ils sont dotés d'un garde-corps plein, ce dernier change la direction de l'onde sonore en la réfléchissant. Tout comme le fait de revêtir la sous-face du balcon par un revêtement absorbant, freine le bruit. Dans ce cas, les étages supérieurs sont mieux protégés que les étages inférieurs (Hamayon, 2006). Les

loggias sont considérées comme des espaces tampons, voire des façades doubles (Figure II.33).

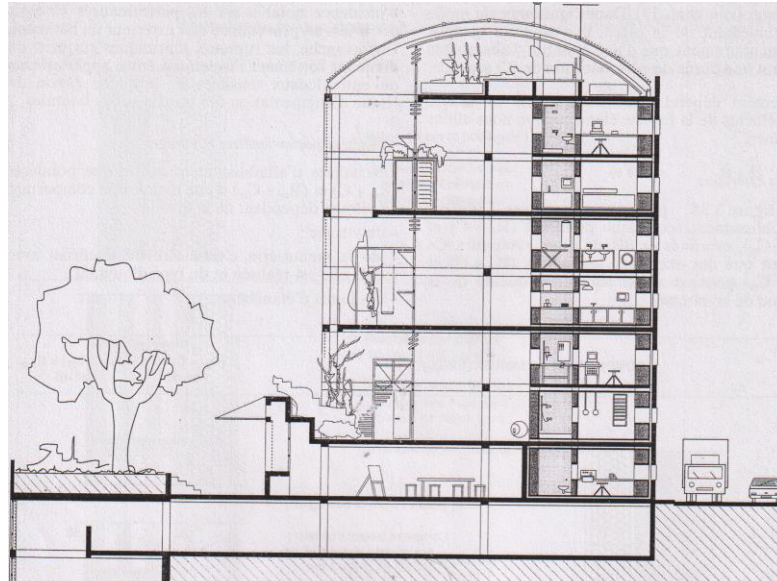


Figure II.33 : L'utilisation des espaces fermés dans le côté bruyant (Hamyon, 2006)

Conclusion

Les concepts clés présentés dans ce chapitre, permettent à l'étudiant de se familiariser avec le domaine de l'acoustique architecturale. L'objectif est de présenter ces notions de manière claire, en utilisant des illustrations. Dans un premier temps, l'attention est portée sur le comportement du son dans une salle quelconque. Ceci, aide l'étudiant à savoir comment le son se propage dans un espace clos. La propagation du son en champ libre n'est pas de la moindre importance, du fait que le projet architectural est intégré dans un environnement extérieur libre. Quelques stratégies architecturales ont été proposées en incitant l'étudiant à prendre en considération le bruit extérieur dans sa conception.

Chapitre III : ***L'isolation acoustique***

Introduction

Ce chapitre porte sur l'isolation acoustique dans le bâtiment. Dans la première partie, nous allons définir l'isolation acoustique, le bruit et ses types. Ce qui renseignera l'étudiant sur les différentes sources de bruits extérieurs et intérieurs. Ensuite, nous mettrons en exergue les différentes manières de transmission du bruit d'un local à un autre. L'attention est portée sur l'indice d'affaiblissement acoustique de trois cas : une paroi simple, une paroi double et une paroi composée de plusieurs éléments. Cette partie, exige l'insertion d'applications, qui aident l'étudiant à comprendre les formules de calcul. La deuxième partie est consacrée à la protection contre le bruit solidien. La dernière partie, quant à elle, se penche sur la correction acoustique.

1. L'isolation acoustique

C'est l'ensemble des dispositions prises pour réduire la transmission de l'énergie acoustique depuis les sources qui la produisent jusqu'aux lieux à protéger (Hamayon, 2006). Autrement dit, l'isolation acoustique du bâtiment permet la protection des bruits intérieurs et extérieurs.

Comme susmentionné, les bruits sont des sons gênants. Ce sont des signaux nuisibles à l'être humain, gênant son activité normale. Il est notamment, un mélange de sons, de plusieurs fréquences, de plusieurs niveaux. Le bruit est classé selon deux critères:

1. L'endroit d'émission (Tableau III.1)
2. Les propriétés de formation et de propagation.

Selon es propriétés de formation et de propagation, on distingue deux types de bruits:

1. **Les bruits aériens:** ce sont les bruits qui se produisent et se propagent dans l'air.
2. **Les bruits solidiens:** ce sont les bruits qui se produisent par les chocs entre un corps rigide et la construction du bâtiment. Ce type de bruit se propage dans la matière.

Le bruit des sources extérieures	Le bruit des sources intérieures
Le bruit de trafic routier et ferroviaire	Le bruit de conversation, la radio, la télévision
Le bruit des avions	Les équipements ménagers
Le bruit des équipements des chantiers	Les chocs sur les parois
Le bruit de la pluie sur les éléments légers du bâtiment.	Le déplacement des mobiliers

Tableau III.1 : Les bruits selon l'endroit de l'émission (Auteur, 2020)

Il existe un autre type de classification (temporalité, fréquence) (Figure III.1):

1. **Le bruit continu:** c'est un bruit généré par des machines qui fonctionnent sans interruption (les zones industrielles).
2. **Le bruit intermittent:** c'est un bruit qui croît puis décroît rapidement (l'avion, le réveil etc.).
3. **Le bruit à caractère impulsionnel:** c'est le bruit d'explosion ou d'impact (pilonnage etc.)
4. **Le bruit basse fréquence:** ce bruit se caractérise par une énergie acoustique importante dans les fréquences comprise entre 8 et 100 hertz (les bateaux, les trains, groupes électrogènes etc.).
5. **Le bruit à tonalités marquées:** c'est bruit dû aux balourds et aux impacts répétés dans les machines tournantes.

1.1. Local d'émission et local de réception

On appelle local d'émission, le local dans lequel le bruit est émis. L'énergie acoustique est transmise dans un local voisin qui est le local de réception.

Quant à la transmission, on distingue trois types (Figure III.2):

1. Transmission directe: via la paroi séparative
2. Transmission latérale: via les parois liées à la paroi séparative.
3. Transmission parasite: via les fissures, défauts d'exécution, les trous dus aux passages de canalisations etc. Dans ce cas les ondes sonores se transmettent par diffraction.

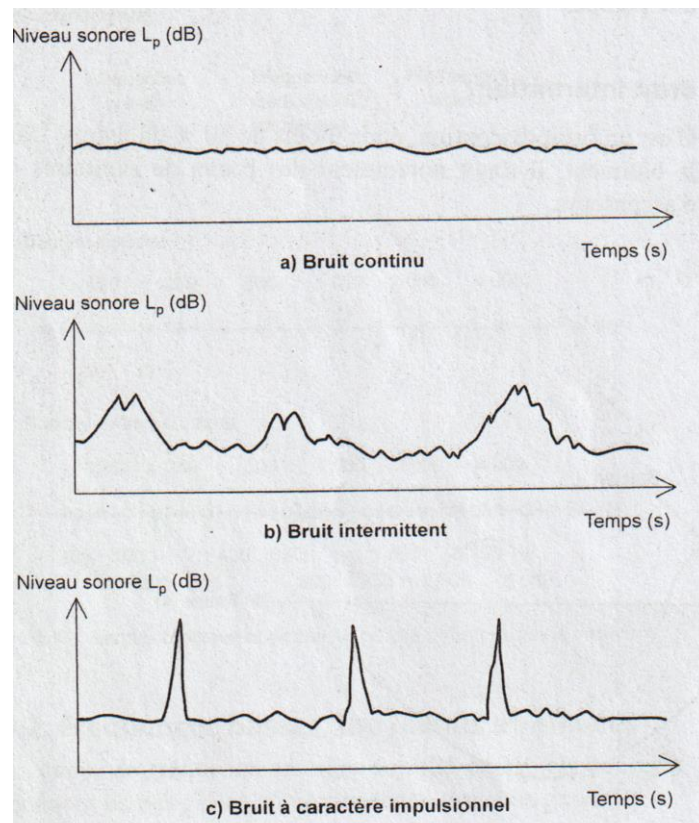


Figure III.1 : Type de bruit (Hamayon, 2008)

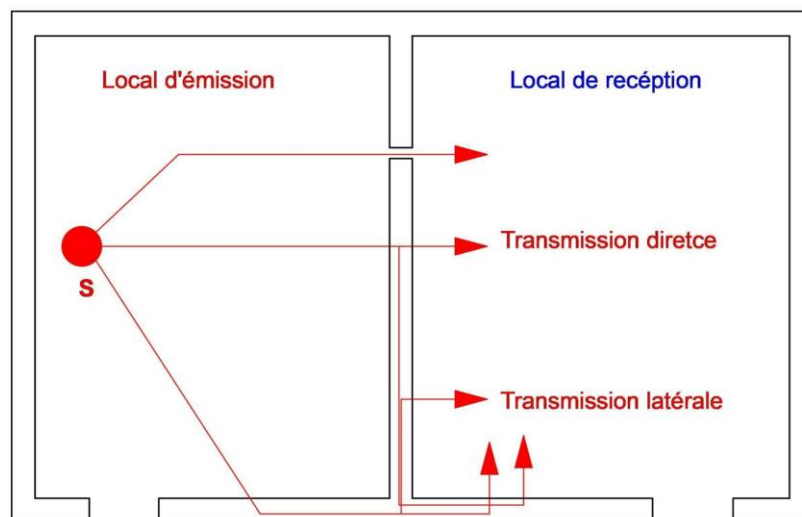


Figure III.2 : Les différents chemins de transmission de l'énergie acoustique (Hamayon, 2006)

1.2. L'isolement acoustique

1.2.1. L'isolement acoustique brut D, D_b

Le D est la différence arithmétique des niveaux de pression acoustique entre le local d'émission L1 et le local de réception L2 (Hamayon, 2006)

$$D=L1-L2 \quad (III.1)$$

L₁: niveau de pression acoustique émis

L₂: niveau de pression acoustique reçu

Le D est exprimé en dB

L'isolement acoustique brut D dépend de :

A. Les transmissions directes via la paroi séparative

1. L'indice d'affaiblissement acoustique R, exprimé en dB

2. La surface de la paroi

B. Les transmissions latérales via les parois liées à la paroi séparative

C. Les transmissions parasites

D. Le volume du local de réception: plus le volume est important, plus l'énergie transmise diminue

E. L'absorption du local: moins le local est absorbant, plus le niveau sonore est important.

1.3. L'indice d'affaiblissement acoustique R

Tous les matériaux de construction transmettent le son. La paroi séparative (entre les locaux) est caractérisée par un indice d'affaiblissement acoustique R.

Ce dernier caractérise l'aptitude d'une paroi à affaiblir la transmission du bruit.

Le R est mesuré en laboratoire en absence de transmissions latérales (Figure III.3).

Il est exprimé en dB.

$$R=10 \log 1/t \quad (III.2)$$

t : facteur de transmission de la paroi séparative

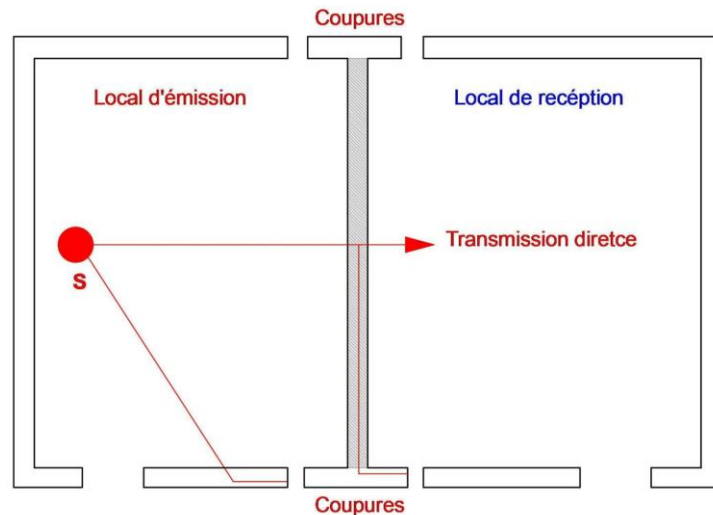


Figure III.3 : Les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique (Hamayon, 2006)

1.4. Le facteur de transmission (t)

La paroi séparative se comporte comme une source sonore pour le local de réception. Chaque paroi séparative est caractérisée par son facteur de transmission. **t**. Ce dernier se diffère selon la constitution de la paroi (matériaux, épaisseur, masse volumique etc.).

Dans les deux côtés de la paroi séparative (côté émission et côté réception), on a deux champs acoustiques d'intensité différente I_1 et I_2 (Figure III.4).

L'énergie tombant sur la paroi séparative égale au flux d'énergie par unité de surface (Hamayon, 2006).

$$W_1 = I_1 S_p \quad (\text{III.3})$$

L'énergie transmise dans le local de réception, quant à elle, est égale (Hamayon, 2006):

$$W_2 = I_2 S_p \quad (\text{III.4})$$

Le **t** est le rapport entre l'énergie transmise par unité de surface (w/m²) à l'énergie incidente par unité de surface (w/m²) (Hamayon, 2006).

$$t = I_1 / I_2 \quad (\text{III.5})$$

1.5. L'indice d'affaiblissement acoustique pondéré R_w R_A

L'indice d'affaiblissement acoustique pondéré est accompagnée de deux termes d'adaptation C et C_{tr} . Pour le premier, il s'agit du bruit rose (Figure III.5) qui est utilisé

pour les mesures des bruits intérieurs et les bruits générés par les avions ($R_w + C$).
Le deuxième, est le bruit du trafic (Figure III.6) utilisé pour les mesures des bruits extérieurs : bruit routier et ferroviaire ($R_w + R_{rt}$).

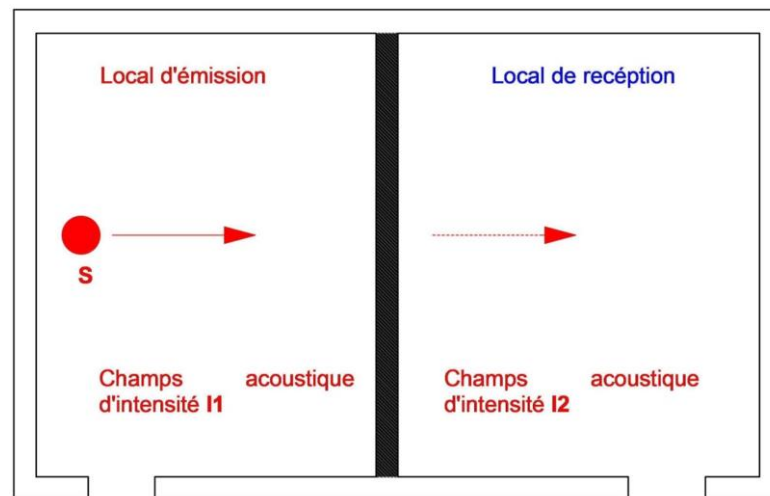


Figure III.4 : Le facteur de transmission (Chagué, 2001)

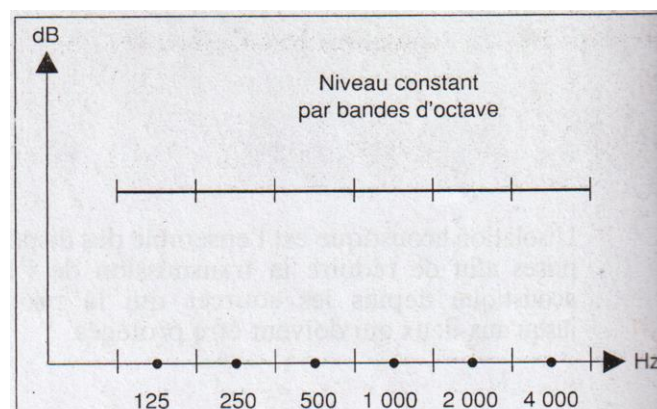


Figure III.5 : La représentation du bruit rose par bandes d'octave (Hamayon, 2006)

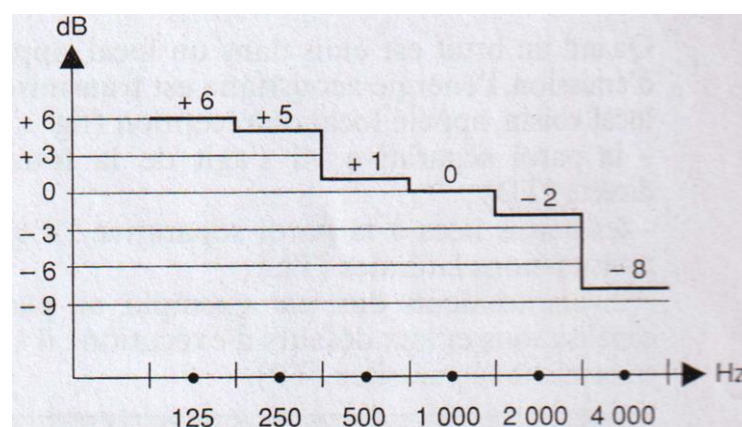


Figure III.6 : La représentation du bruit routier par bandes d'octave (Hamayon, 2006)

1.6. L'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi simple

1.6.1. Loi expérimentale de masse

Les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi montrent que les parois lourdes ont un indice R élevé. En effet, l'indice R augmente 4dB, en doublant la masse de la paroi. Par contre, le R diminue de 4 dB chaque fois que la fois la paroi est divisée en deux (Chagué, 2001).

La connaissance des dimensions et de la densité (masse volumique kg/m^3) nous permet de calculer la masse de la paroi.

Pour augmenter la masse surfacique d'une paroi (la masse par unité de surface), nous devons augmenter le R.

Un béton dispose d'une surface volumique de 2300 kg/m^3 , la masse surfacique d'une paroi construite en béton avec une épaisseur de 20 cm est équivalente à : $2300 \times (20/100) = 460 \text{ kg/m}^2$.

Il a est à noter que lorsque la masse surfacique de la cloison est supérieure à 200 kg/m^2 , l'indice d'affaiblissement acoustique augmente de 4 dB pour chaque doublement de masse (Figure III.7) (Hamyaon, 2008).

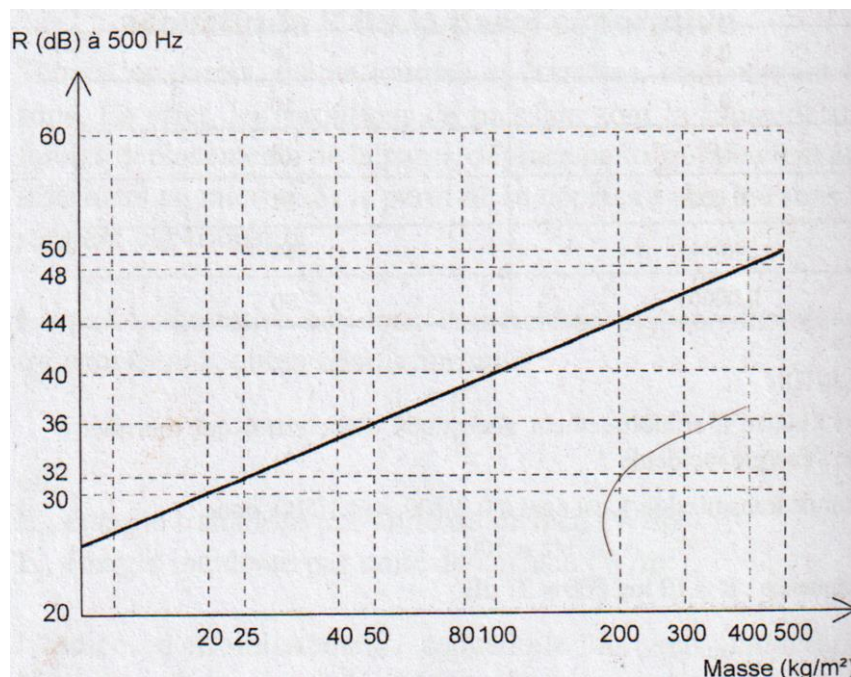


Figure III.7 : L'évolution de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi en fonction de sa masse M (Hamayon, 2008)

1.6.2. Loi expérimentale de fréquence

Les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi expérimentale montrent que plus la fréquence de l'onde incidente est élevée, plus l'indice R est élevé. Le R augmente de 4dB lorsque la fréquence de l'onde incidente est doublée. Inversement, le R diminue de 4dB lorsque la fréquence est divisée en deux. Si on prend l'exemple d'une paroi en béton avec une masse surfacique de 200kg/m^2 , le R augmente de 40 à 44 dB lorsque la fréquence est doublée de 500 à 1000 Hz (Figure III.8). On appelle la fréquence critique f_c , est la fréquence dans laquelle la paroi présente un défaut d'isolement (la chute de R). Ceci dépend de l'épaisseur et de la nature du matériau utilisé, elle peut être variée entre 3 à 10 dB.

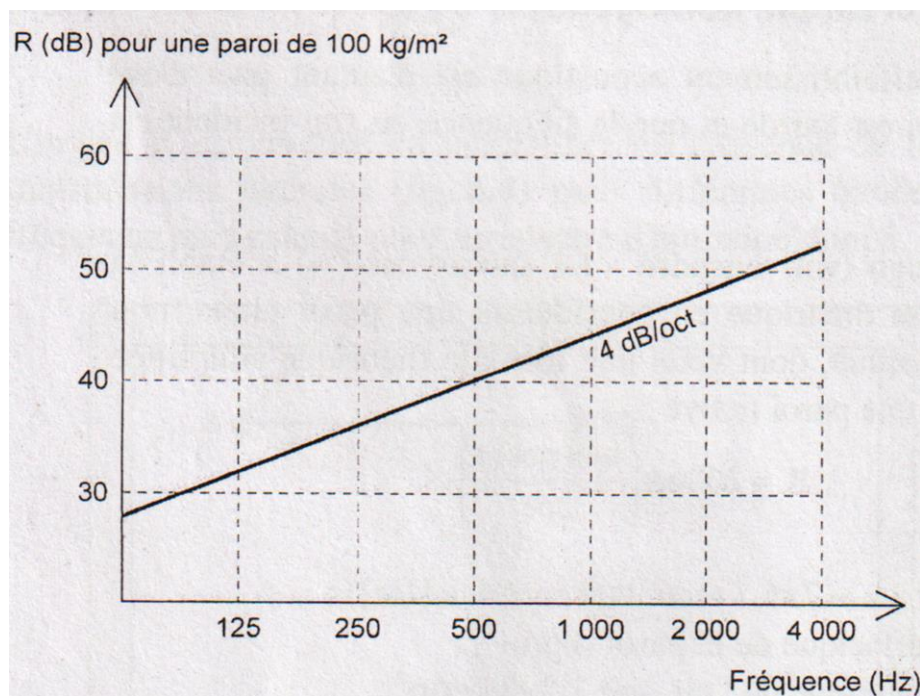


Figure III.8 : L'évolution de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi en fonction de la fréquence (Hamayon, 2008)

En fonction du type de bruit d'émission (rose ou routier), les valeurs de l'indice d'affaiblissement acoustique pour chaque masse surfacique est comme suit (Hamayon, 2006):

a. Le bruit rose :

Pour Une masse surfacique : $50 \leq m_s < 150\text{ kg/m}^2$ $(R_w+C) = (17 \log m_s) + 3\text{ dB}$

Pour Une masse surfacique : $150 \leq m_s \leq 700\text{ kg/m}^2$ $(R_w+C) = (40 \log m_s) - 47\text{ dB}$

Chapitre III : L'isolation acoustique

Pour une masse surfacique : $>700 \text{ kg/m}^2$ La valeur de (R_w+C) est plafonnée à 67 dB.

b. Le bruit routier :

Pour Une masse surfacique : $50 \leq m_s < 150 \text{ kg/m}^2$ $(R_w+C) = (13 \log m_s) + 9 \text{ dB}$

Pour Une masse surfacique : $150 \leq m_s \leq 670 \text{ kg/m}^2$ $(R_w+C) = (40 \log m_s) - 50 \text{ dB}$

Pour une masse surfacique : $> 670 \text{ kg/m}^2$ La valeur de (R_w+C) est plafonnée à 63 dB.

En laboratoire, les équations de la loi expérimentale donnent des valeurs globales qui permettent le calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique R. Le Référentiel Qualitel (2005) donne les masses volumiques de quelques matériaux (Tableau III.2). Les coefficients d'affaiblissement acoustique de quelques matériaux sont présentés dans le deuxième tableau (Tableau III.3).

Les matériaux	Les masses volumiques
Béton lourd, parois verticales	2300 kg/m ³
Béton lourd, parois horizontales	2400 kg/m ³
Bloc perforé (béton, sable et gravillon)	1600 kg/m ³
Bloc creux (béton, sable et gravillon)	1300 kg/m ³
Enduit plâtre (1 cm d'épaisseur)	10 kg/m ²
Enduit en ciment (1 cm d'épaisseur)	20 kg/m ²

Tableau III.2 : Les valeurs de la masse volumique des matériaux selon le Référentiel Qualitel (Hamayon, 2008).

Les matériaux	L'indice d'affaiblissement (dB)
Béton (épaisseur 0.2 m)	60
Brique en terre cuite (mur simple)	46
Carreaux de plâtre (0.10 m)	38
Tôle d'acier	39

Tableau III.3 : Les coefficients d'affaiblissement de quelques matériaux de construction (bruit.fr).

Application

Soit une dalle pleine d'épaisseur 20 cm. Quel est l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré (R_w+C) ?

La masse volumique d'une paroi horizontale de 20 cm est :

$2400 \times (20/100) = 480 \text{ kg/m}^2$, elle est comprise entre 150 et 700 kg/m²

$(R_w+C) = (40 \log m_s) - 47 = 60 \text{ dB}$.

Pour évaluer l'indice d'affaiblissement acoustique, on peut également utiliser l'abaque ci-dessous (Figure III.9).

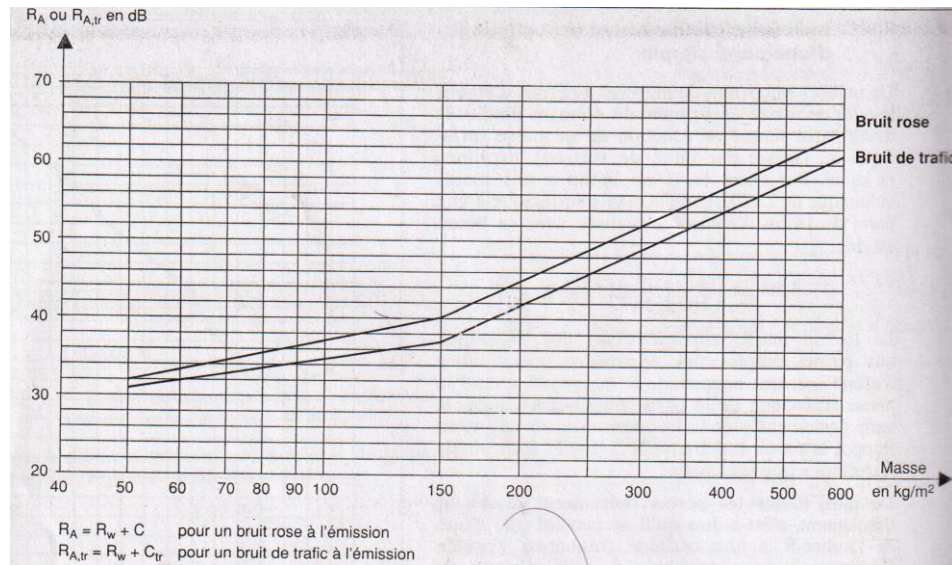


Figure III.9 : L'évaluation de l'indice d'affaiblissement acoustique (Hamayon, 2008)

1.7. L'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi double

Le R d'une paroi double est supérieur au R d'une paroi simple à l'exception de quelques vitrages. Dans le cas où il n'y a pas une liaison entre les deux parois (lame d'air etc.), l'indice d'affaiblissement acoustique est la somme de deux indices de deux parois simples composant la paroi double. Il est à noter que l'indice R d'une paroi double dépend de la masse surfacique de chacun des parements, l'épaisseur de la lame d'air, l'épaisseur de l'absorbant acoustique situé entre les deux parements et la fréquence critique de chaque parement.

Par analogie, la masse surfacique des parements, ainsi que l'épaisseur de lame d'air, permettent à la paroi double de se comporter comme deux masses reliées par un ressort. Il est appelé système masse-ressort-masse. Dans le cas où l'une des parois est soumise à une vibration de même fréquence, il s'ensuit une résonance qui est déterminée par la formule suivante (Chagué, 2001) :

$$f_r = 84 \sqrt{1/d (1/m_1 + 1/m_2)} \quad (\text{III.6})$$

d : distance séparant les deux parois en m

m_1, m_2 : masses surfaciques des deux parois en kg/m^2

Application

Soit un double vitrage 4 (6) 4, trouvez la fréquence de résonance.

La masse surfacique d'un vitrage de 4mm d'épaisseur :

$$2500 \times (0.4/100) = 10 \text{ kg/m}^2, f_r = 84 (1/0.006 (1/10 + 1/10)) = 485 \text{ Hz}$$

L'indice R diminue à la fréquence de résonance et aux fréquences proches. Si on prend l'exemple du double vitrage 4(6)4, la fréquence de résonance de 458 Hz se situe dans les fréquences médiums voire les fréquences les plus perceptibles par l'être humain. Pour que l'indice R d'une paroi double soit bon, il faut trouver la fréquence de résonance la plus basse. Par conséquent, on augmente la distance entre les parements et les masses surfaciques des parois. S'agissant de la fréquence de résonance d'une lame d'air, elle est déterminée par la formule suivante (Chagué, 2001) :

$$f_c = nc/2d \quad (\text{III.7})$$

c : célérité du son dans l'air

d : distance entre les deux parois en m

n : égal à 1,2,3,4 etc.

La fréquence d'une lame d'air de 10 cm d'épaisseur est égale à:

$$f_c = 170n/0.10 = 1700 n$$

Les fréquences de résonances sont situées à 1700, 3400, 5100, 6800 etc.

1.8. L'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi comportant plusieurs éléments

Pour calculer l'isolement entre deux locaux, il faut déterminer le R résultant de la paroi séparative. Ceci dépend de l'indice d'affaiblissement acoustique et de la surface de chaque élément composant la paroi. Le R résultant est déterminé par la formule suivante (Chagué, 2001) :

$$R_{\text{résultant}} = 10 \log S_1 + S_2 / S_1 \cdot 10^{-0.1R_1} + S_2 \cdot 10^{-0.1R_2} \quad (\text{III.8})$$

S_1, S_2 : surfaces des composants en m^2

R_1, R_2 : indice d'affaiblissement acoustique de chaque composant

On peut utiliser l'abaque ci-dessous, qui donne la diminution de l'indice R résultant d'une paroi composant de plusieurs éléments (Figure III.10).

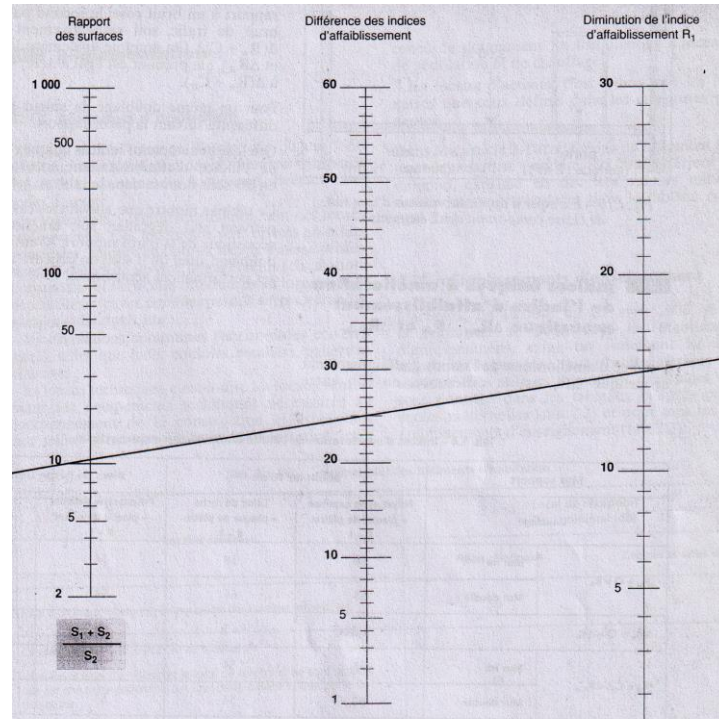


Figure III.10 : L'estimation de l'indice R résultant (Hamayon, 2006)

Soit deux salles de classe séparées par une cloison de 7x3m comprenant une porte de 2m². Les indices R de la cloison et la porte sont respectivement de 45 dB et de 20 dB. Trouvez R_{résultant}.

La surface totale de la cloison avec la porte est 21m².

Le rapport des surfaces : $S_1 + S_2 / S_2 = 21/2 = 10.5$

Différence des indices 45-20=25.

R_{résultant} = 30.1 dB

1.9. La paroi séparative horizontale

1.9.1. Paroi simple

Un plancher peut être assimilé à une paroi simple ou double. Dans ce cas les performances acoustiques peuvent être évaluées par l'application de la loi de masse, le calcul des fréquences de résonance f_{pq} et le calcul de la fréquence critique f_c (Chagué, 2001). Pour calculer la fréquence de résonance, on utilise la formule suivante :

$$f_{pq} = k_i h c_t (p^2/a^2 + q^2/b^2) \quad (\text{III.9})$$

p : nombre de ventres développés sur la longueur de la dalle

q : nombre de ventres développés sur la largeur de la dalle

k_i : coefficient représentatif du mode d'attache de la dalle ($1.57 < k_i < 3.14$)

h : épaisseur de la dalle (m)

c_t : vitesse de propagation longitudinale dans le matériau (m/s)

a : longueur de la dalle (m)

b : largeur de la dalle (m)

La première fréquence de résonance correspond à : $p=q=1$

$$f_{11} = k_i h c_t (1/a^2 + 1/b^2) \quad (\text{III.10})$$

Lorsque la dalle est réalisée sur poutres, a représente l'écartement de pose. Dans ce cas a est petite par rapport à la portée b. Par conséquent, le rapport $1/b$ peut être négligé (Chagué, 2001).

$$f_{11} = k_i h c_t / a^2 \quad (\text{III.11})$$

Le calcul des fréquences f_{pq} et f_c donne des valeurs élevées situées dans la zone de perception maximale. L'amélioration des performances sont obtenues par la réalisation d'un doublage (Chagué, 2001).

1.9.2. Paroi double

La réalisation d'un plafond suspendu permet de masquer les défauts de l'isolement aux bruits aériens d'une dalle simple. A l'instar de la paroi verticale double, ce procédé génère une fréquence de résonance imposée par le système masse-ressort (Chagué, 2001).

$$f_0 = 60 \sqrt{1/d (1/m_1 + 1/m_2)} \quad (\text{III.12})$$

f_0 : fréquence de résonance due au couplage de la lame d'air

m_1 : masse surfacique de la dalle (kg/m^2)

m_2 : masse surfacique du plafond (kg/m^2)

d : distance séparant les deux parois (m)

La masse surfacique de la dalle étant élevée par rapport à celle du plafond, le rapport $1/m_1$ peut être négligé. La fréquence de résonance est (Chagué, 2001):

$$f_0 = 60 / \sqrt{m_2 d} \quad (\text{III.13})$$

1.10. La protection contre le bruit solidien

Le bruit solidien (appelé aussi bruit d'impact) est « *le bruit dû au déplacement d'une paroi résultant de l'application à celle-ci d'une force le plus souvent brusque* » (Hamyon, 2006). Il est dû à la marche, aux déplacements ou bien aux chutes d'objets, soit aux claquements de portes, voire aux vibrations des équipements du bâtiment (ascenseur, chaudière etc.).

L'un des solutions utilisées pour se protéger contre le bruit solidien, est la prévention d'une coupure acoustique en utilisant des matériaux résilients (le liège par exemple) qui gardent leur élasticité sous l'effet d'une charge) (Figure III.11)

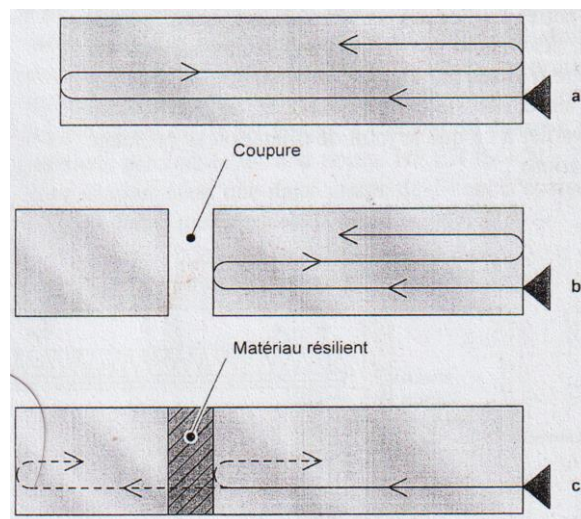


Figure III.11 : Les coupures acoustiques par des matériaux résilients (Hamayon, 2008)

Dans le bâtiment, les coupures acoustiques peuvent prendre la forme d'une dalle flottante (atténuation du bruit de marche), une désolidarisation des appareils de chauffage et de plomberie. S'agissant du bruit d'impact, il est généré par des chocs directs sur une paroi (Figure III.12). Le niveau sonore induit est élevé du fait que l'énergie sonore est transmise directement dans le matériau (Chagué, 2001).

Augmenter la masse des parois n'apporte aucune amélioration. Par contre, il est mieux de maîtriser la dispersion de l'énergie de la source sonore par l'absorption de l'énergie de l'impact, soit par l'installation d'un obstacle sur le parcours de l'onde (Chagué, 2001).

En ce qui concerne, le bruit de choc, c'est le bruit émis par une paroi mise en vibration par un choc. Sur le plancher, les générateurs de ce bruit peuvent provenir du déplacement des meubles, des chutes d'objets, ou bien de l'impact des chaussures etc. Les claquements des portes, le choc des vaisselles sur les éviers sont les générateurs de bruit de choc sur les parois. On se protège contre le bruit de choc sur les planchers en utilisant un revêtement de sol ou un sol flottant (Figure III.12), un plafond suspendu étanche en incorporant une laine minérale dans le plenum (Figure III.13), des coupures entre les locaux par un joint de dilatation qui se prolonge jusqu'aux fondations.



Figure III.12 : La pose d'un sol flottant comme isolation phonique (Isolation-phonique.com)

Le revêtement de sol a pour but d'absorber l'énergie transmise au plancher pendant la phase de l'impact. Une dalle dotée d'une couverture en matériau élastique subit un écrasement temporaire de faible amplitude au moment du choc (Chagué, 2001). Le revêtement joue le rôle d'un masse-ressort qui génère une résonance susceptible d'être entretenue. La fréquence correspondante est déterminée par la formule :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (\text{III.14})$$

Chapitre III : L'isolation acoustique

M : masse de l'objet

K : raideur du revêtement

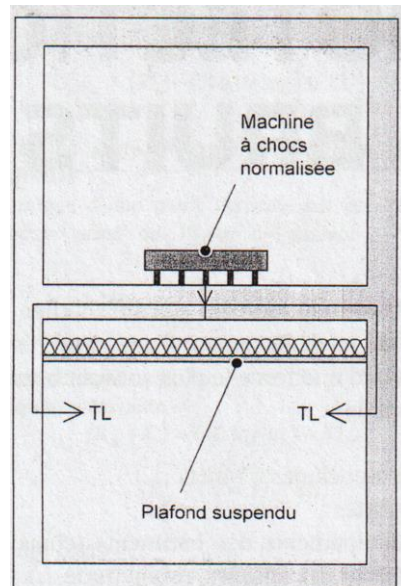


Figure III.13 : Le plafond suspendu comme dispositif d'isolation phonique (Hamayon, 2008)

Un autre système efficace contre le bruit de choc est celui de boîte dans la boîte. Le principe de ce système est de créer une pièce dans une autre pièce (Hamayon, 2008). Autrement dit, c'est mettre une structure indépendante qui renferme l'espace à protéger. Ceci permet l'évitement du passage des bruits entre l'espace en question et la structure (Figure III.14).

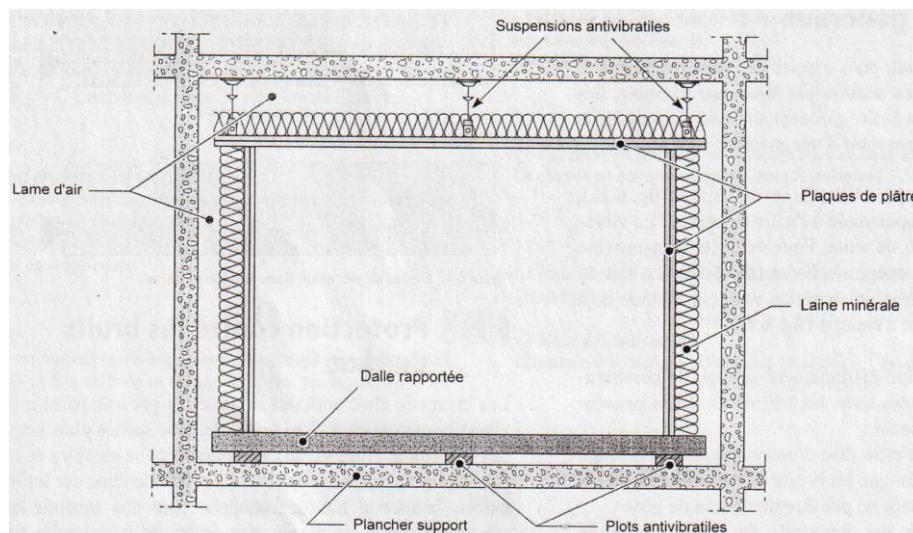


Figure III.14 : Le système « boîte dans la boîte » (Hamayon, 2008)

2. La correction acoustique

La correction acoustique consiste à assurer une qualité acoustique dans un local. Autrement dit, elle permet de corriger les caractéristiques acoustiques pour avoir une qualité sonore relative à la fonction exercée. La correction acoustique peut être utilisée pour favoriser l'intelligibilité de la parole dans des lieux d'écoute tels que les salles de classe, les salles de spectacle, les mosquées etc. Elle peut être également utilisée pour diminuer le bruit dans les lieux industriels, les bureaux, les espaces de circulations communes etc. (Hamayon, 2006). La correction acoustique dépend de plusieurs critères qui sont : i) la forme et le volume du local, ii) la qualité des parois, et iii) les caractéristiques acoustiques des matériaux de construction utilisés.

2.1. Le coefficient d'absorption acoustique

Comme il a été mentionné avant, quand l'onde sonore frappe une paroi, l'énergie se divise en trois parties : énergie réfléchie, énergie absorbée et énergie transmise. Supposons que l'énergie transmise est une énergie absorbée. Chaque matériau de construction composant la paroi est caractérisé par son coefficient d'absorption ou facteur d'absorption α . Ce dernier est le rapport entre l'énergie absorbée à l'énergie incidente (Roulet, 2012).

$$\alpha = E_A / E_I \quad (\text{III.15})$$

Le coefficient d'absorption varie entre 0 et 1. α égale 0 veut dire que toute l'énergie est réfléchie. Par contre, α égale 1 veut dire que toute l'énergie incidente est absorbée (le cas d'une fenêtre ouverte). L'absorption des parois varie selon les fréquences (Figure III.15). Le coefficient d'absorption est présenté par bandes d'octave (Figure III.16).

Pour les établissements de santé et d'enseignement, le coefficient d'absorption doit être utilisé dans les intervalles d'octave centrés sur 500, 1000, 2000 Hz.

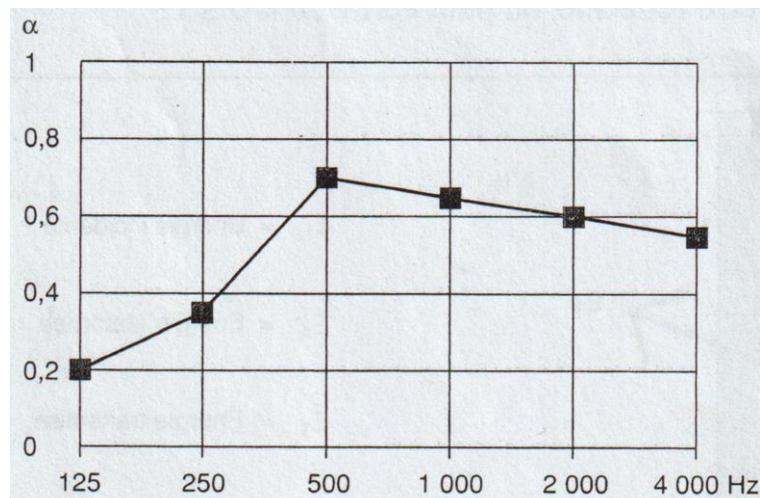


Figure III.15 : Coefficient d'absorption en fonction de la fréquence (Hamayon, 2006)

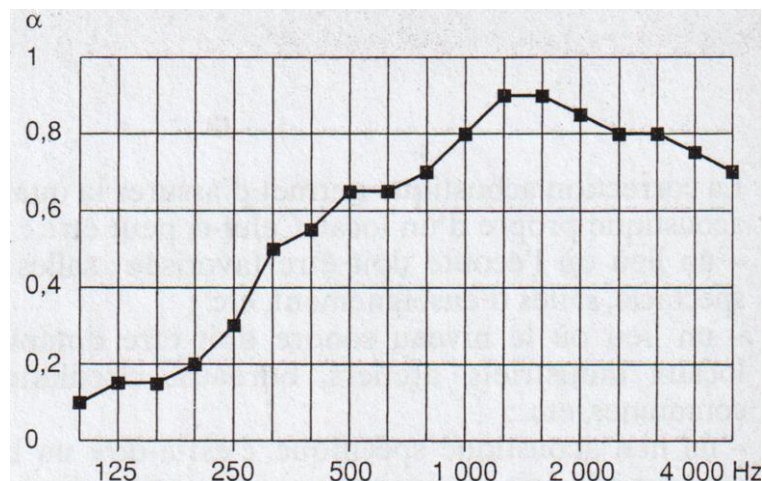


Figure III.16 : coefficient d'absorption par bandes d'octave (Hamayon, 2006)

2.2. Traitement des locaux

2.2.1. Les salles d'enseignement

Dans les lieux d'enseignement, l'intelligibilité de la parole est primordiale. Le message de l'enseignant doit être net et tous les auditeurs écoutent clairement leurs professeurs. A l'inverse d'une salle de concert, la salle d'enseignement demande un temps de réverbération réduit. Dans son livre qui s'intitule «Music, Acoustics and architecture», Beranek donne plusieurs critères qui assurent une bonne qualité acoustique d'une salle (Beranek, 1992). Selon l'auteur, la réverbération est un critère important dans une salle, elle doit être adaptée à la fonction y exercée (Figure III.17). Aussi, le niveau sonore du message parvenant à l'auditeur, doit être favorisé

via l'augmentation du niveau du son direct et celui des premières réflexions. Beranek édicte un autre critère : celui de la répartition uniforme du son dans la salle. Le son doit être bien diffusé dans la salle, ce qui permet à tous les récepteurs d'entendre clairement l'auditeur. L'évitement des perturbations dans la salle tels que, l'écho, la focalisation du son et la diminution des bruits venus des équipements ainsi que le bruit venu de l'extérieur favorisent une bonne qualité sonore.

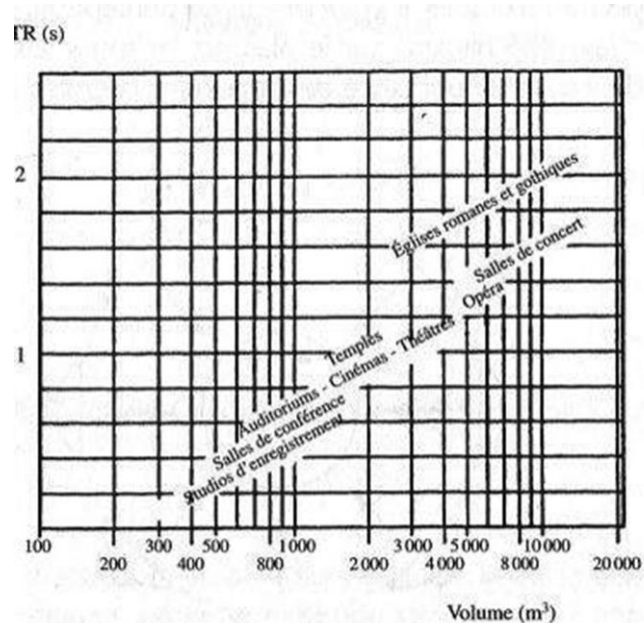


Figure III.17 : La durée de réverbération préconisée pour quelques salles (Hamayon, 2008)

Notons qu'une réverbération est très longue dans une salle des cours, procure de l'écho, qui affecte l'intelligibilité de la parole. Dans ce cas, le plafond situé vers le fond du local, le mur du fond et le mur latéral doivent bénéficier d'un traitement acoustique.

2.2.2. L'amphithéâtre

Dans un amphithéâtre, la forme, le volume et l'étude des premières réflexions du son, sont prépondérants. Dans cet espace, il est mieux de disposer le public en gradins. Ceci permet la bonne distribution du son, en évitant sa diffraction. De plus, la disposition en gradins favorise l'absorption et, l'utilisation des parois absorbantes se limite uniquement au mur de fond ainsi que la partie du plafond la plus éloignée du conférencier. L'intégration des panneaux réfléchissants au-dessus du conférencier favorise la réflexion en permettant la distribution du son jusqu'au fond

de la salle (Figure III.18). Les parois latérales doivent être absorbantes, pour éviter le parallélisme et l'hétérogénéité du champ sonore (Hamayon, 2006).

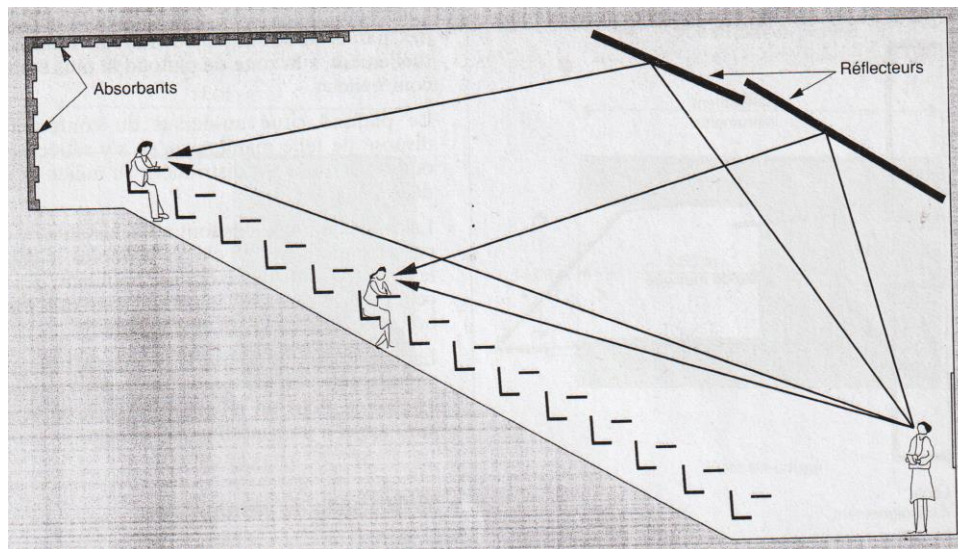


Figure III.18 : L'intégration des panneaux réfléchissants au-dessus du conférencier pour favoriser la réflexion (Hamayon, 2008)

2.2.3. L'atelier

Les ateliers bruyants doivent être bien étudiés du point de vue acoustique. Dans ces espaces, le niveau de pression acoustique équivalent peut atteindre 85 dB. Par conséquent, l'étude de l'acoustique architecturale est nécessaire, afin de générer l'intelligibilité de la parole (dans le cas d'atelier d'enseignement) et éviter les risques de de surdité (Hamayon, 2006). Il est mieux de grouper le matériel le plus bruyant dans un local indépendant, loin d'étudiants. Afin de diminuer l'énergie réfléchiée, l'utilisation des surfaces absorbantes sur le plafond et les murs est prépondérante (Hamayon, 2006) (Figure III.19). Quant à l'énergie directe, on peut la diminuer par l'emplacement des écrans absorbants, d'une hauteur de 2m, devant la source sonore (Figure III.20).

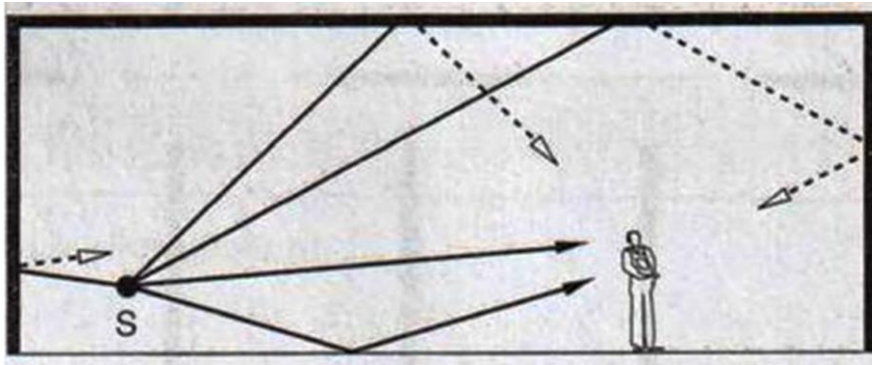


Figure III.19 : Traitement de l'énergie réfléchie par le plafond et les murs (Hamayon, 2006)

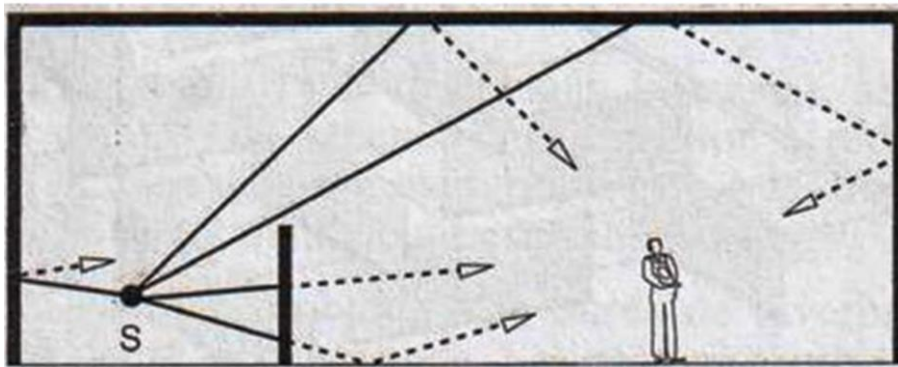


Figure III.20 : Traitement de l'énergie directe par l'emplacement d'un écran (Hamayon, 2006)

Conclusion

Parler de l'isolation acoustique et de la correction acoustique en quelques pages n'est pas une tâche simple, partant, nous nous limitons à quelques notions fondamentales et nécessaires. L'objectif principal de ce chapitre est de d'inciter l'étudiant à se protéger contre le bruit, en faisant appel à des solutions architecturales et constructives.

L'architecture est une spécialité multidisciplinaire. De ce fait, l'architecte fait certainement appel à plusieurs théories, disciplines et techniques pour concevoir des espaces qui répondent aux besoins de l'occupant. Il doit penser non seulement à la forme, la surface et la matière mais aussi aux ambiances régnantes. La lumière, le son, l'odeur etc. sont des dimensions perceptibles, qui donnent à l'espace architectural (à son usage) une atmosphère spécifique. Le son, comme élément de la conception architecturale, doit être judicieusement intégré dans le parti architectural. On conçoit des espaces d'enseignement dont l'intelligibilité de la parole est prépondérante, afin d'assurer la communication entre l'enseignant et l'apprenant. Spécifiquement, dans les salles de musique (espaces dédiés au son), le son doit être parfaitement y distribué. En revanche, la protection contre le bruit est nécessaire dans la prolifération d'espaces confortables et sains. L'exemple des espaces industriels bruyants, où le niveau de pression acoustique se doit d'être diminué, évitant des effets néfastes sur la santé de l'occupant. Gérer le son ou se protéger contre le bruit, sont deux actions différentes mais dont l'objectif commun, est d'avoir des espaces confortables et significatifs.

Le présent manuel a pour but d'initier l'étudiant aux notions clés de l'acoustique architecturale, les lui présentant de manière claire et accessible. Etant un vaste domaine, nous nous sommes limités aux concepts de base, pour que l'étudiant puisse se familiariser avec le comportement du son dans les espaces et, savoir comment garantir une protection acoustique pourvoyant ces espaces d'un confort optimum.

Bibliographie

1. Ouvrages

Alier .R (2006). Pavarotti. Edition Robinbook, Barcelona.

Augoyard. J.F, Torgue. H (1995). A l'écoute de l'environnement : répertoire des effets sonores. Editions Parenthèses, Marseille.

Bagot. J.D (1999). Information, sensation et perception. Edition Armand Colin, Paris.

Beranek L.L (1992). Music, Acoustics and architecture. John Wiley & Sons, USA.

Chagué. M (2001). L'acoustique de l'habitat. Editions Le Moniteur, paris.

Comtet . J(2012). Mémoires de djembéfola: essai sur le tambour djembé au Mali ; méthode d'apprentissage du djembé avec partitions et CD. Editions L'Harmattan, Paris.

Degallaix. S (2007). Traité des Matériaux: Tome 2, Caractérisation expérimentale des matériaux, Volume 1. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Desmons. J (2003). Acoustique Pratique. Editions Parisiennes, Paris.

Dupérat. M, Polese. J.M (2008). Encyclopédie visuelle des arbres & arbustes. Edition Artémis, Paris.

Fischetti. A(2003). Initiation à l'acoustique : cours et exercices. Edition Belin, Paris.

Giancoli. D.C (1993). Physique générale. Ondes, optiques et physique moderne. De Boeck, Louvain-la-Neuve (Belgique).

Groguennoc. A, Dalle. B (2011). Évolutions du réseau de transport d'électricité : vecteur du développement durable. Lavoisier, Paris.

Hamayon. L (2006). Réussir l'acoustique d'un bâtiment. Editions Le Moniteur, paris.

Hamayon. L (2008). Comprendre simplement l'acoustique architecturale. Editions Le Moniteur, paris.

Larousse (2010). Petit Larousse illustré, Paris.

Margollé. A, Gautier. S (2016). Traitement du signal analogique. Acoustique : Physique appliquée à l'audiovisuel. Edition Vuibert, Paris.

Munot. P, Nève F. X (2002). Une introduction à la phonétique. Editions du Céfal, Liège.

Navi. P (2006). Propriétés acoustiques des matériaux: propagation des ondes planes harmoniques. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Pritchard.T.C, Alloway K.D (2002). Neurosciences médicales: Les bases neuroanatomiques et neurophysiologiques. De Boeck université, l'université de Lille1.

Rey. P (2021). Mathématique, Statistique et Finance (2eme édition): avec Excel 2016. Demand Gmbh, Paris.

Roulet. C. A (2012). Éco-confort: pour une maison saine et à basse consommation d'énergie. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Sarzaud. S (2015). En finir avec le stress des acouphènes: Un guide pratique pour soulager les acouphènes. Eyrolles, Paris.

Schaer. E, André. J.C (2019). Un renouveau du génie des procédés 2: Recherche, Volume 2. Editions ISTE, London.

Sherwood. L (2015). Physiologie humaine. De Boeck, Louvain-la-Neuve (Belgique).

Thomas P.F (2006). Précis de physique-chimie: cours et exercices. Bréal, Paris.

Tran. B. V (1996). L'acoustique architecturale. Office des publications universitaires, Alger.

Val. M (2008). Lexique d'acoustique. Editions L'Harmattan, Paris.

Xu. Q, Huang. Y (2019). Anechoic and Reverberation Chambers: Theory, Design, and Measurements. IEEE Press, Pondicherry.

2. Thèses

Desarnaulds. V (2002). De l'acoustique des églises en Suisse : Approche pluridisciplinaire. Thèse de doctorat en Architecture, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne.

Koussa. F (2012). Evaluation de la performance acoustique des protections antibruit innovantes utilisant des moyens naturels : application aux transports terrestres. Thèse de Doctorat en Acoustique, Université de Lyon.

Ziani. A (2020). Les ambiances lumineuses, thermiques et sonores dans les medersas du Maghreb. Thèse de Doctorat en Architecture, Université Mohamed Khider, Biskra.

3. Sites d'internet

batiproduits.com

bruitparif.fr

Choclea.org

Clipedia (Youtube).

decibelmetre.info.

energieplus-lesite.be.

Google Earth.

Isolation-phonique.com.

lairdubois.fr.

opera-online.com.

paulchemetov.com.

raykingtek.com.