



Faculté de Technologie
Département d'Architecture



Thème :

Étude et optimisation du confort acoustique dans les
établissements scolaires

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master II en Architecture
« Spécialité Architecture »

Préparée par :

HACHEMI Nabila

Mr. ALLOUACHE Samir	MAA	Département d'architecture de Bejaia	Président de jury
Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine	MCB	Département d'architecture de Bejaia	Rapporteur
Mr. MERZOUG Ferhat	MAA	Département d'architecture de Bejaia	Examineur
Mme. LABRECHE Samia	MAA	Département d'architecture de Bejaia	Invité

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes très chers parents qui
m'ont soutenu et encouragé au cours de mes études,*

A mes chères adorables sœurs et frères,

A toute ma famille,

À mes chers amis(es) et camarades en architecture,

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation et la
réussite de ce travail.*

Remerciements

Je remercie tout d'abord le bon Dieu de m'avoir donné la santé, le courage, la volonté et la force pour élaborer ce travail.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine pour son encadrement, son orientation, son soutien quotidien, ses précieux conseils et ses encouragements.

Mes remerciements sincères vont aussi aux membres du jury qui ont accepté d'examiner mon travail.

Ma gratitude la plus vive à Mme ATTAR Selma ainsi que tous mes enseignants et mes collègues de département d'architecture de Bejaïa.

Je remercie profondément mes chère parents et ma famille.

Mes amis et tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer cette recherche.

Merci à toutes et à tous.

Résumé

Le confort acoustique dans le domaine de bâtiment est devenu, de nos jours, un paramètre important pour la détermination de la qualité des constructions, mais malgré son intérêt, il représente dans le domaine de bâtiment l'aspect le plus négligé dans divers pays du monde notamment en Algérie. A ce titre, les établissements scolaires sont l'un des immeubles les plus touchés par les problèmes sonores à cause d'une conception architecturale standard, ce qui résulte des effets négatifs sur le comportement des usagers ainsi que le rendement des élèves.

Pour faire face à cette situation, la recherche suivante a pour objectif d'évaluer et d'optimiser le confort acoustique dans les établissements scolaires afin d'améliorer leurs futures conceptions. Pour cela, une étude empirique a été effectuée à travers la prise des mesures sonores in situ et l'enquête par le biais d'un questionnaire, et aussi une autre étude qui est l'étude numérique par l'exploitation du logiciel de simulation acoustique RAP-ONE II dans le but d'améliorer le fonctionnement des établissements scolaires et le comportement des élèves.

Le bon choix des matériaux qui répond aux exigences acoustiques dans la conception d'une pièce tout en prenant en considération l'environnement sonore immédiat permet d'obtenir une bonne qualité sonore dans le bâtiment et une sensation de bien-être et de satisfaction des usagers. Par conséquent, les matériaux de construction ont un rôle prépondérant sur le comportement sonore d'une pièce où la performance provient de nombreux éléments et dispositifs.

Mots clés

Confort acoustique, établissement scolaire, optimisation sonore, panneaux acoustiques, ouate de cellulose, intelligibilité.

ملخص

في أيامنا هذه، أصبحت الراحة الصوتية في مجال البناء معيارًا مهمًا لتحديد جودة المباني، ولكن رغم أهميته في مجال البناء إلا أنه يمثل الجانب الأكثر إهمالاً في مختلف دول العالم ولا سيما الجزائر. ففي هذا السياق، نجد المدارس التي تعتبر واحدة من أكثر المباني تضرراً من مشاكل الضوضاء بسبب التصميم المعماري الموحد، مما يؤدي إلى ظهور آثار سلبية على سلوك المستخدمين وكذلك على أداء التلاميذ.

للتعامل مع هذا الموقف، يهدف البحث التالي إلى تقييم وتحسين الراحة الصوتية في المدارس من أجل الحصول على تصاميم مستقبلية نموذجية. للقيام بذلك، فقد تم الاعتماد على دراسة تجريبية من خلال أخذ قياسات متعلقة بالصوت في الموقع والتحقق منها بواسطة الاستبيان، وعلى دراسة أخرى وهي الدراسة الحاسوبية عن طريق استخدام برنامج المحاكاة الصوتية RAP-ONE II بهدف تحسين طريقة عمل المدارس وعلى سلوك التلاميذ.

إن الاختيار الصحيح للمواد التي تستجيب للمعايير الصوتية في تصميم الغرفة مع مراعاة البيئة الصوتية المحيطة بها، يؤدي إلى تحسين جودة الصوت في المبنى وشعور المستخدمين بالرفاهية والراحة. لذلك، فإن مواد البناء لها دور أساسي في التحكم بالسلوك الصوتي للغرفة حيث يعتمد أداؤها على العديد من العناصر والتقنيات.

الكلمات المفتاحية

الراحة الصوتية، مؤسسة تعليمية، تحسين الصوت، الألواح الصوتية، صوف قطني سليلوز، وضوح .

Abstract

The acoustic comfort in the field of building has become, nowadays, an important parameter for the determination of the constructions quality, but in spite of its interest, it represents in the field of building the most neglected aspect in various countries of the world notably in Algeria. As such, schools are one of the buildings most affected by noise problems because of a standard architectural design, these results have negatives effects to the behavior of the users as well as the performance of the students.

To face this situation, the following research aims to evaluate and optimize acoustic comfort in schools in order to improve their future acoustic designs. To this, an empirical study has been adopted in this research through the taking of sound measurements in situ and the survey through a quiz, and on another study which is the numerical study through the exploitation of the acoustic simulation software RAP-ONE II in order to improve the functioning of the schools and the behavior of the students.

The right choice of materials that meets the acoustic requirements in the design of a patch while taking into consideration the immediate sound environment allows to get a good sound quality in the building and a well-being feeling and satisfaction of users. Therefore, the construction materials have a preponderant role on the sound behavior of a patch where the performance comes from many component and devices as well as sound insulators.

Key words

Acoustic comfort, school building, sound optimization, acoustic panels, cellulose wadding, intelligibility.

Table des matières

Résumés	i
Table des matières	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xii
Nomenclature	xiii

CHAPITRE INTRODUCTIF

1. Introduction	1
2. Problématique.....	2
3. Hypothèses	3
4. Contexte et objectifs de la recherche.....	3
5. Analyse conceptuelle.....	3
6. Méthodologie	4
7. Structure du mémoire	5

PREMIÈRE PARTIE : THEORIQUE

CHAPITRE I : Les notions de base de l'acoustique

Introduction	7
I.1. Définition de l'acoustique.....	7
I.2. Histoire de l'acoustique	7
I.3. Notions de base de l'acoustique.....	9
I.3.1. Le son	9
I.3.1.1. Fréquence de son	9
I.3.1.2. Niveau de son	10
I.3.1.3. Type de son.....	11
I.3.2. Le bruit	11
I.3.2.1. Sources et types de bruit	12
I.3.2.2. Règles pour additionner les niveaux de bruit	13

I.3.2.3. Effet de bruit	14
I.3.2.4. Mesure de bruit	15
I.3.2.4.1. Décibel.....	16
I.3.2.4.2. Décibel pondéré A	17
I.3.2.4.3. Sonomètre.....	18
I.3.3. Le système auditif (physio de l'acoustique).....	19
I.3.4. Perception des sons	19
I.3.5. Propagation de son	20
I.3.5.1. Propagation du son dans un espace libre	21
I.3.5.2. Propagation du son dans un espace clos	22
I.3.5.2.1. Réflexion, absorption et transmission du son	22
I.3.5.2.2. Diffraction et réfraction	24
I.3.5.2.3. Durée de Réverbération	24
I.3.5.2.4. Echo	25
I.3.6. Pression acoustique	26
I.3.7. Puissance acoustique	27
I.3.8. Intensité acoustique	27
I.4. Réglementation algérienne pour la lutte contre le bruit	27
I.4.1. Les lois	27
I.4.2. Les arrêtés	28
I.4.3. Les décrets exécutifs	28
I.4.4. Le document technique réglementaire DTR C 3.1.1.....	29
Conclusion.....	29

CHAPITRE II : Le confort acoustique dans les établissements scolaires

Introduction	30
II.1. Le confort acoustique	30
II.1.1. Conditions de confort acoustique.....	30
II.2. Les stratégies de la conception acoustique dans les bâtiments.....	31
II.2.1. Isolation acoustique	31
II.2.1.1. Principe de l'isolation acoustique	31
II.2.1.2. Les types d'isolement acoustique.....	32
II.2.1.2.1. Isolement acoustique brut Db.....	32
II.2.1.2.2. Isolement acoustique normalisé Dn	33
II.2.1.2.3. Isolement acoustique standardisé DnT.....	33

II.2.1.3. L'isolation acoustique des locaux contre les bruits aériens	33
II.2.1.3.1. Modes de transmission des bruits aériens	35
II.2.1.3.2. Facteurs influançant sur l'isolation aux bruits aériens	36
II.2.1.4. Principes de l'isolation acoustique des bruits solidiens	37
II.2.1.5. Principes de l'isolation acoustique des bruits d'équipement	39
II.2.1.5.1. Les bruits des équipement sanitaire	39
II.2.1.5.2. Les bruits des équipements technique du batiment	40
II.2.2. La correction acoustique	40
II.2.2.1. L'objectif de la correction acoustique.	40
II.2.2.2. Principes de la correction acoustique	41
II.2.2.3. Absorption	41
II.2.2.3.1. Les matériaux absorbants	41
II.2.2.3.2. Diffusion.....	44
II.2.2.3.3. Traitement des locaux	44
II.3. Le confort acoustique dans les milieux scolaire	45
II.3.1. Source de bruit dans les équipements scolaires	45
II.3.2. Réglementation du confort acoustique dans les équipements scolaires	46
II.3.2.1. Intelligibilité	46
II.3.2.2. Temps de réverbération	47
II.3.2.3. Isolement acoustique vis-à-vis de l'environnement extérieur et entre locaux....	48
II.3.3. Spécificités acoustiques des différents espaces	49
II.3.3.1. Salle de classe	49
II.3.3.2. Cantine.....	50
II.3.3.3. Espaces de circulation	50
II.3.3.4. Amphithéâtre	51
II.3.3.5. Gymnase scolaire.....	52
II.3.3.6. Bibliothèque.....	53
Conclusion	53

DEUXIÈME PARTIE : PRATIQUE

CHAPITRE III : Etude empirique du confort acoustique dans les établissements scolaires

Introduction	54
III.1. Présentation de cas d'étude	54
III.1.1. Situation.....	54
III.1.2. Environnement immédiat	55
III.1.3. Description de cas d'étude.....	56
III.1.4. Analyse acoustique de la salle de classe.....	58
III.2. Méthodologie d'étude du confort acoustique.....	60
III.2.1. Etude quantitative du confort acoustique	60
III.2.1.1. Déroulement et protocole de prise de mesure	61
III.2.1.2. Instrument de prise de mesure	63
III.2.2. Etude qualitative du confort acoustique (le questionnaire)	64
III.2.2.1. Objectif de questionnaire.....	64
III.3. Résultats et interprétations	65
III.3.1. Etude quantitative du confort acoustique	65
III.3.2. Etude qualitative du confort sonore (le questionnaire).....	69
Conclusion.....	76

CHAPITRE IV : Optimisation du confort acoustique dans les établissements scolaires

Introduction	77
IV.1. Présentation du logiciel de simulation RAP-ONE II	77
IV.2. Etude paramétrique des composants de la paroi	80
IV.2.1. Etude de modèle de référence	81
IV.2.1.1. Simulation de modèle de référence.....	82
IV.2.1.2. Résultats et interprétation de simulation de modèle de référence	83
IV.2.2. Etude de l'impact d'un isolant (ouate de cellulose)	86
IV.2.2.1. Simulation de modèle avec un isolant (ouate de cellulose).....	86
IV.2.2.2. Résultats et interprétation de simulation de modèle avec un isolant (ouate de cellulose).....	88
IV.2.3. Etude de l'impact des panneaux absorbants.....	90
IV.2.3.1. Simulation de modèle traité par des panneaux absorbants	90
IV.2.3.2. Résultats et interprétation de simulation de modèle traité par des panneaux absorbants	92
Conclusion.....	95

Conclusion générale	96
Recommandations	98
Les limites de la recherche	98
Perspectives de recherche.....	99
Bibliographie	100
Annexes	105
Annexe A.....	105
Annexe B.....	106
Annexe C.....	109
Annexe D.....	111

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'analyse conceptuelle	4
Figure 2 : Schéma de la structure du mémoire	6
Figure I.1 : Catégories du son selon la fréquence	10
Figure I.2 : Puissance du son selon le niveau	10
Figure I.3 : Décomposition d'un son complexe en trois sons purs	11
Figure I.4 : Les niveaux sonores de bruit en fonction de la fréquence	12
Figure I.5 : Les facteurs qui influencent la perception d'un bruit	12
Figure I.6 : Les sources de bruit	13
Figure I.7 : Les effets des bruits sur la santé	15
Figure I.8 : L'échelle logarithmique de décibel	16
Figure I.9 : Courbes de pondération	17
Figure I.10 : L'évolution de l'instrument sonomètre	18
Figure I.11 : Structure interne de système auditif	19
Figure I.12 : Perception du bruit et sensibilité de l'oreille	20
Figure I.13 : Sources sonores linières et ponctuelles	22
Figure I.14 : Propagation des ondes sonores	23
Figure I.15 : Diffraction et réfraction d'ondes incidentes	24
Figure I.16 : Durée de réverbération	25
Figure I.17 : les parcours des ondes sonores produisant l'écho par la réflexion des murs	26
Figure II.1 : Mesure de l'isolement brut entre deux locaux	32
Figure II.2 : L'effet de loi de masse sur la transmission du bruit	34
Figure II.3 : Principe masse-ressort-masse	34
Figure II.4 : L'effet de l'étanchéité sur la transmission de bruit	35
Figure II.5 : Modes de transmission du bruit	35
Figure II.6 : Influence de la surface de mur de séparation sur l'isolation	36
Figure II.7 : Influence de volume du local de réception sur l'isolation	36
Figure II.8: Influence des transmissions latérales sur l'isolation	37
Figure II.9 : Voies des transmissions parasites	37
Figure II.10 : Revêtement du sol pour lutter contre les bruits de choc	38
Figure II.11 : Isolation acoustique de plancher	38
Figure II.12 : Le plafond suspendue	39
Figure II.13 : Matériau poreux	42
Figure II.14 : Courbes typique de coefficient d'absorption α pour les trois catégories de matériau absorbant	42
Figure II.15: Système absorbant résonateur	43
Figure II.16 : Schéma d'une membrane (liège)	44

Figure II.17 : Source de bruit dans les écoles	46
Figure II.18 : Solution pour une meilleure intelligibilité	47
Figure II.19 : Salle de cours avec et sans traitement acoustique.....	49
Figure II.20 : Traitement acoustique d'une cantine scolaire.....	50
Figure II.21 : Disposition des matériaux absorbants dans la circulation	51
Figure II.22 : Traitement acoustique d'un amphithéâtre.....	52
Figure II.23 : Traitement acoustique d'un gymnase	52
Figure III.1 : Situation géographique de lycée	54
Figure III.2 : Les nuisances sonores influants sur le fonctionnement de lycée.....	55
Figure III.3 : Fonctionnement des blocs de lycée Issad Ahmed O Bachir.....	57
Figure III.4 : Lycée Issad Ahmed O Bachir	57
Figure III.5 : Plan type d'une salle de classe.....	58
Figure III.6 : Vue en coupe des composantes des parois et de plancher de la salle de classe .	59
Figure III.7 : Le mobilier exploité dans les salles de classe.....	59
Figure III.8 : L'emplacement de la salle de classe étudié	61
Figure III.9 : La grille tracée pour la prise des mesures.....	62
Figure III.10 : Application sonomètre utilisée pour la prise de mesure	63
Figure III.11 : Calibrage entre les résultats obtenus par l'instruments et l'application lors d'une essaie	64
Figure III.12 : Carte de résultats lors d'un scénario du calme	66
Figure III.13 : Carte de résultats lors d'existence de bruit interne	67
Figure III.14 : Carte de résultats avec l'existence de bruit externe.....	68
Figure III.15 : La sensation d'écoute des élèves dans la salle de classe	70
Figure III.16 : Les sources de bruit au sein de lycée.....	71
Figure III.17 : Les horaires sensible au bruit	71
Figure III.18 : Sensation des élèves par rapport au phénomène de réverbération et d'écho dans une salle de classe	72
Figure III.19 : Le niveau de gêne de la répétition du son.....	73
Figure III.20 : Les paramètres affectés par le bruit scolaire.....	74
Figure III.21 : Le niveau de bruit lors de l'ouverture et la fermeture des fenêtres	75
Figure III.22 : Satisfaction acoustique vis-à-vis le problème de bruit	75
Figure IV.1 : Le logiciel de simulation exploité et son développeur	78
Figure IV.2 : L'interface graphique de logiciel avec le modèle à simuler.....	78
Figure IV.3 : Format de modèle à importer vers le logiciel.....	79
Figure IV.4 : Les entrées et les sorties de modèle simuler.....	79
Figure IV.5 : La forme de modèle de référence dans l'interface de logiciel RAP-ONE II.....	81
Figure IV.6 : Insertion des propriétés acoustique de chaque matériau de la salle de classe	82
Figure IV.7 : Identification de toutes les étapes pour le passage à la simulation.....	83
Figure IV.8 : La carte de bruit obtenus pour le modèle de référence.....	84
Figure IV.9 : Le niveau sonore relative au modèle de référence	85

Figure IV.10 : Le temps de décroissance initiale relative au modèle de référence	85
Figure IV.11 : Cloison emplie de laine de cellule avec 02 plaque du plâtre.....	86
Figure IV.12 : Insertion d'un espace sonore extérieure et la ouate de cellulose dans la composition de la paroi du modèle témoin	87
Figure IV.13 : La carte de bruit obtenus pour le modèle isolé avec la ouate de cellulose	88
Figure IV.14 : Le niveau sonore relative au modèle isolé en ouate de cellulose	89
Figure IV.15 : Le temps de décroissance initiale relative au modèle isolé en ouate de cellulose	89
Figure IV.16 : Schéma sur le fonctionnement d'un panneau acoustique.....	91
Figure IV.17 : Insertion des panneaux acoustiques dans les parois du modèle témoin	92
Figure IV.18 : La carte de bruit obtenus pour le modèle traité par des panneaux acoustiques	93
Figure IV.19 : Le niveau sonore relative au modèle traité par des panneaux acoustiques	93
Figure IV.20 : Le temps de décroissance initiale relative au modèle traité par des panneaux acoustiques	94

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Addition de deux niveaux sonores	14
Tableau I.2 : Célérité du son dans les différents milieux	21
Tableau II.1 : Durée de réverbération à respecter dans les établissements d'enseignements ..	48
Tableau III.1. : Les coefficients d'absorption des matériaux (α)	60
Tableau IV.1 : Comparaison entre les coefficients d'absorption acoustique de deux isolants	87
Tableau IV.2 : Coefficient d'absorption acoustique de panneau acoustique rigide	91

Nomenclature

Abréviations

OMS: Organisation mondiale de la santé.

DTR : Document Technique Réglementaire.

VMC : Ventilation Mécanique Controlée.

PISA : Programme Internatinal pour le Suivi des Acquis des Elèves.

STI : Speech Transmission Index (Indice de Transmission de la Parole).

EDT : Early Decay Time (Temps de Décroissance Initiale).

Indices

L_p Niveau de pression acoustique (dB).

C Célérité du son (m/s).

T_r Temps de réverbération (s).

A Aire d'absorption équivalente (m^2).

P_{eff} Pression effective (Pa).

I Impression acoustique (W/m^2).

$dB(A)$ Décibel pondéré A (dB).

F_0 Fréquence propre de résonateur (Hz).

R Indice d'affaiblissement acoustique (dB).

D_b Isolement acoustique brut(dB).

D_n Isolement acoustique normalisé (dB).

D_{nT} Isolement acoustique standardisé (dB).

Symboles

β Coefficient de réflexion acoustique.

α Coefficient d'absorption acoustique.

τ Coefficient de transmission acoustique.

CHAPITRE INTRODUCTIF

Chapitre introductif

1. Introduction

L'acoustique est une science physique qui cherche à étudier les sons (propagation, directions et effets). Elle n'est pas une notion récente, puisque la propagation du son dans l'espace est prise en compte depuis l'antiquité ; le savant PYTHAGORE avait initié cette science en étudiant les cordes vibrantes, il a été suivi plus tard par l'architecte VITRUVÉ qui est été le premier à penser au cheminement du son dans les théâtres. Après cette ère, de nombreuses recherches se sont intéressés au domaine de l'acoustique et c'est aux alentours du 19eme siècle que les bases du son et du bruit ont été prise en considération et bien maîtrisés (Hamayon, 2014). Aujourd'hui, ce domaine compris une grande importance dans les différents secteurs d'activités, tels que : bâtiment, télécommunication, automobile, aéronautique, médecine de l'audition, l'instrument de spectacle, instrument et musique, etc. Cette dernière, par exemple, se base sur le son pour répondre à un plaisir, mais elle provoque des dangers lorsque le volume est trop élevé (Decamps, 2016).

Les préoccupations acoustiques sont rarement considérées dans la conception architecturale et urbaine, sauf lorsqu'il s'agit des bâtiments spécifiques, tels que : les salles de concert, les salles de réunion, ...etc., qui pensent et posent la question sur ce paramètre. Mais dans les espaces publics et dans l'habitat, le confort des usagers liée à l'aspect acoustique n'était plus pris en compte, il est basé juste sur le visuel, portant on connaît bien que les sourdes s'ennuient en regardant la mer, tandis que les aveugles n'ont aucune envie de se séparer du bruit des vagues et du vent, comme Delarue (2005) a affirmé, dans un colloque, que rarement le sens de l'audition est pris en compte.

Les nuisances sonores qui représentent la gêne dans les centres urbains sont dues aux différentes sources, premièrement on cite les riverains, puis on trouve, par exemple, les aéroports qui provoquent la pollution sonore lors de décollage d'un avion, ...etc., en conséquence, plusieurs sociétés demandent la diminution de bruit et la résolution des problèmes de propagation acoustique (Robardet, 2010). L'acoustique architecturale a pour but de favoriser l'écoute ou d'apporter la protection contre le bruit dans les bâtiments (Hamayon, 2010), puisque le bruit a une influence importante sur le confort des usagers, leurs qualités de vie ainsi que leurs performances et leurs santé, donc il est essentiel de prendre ce paramètre en compte afin

d'assurer un bon environnement sonore et d'éviter ses nombreuses agressions sur la vie quotidienne de la population surtout celle des jeunes scolarisés.

Les établissements scolaires sont l'un des bâtiments que l'on rencontre le plus fréquemment, soit dans le paysage urbain ou rural. Ils représentent l'un des exemples des bâtiments publics les plus sensibles en paramètre de l'acoustique (Lavandier et al., s.d.), ce qui veut dire qu'ils doivent être conçus selon un sens pour qu'ils soient un milieu de passage qui mêle le plaisir, l'émerveillement, l'écoute et les sentiments (Durpaire & Mabilon-Bonfils, 2017), afin de favoriser les apprentissages et pour qu'il n'influe pas sur ses usagers surtout les élèves, parce que le bruit interfère avec l'expérience scolaire et a des impacts négatifs sur la concentration, le stress, les troubles de comportement et la fatigue des élèves (Clotuche, 2015).

2. Problématique

En architecture, l'étude de l'aspect acoustique des bâtiments est très importante pour le traitement de certains espaces de l'écoute, tels que : les salles de spectacle (cinéma, opéra, théâtre, etc.), les lieux publics (salle de sport, salle de classe, ...), afin d'offrir les meilleures conditions de confort, une bonne intelligibilité de la parole et une isolation au bruit extérieur. En Algérie, d'après Gramez (2010), les pouvoirs publics ont pris en compte les problèmes concernant les gênes sensorielle dues aux bruits dès 1983 ; mais selon des constats, l'aspect acoustique, qui est un paramètre primordial lors de la conception des projets de construction tels que les espaces de spectacle et les établissements d'enseignements, a été largement négligé.

Les établissements scolaires représentent les lieux d'apprentissage pour les élèves, là où ils passent la majorité de leurs temps et là où ils commencent à découvrir le monde. Ils sont des lieux clés pour développer la communication, la compréhension et l'écoute de l'enfant. L'architecture de ses milieux doit prendre en compte les différents paramètres du confort (acoustique et visuel) à proportions égales afin d'assurer les performances et le bien-être des élèves et des enseignants. Le confort acoustique dans les espaces scolaire n'est pas des moindres, il doit être pensé dès la phase amont du projet, la négligence de l'aspect acoustique peut avoir des conséquences considérables négatives sur les usagers (élèves, enseignants) qui souffriront des apparences d'instabilité, d'agressivité et d'agitations psychomotrices.

Les établissements scolaires d'aujourd'hui contiennent un niveau de bruit très élevé qui est due à des causes externe par l'implantation des écoles à proximité des axes routières, des carrefours sans les tenir en considération lors de la conception, ou à des causes internes qui sont liées à l'aménagement des espaces, ou on trouve des salles rectangulaires très hautes, qui sont

faites d'une manière standardisée en utilisant des matériaux qui ne répond pas aux règles de la protection phonique, et aussi aux divers fonctions (music, sports, ateliers, ...) qui sont mets à la disposition des élèves et qui rendent l'espace très bruyant.

En Algérie, les constructions d'enseignements sont conçues juste pour répondre au problème de besoin en infrastructure scolaire toutes en négligeant la partie qui répond au confort, en utilisant des matériaux qui rend les salles trop bruyantes et qui réfléchissent les sons afin de faire des espaces ouverts sans prendre en considération les contions sonores de l'espace intérieur et extérieur.

Cela nous incite a posé la question suivante :

- **Quels sont les paramètres et les éléments d'optimisation du confort acoustique ?**

3. Hypothèses

Afin de répondre à la problématique, on propose l'hypothèse suivante :

- Il apparait que les matériaux de constructions des établissements scolaires et leurs caractéristiques physiques affectent sur la qualité du confort acoustique et la propagation du son.

4. Contexte et objectifs de la recherche

La recherche se focalise sur l'étude et l'optimisation de confort acoustique dans les établissements scolaires et plus précisément dans les lycées qui sont situés à Bejaïa, dans un contexte urbain dense.

L'objectif de la recherche est de :

- Elaborer l'état de confort acoustique dans les établissements scolaires (diagnostique sur la situation acoustique dans les établissements d'enseignements).
- Comprendre et optimiser le fonctionnement acoustique toute en le assurant dans les établissements scolaires.

5. Analyse conceptuelle

L'analyse conceptuelle permet de déterminer les concepts de la recherche qui constitue la base sur laquelle se focalise le travail pour les rendre mesurable. A partir de l'analyse conceptuelle nous pouvons déterminer les éléments à analyser, et la méthodologie la plus appropriée pour le faire (figure 1).

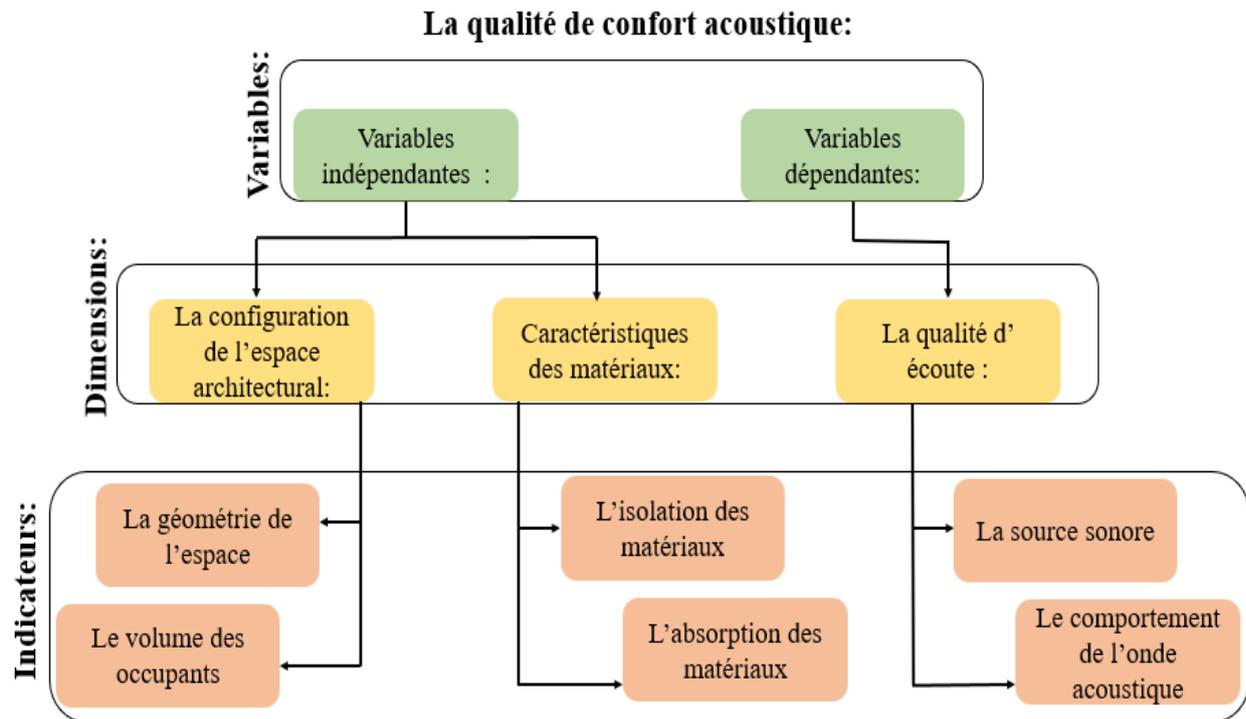


Figure 1 : Schéma de l'analyse conceptuelle (Source : Auteur, 2021)

6. Méthodologie

Afin de répondre aux questions posées, de confirmer ou infirmer les hypothèses et d'atteindre les objectifs de la recherche, le travail est organisé selon la méthodologie suivante :

➤ La partie théorique :

La partie théorique sera consacrée à la partie introductive et théorique qui se base sur :

- **La recherche bibliographique** : qui s'appuie sur des divers documentations (livres, articles, thèses, revues, etc.) qui permettent de définir et expliquer les différents concepts du thème de recherche, notamment : l'acoustique et l'établissement scolaire.

➤ La partie pratique :

La partie pratique sera consacrée au cas d'étude qui se base sur :

- **L'approche empirique** qui inclus :
 - Etude quantitative : à travers la prise des mesures dans un cas existant réel (lycée à Sidi Ali Lebhar) par une application sonomètre.
 - Etude qualitative : par l'utilisation de questionnaire qui va être destinés aux enseignants et aux élèves afin d'évaluer la satisfaction et la sensation des usagers vis-à-vis le confort acoustique.

- **L'approche numérique** : qui permet d'évaluer et d'optimiser le confort acoustique dans les établissements scolaires à travers l'utilisation du logiciel de simulation RAP-ONE II, et à partir des résultats on peut valider ou infirmer les hypothèses et aboutir aux recommandations de projet à concevoir.

7. Structure du mémoire

Afin d'atteindre les objectifs attendus, la recherche est structurée en deux parties qui contiennent quatre chapitres en plus d'un chapitre introductif et une conclusion générale.

- **Un chapitre introductif** : contient l'introduction général, la problématique et les hypothèses de la recherche, et définit son contexte et ses objectifs puis il montre l'analyse conceptuelle, la méthodologie de recherche et la structure de mémoire.

- **La première partie :**

- **La partie théorique** se compose de deux chapitres :

- **Le premier chapitre : les notions de base de l'acoustique** qui inclus les générations sur l'acoustique (bruit, son, etc.).

- **Le deuxième chapitre : le confort acoustique dans les établissements scolaires** ou on représente les paramètres qui influent sur le confort acoustique, les techniques architecturales, les stratégies et les matériaux utilisés pour un meilleur confort acoustique.

- **La deuxième partie :**

- **La partie pratique** porte deux chapitres :

- **Le troisième chapitre : étude empirique du confort acoustique dans les établissements scolaires** qui montre premièrement les normes algériennes de construction des lycées puis les mesures prise dans le cas étudié ainsi que leurs interprétations.

- **Le quatrième chapitre : optimisation du confort acoustique dans les établissements scolaires** qui contient la méthodologie de simulation du confort acoustique et l'exploitation des résultats obtenus afin de les améliorer.

- **La conclusion générale** : qui synthétise tous les résultats et présente les recommandations de la recherche.

La figure 2 montre un schéma qui résume la structure de ce mémoire.

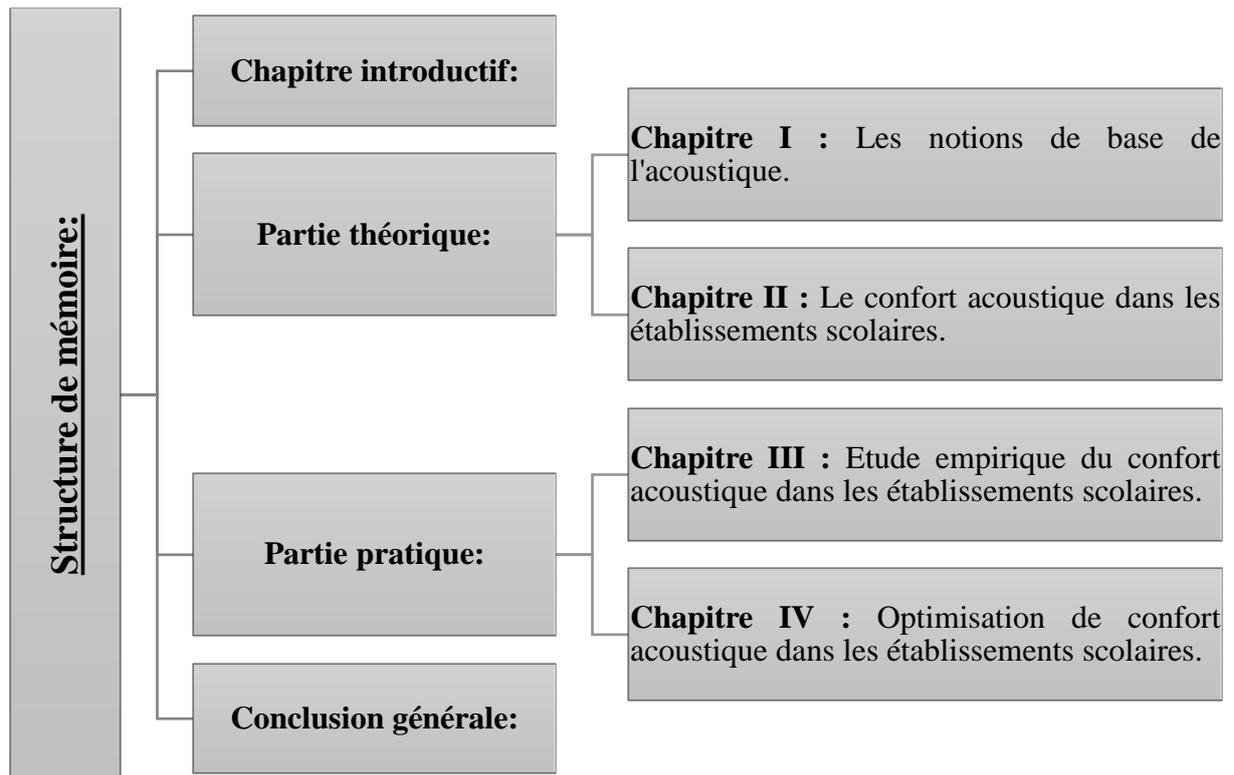


Figure 02 : Schéma de la structure du mémoire (Source : Auteur, 2021)

PREMIÈRE PARTIE : THEORIQUE

CHAPITRE I :

Les notions de base de l'acoustique

« Notre science a toujours voulu surveiller, compter, abstraire et castrer les sens, en oubliant que seule la vie est bruyante et que seule la mort est silencieuse » (Attali, 1977).

CHAPITRE I : les notions de base de l'acoustique

Introduction

L'ouïe est parmi les cinq sens externes qui lie entre l'être humain et son environnement sonore où il n'y a pas lieu au silence absolu. Il est un sens précieux mais très souvent abandonnés dans les différents domaines de la vie. Les sons et les bruits sont des phénomènes physiques que nous les rencontrons toujours dans notre vie quotidienne, ils reflètent le moyen le plus favori pour l'échange de l'information et la communication. Dans ce chapitre, nous allons mettre en valeur les notions de base de l'acoustique à travers l'étude de tous ce qui concerne le son, sa propagation, sa transmission, ses phénomènes physiologiques, aussi la notion de bruit qui est considéré comme une source de gêne ainsi que les différents indices et indicateurs de la performance acoustique, tout en concluant ce chapitre ; qui permet de comprendre cette discipline ; par les réglementations algériennes prévoyant la lutte de phénomène du bruit.

I.1. Définition de l'acoustique

L'acoustique architecturale signifie l'ensemble des propriétés d'un local pour étudier des différents problèmes physiques, physiologique et psychologique d'émission, de propagation et de perception des sons dans le but de favoriser l'écoute et de se protéger contre le bruit quand il est une source de gêne (Hamayon, 2006).

I.2. Histoire de l'acoustique

Les phénomènes liés à l'acoustique sont l'objet d'étude depuis fort longtemps, ils sont débutés de plus de 2000 ans. Grace aux grands efforts de nombreux chercheurs et théoriciens à travers plusieurs siècle, le son est marqué comme un phénomène physique intéressant. Parmi quelques points d'histoire qui témoignent l'évolution de la science d'acoustique au fil du temps on cite :

- **Pythagore** (550 av. JC) : Il est le premier philosophe grec qui a relié les mathématique et la musique où il a mené ses premières études sur les cordes vibrantes en collaboration avec ses disciples et ils ont remarqué l'existence d'une corrélation entre la longueur d'une corde, la

tonalité et la tension qu'elle émet. L'école pythagoricienne définit les intervalles remarquables entre les diverses hauteurs de sons et les rapports de longueurs de ses cordes sonores.

- **Aristote** (384-322 av. JC) : Il s'intéresse au phénomène d'écho, espérant qu'il avait raison qu'il était le résultat de la réflexion des sons par des obstructions.

- **Vitruve** (80-15 av. JC) : Il est un architecte romain qui suppose que le son est une forme d'onde avertissant du mouvement du corps qui se transmet par le mouvement de l'air.

L'acoustique a détaché de l'art musical à partir de XVII^e siècle et a devenu la science de phénomène sonore grâce au développement de la mécanique.

- **Galilée** (1564-1642) : C'est l'un des premiers à définir les principales généralités de l'acoustique. Il a décrit la vibration des corps, le concept de résonance ainsi que les vibrations avec sympathie. Il a étudié le lien entre la hauteur sonore produit et la longueur de la corde lorsqu'elle vibre en déclarant que la hauteur du son correspond à un certain nombre des vibrations par l'unité de temps.

- **Mersenne** (1588-1648) : Il était connu par les lois des cordes vibrantes et la détermination des fréquences du son émis.

- **Boyle** (1627-1691) : Il a déterminé après son expérience de la cloche à vide que le vide représente un obstacle pour la propagation du son ce qui veut dire que ce dernier nécessite un milieu comme l'air pour sa propagation.

- **Sauveur** (1653-1716) : Il a désigné la science qui étudie le son en général sous terme de « l'acoustique » au lieu le terme de « la musique » qui étudie le son parce qu'il est agréable à l'audition.

- **Newton** (1642-1727) : Il estime que la corde vibrante produit le son et il a déterminé la première formule mathématique des phénomènes liés à l'acoustique pour les calculs de la vitesse du son.

- **D'Alembert** (1717-1783), **Euler** (1707-1783), **Bernoulli** (1700-1782) et **Lagrange** (1736-1813) : Ils ont établi une formulation mathématique de la théorie de la propagation des ondes grâce à l'équation de dérivée partielle découverte par Alembert.

- **Fourier** (1768-1830) : Il a étudié les diverses fonctions périodiques du son (le son pur et réaliste ainsi que leurs caractéristiques) qui permettent une meilleure compréhension de la théorie du l'audience.

- **Helmholtz** (1821-1894) : Il est un acousticien et physiologiste qui a révolutionné et développé l'acoustique par ses écrits.
- **Rayleigh** (1824-1919) : Il a critiqué le théorème de Fourier en disant qu'il n'est pas évident dans son livre « *A Theory of Sound* » où se rencontre les grands développements que l'acoustique a connus.
- **Sabine** (1868-1919) : Il est le fondateur de l'acoustique architecturale au début de XX^{ème} siècle, par sa propagation de la notion du « temps de réverbération » en 1900.
- **Fletcher** (1884-1981) : Il est un physicien acousticien qui a établi les bases de la psychoacoustique moderne par ses études sur la perception de la parole et il a démontré l'effet du masque (Duhamel, 2022 ; Flandrin, 2007).

I.3. Notions de base de l'acoustique

I.3.1. Le son

Le son est un ensemble de sensations auditives provoquées par la variation périodique de la pression de l'air à proximité de l'oreille. Cette oscillation peut être qualifiée par son intensité (niveau sonore, en décibel : dB), sa fréquence (entre 20 et 20 000 Hz pour les êtres humains) et son timbre (variété qualitative liée à la nature de la vibration) (Liébard & De Herde, 2005).

Donc le son est un phénomène de vibration acoustique capable de provoquer une sensation auditive. Ce phénomène se divise en trois étapes : l'émission, la propagation et la réception. Il se caractérise par le niveau sonore, la fréquence et la durée (Hamayon, 2006 ; Auffret, 2015).

I.3.1.1. Fréquence de son

La fréquence d'un son correspond au nombre d'oscillation de la pression autour de celle de l'air par seconde, elle s'exprime en hertz (Hz). La période T présente le temps entre deux oscillations en seconde (Rapin, 2017).

La notion physique de la fréquence indique la notion physique de la hauteur du son (figure I.1).

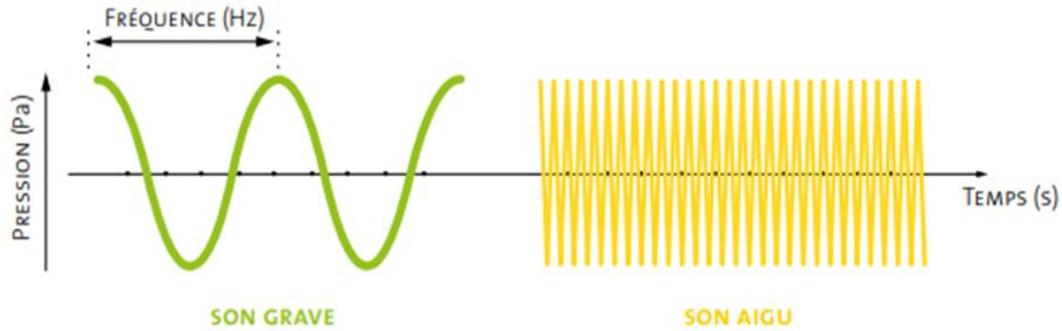


Figure I.1 : Catégories du son selon la fréquence (Source : www.isover.fr)

Ce phénomène physique se classe selon trois catégories :

- Un son grave est produit par une basse fréquence et une longue période T.
- Un son médium est produit par une moyenne fréquence et une moyenne période T.
- Un son aigu est produit par une haute fréquence et une courte période T (Jedidi, 2017).

I.3.1.2. Niveau de son

Le niveau sonore (le niveau de pression acoustique) décrit l'amplitude d'un son ; lorsque l'amplitude est importante, le son sera fort et une amplitude faible crée un son faible ; (figure I.2). Il s'exprime en décibel (dB) par la formule suivante :

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2$$

Avec :

- L_p : Niveau de pression acoustique (dB) ;
- P : Pression acoustique de l'onde (Pa) ;
- P_0 : Pression acoustique de référence qui égale à 2.10^{-5} Pa ;
- Log : Logarithme décimal (Jedidi, 2017).

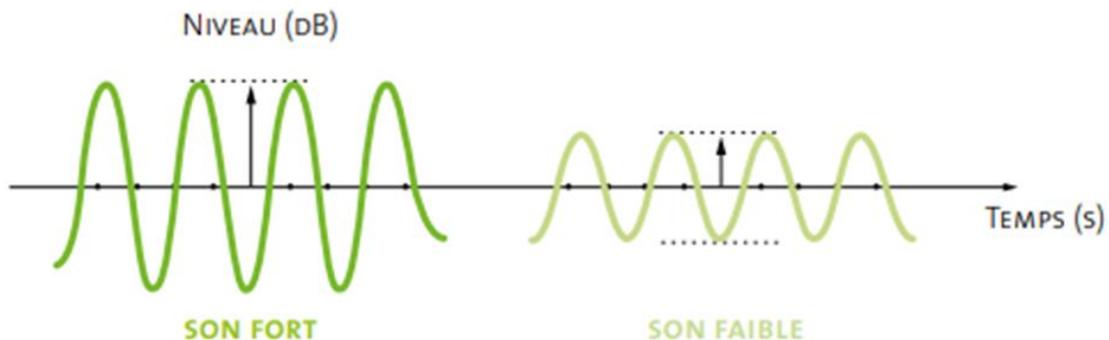


Figure I.2 : Puissance du son selon le niveau (Source : www.isover.fr)

L'amplitude sonore est indiquée par une échelle logarithmique dans la pratique parce que l'échelle de la perception de l'oreille humaine est très large et la sensation varie selon le logarithme d'excitation (Hamayon, 2014).

I.3.1.3. Types de son

Dans la science de l'acoustique, il existe deux différents types des sons : les sons purs et les sons complexes. La figure cidessous montre la combinaison des sons purs afin d'obtenir un son complexe.

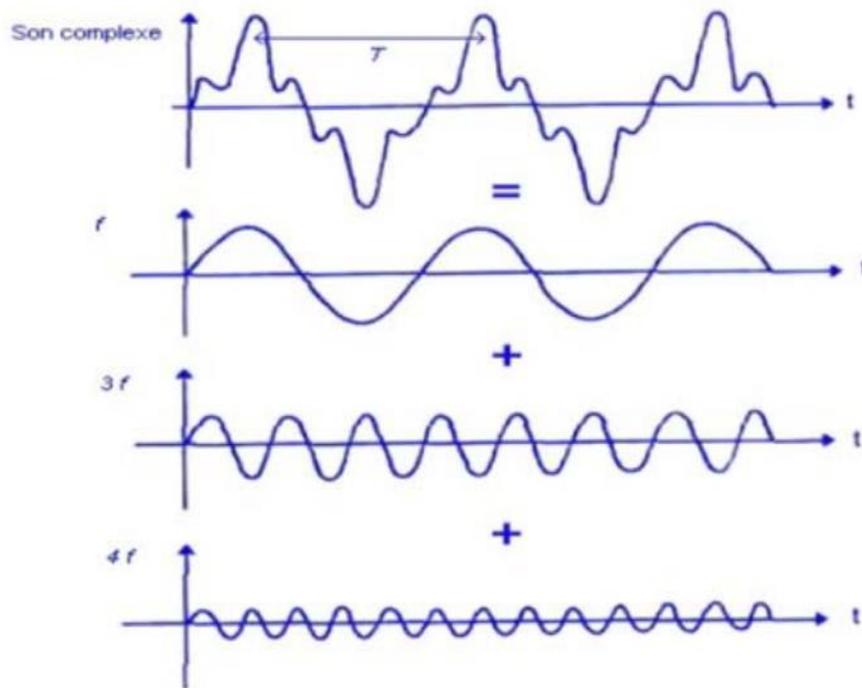


Figure I.3 : Décomposition d'un son complexe en trois sons purs (Source : Van-Tran, 1996)

- Le son pur : c'est un son émis à une seule fréquence par exemple par un diapason, où les ondes qui le compose sont de forme sinusoïdale et sont très désagréable à l'ouïe. Dans la nature, ce type de son n'existe pas.
- Le son complexe : c'est l'ensembles des sons périodiques émis sur plusieurs fréquences, où les ondes sont non sinusoïdales. Les sons complexes sont représentés par la superposition de plusieurs sons purs, dont leurs niveaux sonores et leurs fréquences sont différents (Hamayon, 2014).

I.3.2. Le bruit

Le bruit est une sensation auditive engendrée par une combinaison de plusieurs sons complexes non harmoniques, il contient l'ensemble des fréquences à des divers niveaux. Les

bruits sont des signalisations qui sont inutiles ou nuisibles aux humains en interférant avec leur activité normale (Figure I.4) (Matthieu, 2016 ; Van-Tran, 1996).

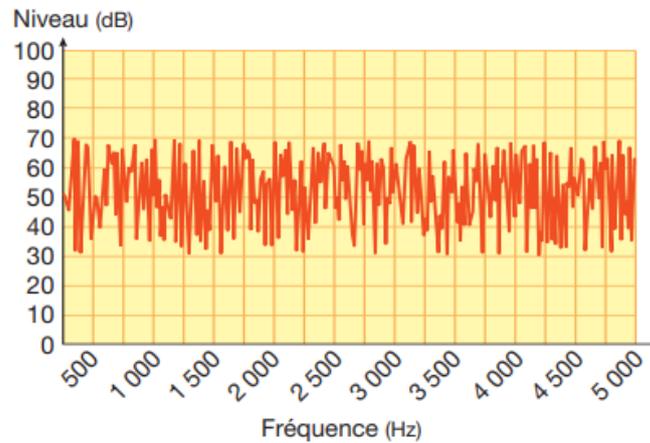
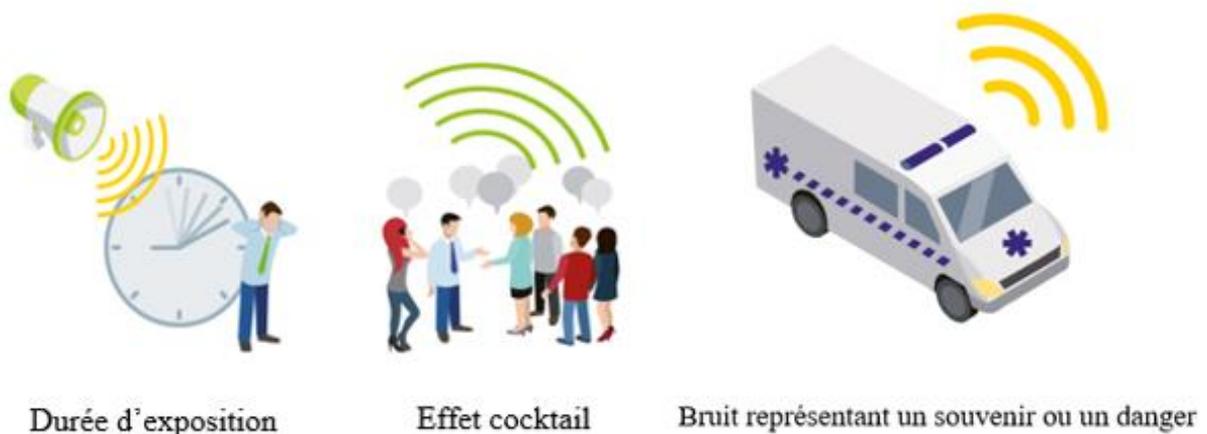


Figure I.4 : Les niveaux sonores de bruit en fonction de la fréquence (Source : Meisser, 2005)

Le bruit est associé à une sensation gênante, non voulu ou désagréable, il est une notion subjective qui dépend de l'individu qui vas la percevoir.

La figure suivante présente quelques facteurs qui influent sur la perception du bruit.



Durée d'exposition

Effet cocktail

Bruit représentant un souvenir ou un danger

Figure I.5 : Les facteurs qui influencent la perception d'un bruit (Source : www.isover.fr)

Dans certain cas, l'individu perçu le bruit comme une nuisance sonore à cause de plusieurs facteurs, notamment : durée d'exposition, effet de cocktail, ... (Jedidi, 2017).

I.3.2.1. Sources et types de bruit

Dans l'acoustique du bâtiment, il existe quatre sources de bruit (figure I.6). Ils se caractérisent par leur directivité, leur spectre, la nature de leur évolution temporelle ou celle du milieu de transmission.



Figure I.6 : Les sources de bruit (Source : www.isover.fr)

- Bruits aériens : les bruits aériens représentent ceux qui sont émises par des sources qui ne sont pas en contact avec la structure bâti. Ils naissent et se diffusent dans l'air avant qu'ils vibrent les parois d'une pièce. Chaque paroi qui vibre réagit de sa part par la vibration de l'air dans les espaces adjacents. Il existe deux types de bruits aériens :

-Les bruits aériens intérieurs : sont des bruits occasionnés par les chaînes hi-fi, les conversations, ...

-Les bruits aériens extérieurs : sont des bruits occasionnés par le trafic ferroviaire, aérien ou routier.

- Bruits solidiens : les bruits solidiens (les bruits d'impact ou les bruits de choc) sont ceux qui génèrent par un contact direct avec l'éléments constitutif du bâtiment (vibration de la structure). Ils sont créés par les bruits de pas, chutes d'objets, ...
- Bruits d'équipements : les bruits d'équipements sont ceux qui se propagent par l'air ainsi que par la mise en vibration directe de l'équipement ou de la paroi. Il existe des bruits d'équipements collectifs comme : ascenseur, chaufferie, ... ou des bruits d'équipements individuels tel que : chasse d'eau, robinetterie, ... (Barles et al., 2017).

I.3.2.2. Règles pour additionner les niveaux de bruit

Le niveau de bruit s'exprime sur une échelle logarithmique, donc les lois de calcul arithmétique ne sont pas applicables aux niveaux de bruit.

Il existe généralement deux règles pour additionner les niveaux de bruit :

- Cas des bruits qui ont des niveaux très différents (écart 10 dB) :

Si la différence est supérieure à 10 dB entre les niveaux de bruit, le bruit le plus faible est masqué par le bruit le plus fort sous l'effet « de masquage » qui signifie qu'un son n'est pas audible par un autre (Barles et al., 2017).

- Cas des bruits qui ont des niveaux proches (écart < 10 dB) :

Tableau I.1 : Addition de deux niveaux sonores (Source : Barles et al., 2017).

Différence entre deux niveaux sonores (en dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valeur à ajouter au niveau le plus fort (en dB)	3	2,6	2,1	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5

Si les bruits sont analogues, l'addition des niveaux sonores se fait selon le tableau ci-dessus.

I.3.2.3. Effet de bruit

Le bruit a de nombreux effets sur la santé, qu'ils soient physiologiques ou psychologiques, à court mais surtout à long terme. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), il est considéré comme la troisième source de maladies dites environnementales après la pollution atmosphérique et le tabagisme passif (Schrivier-Mazzuoli, 2007).

La figure I.7 montre les différents effets des bruits sur la santé.

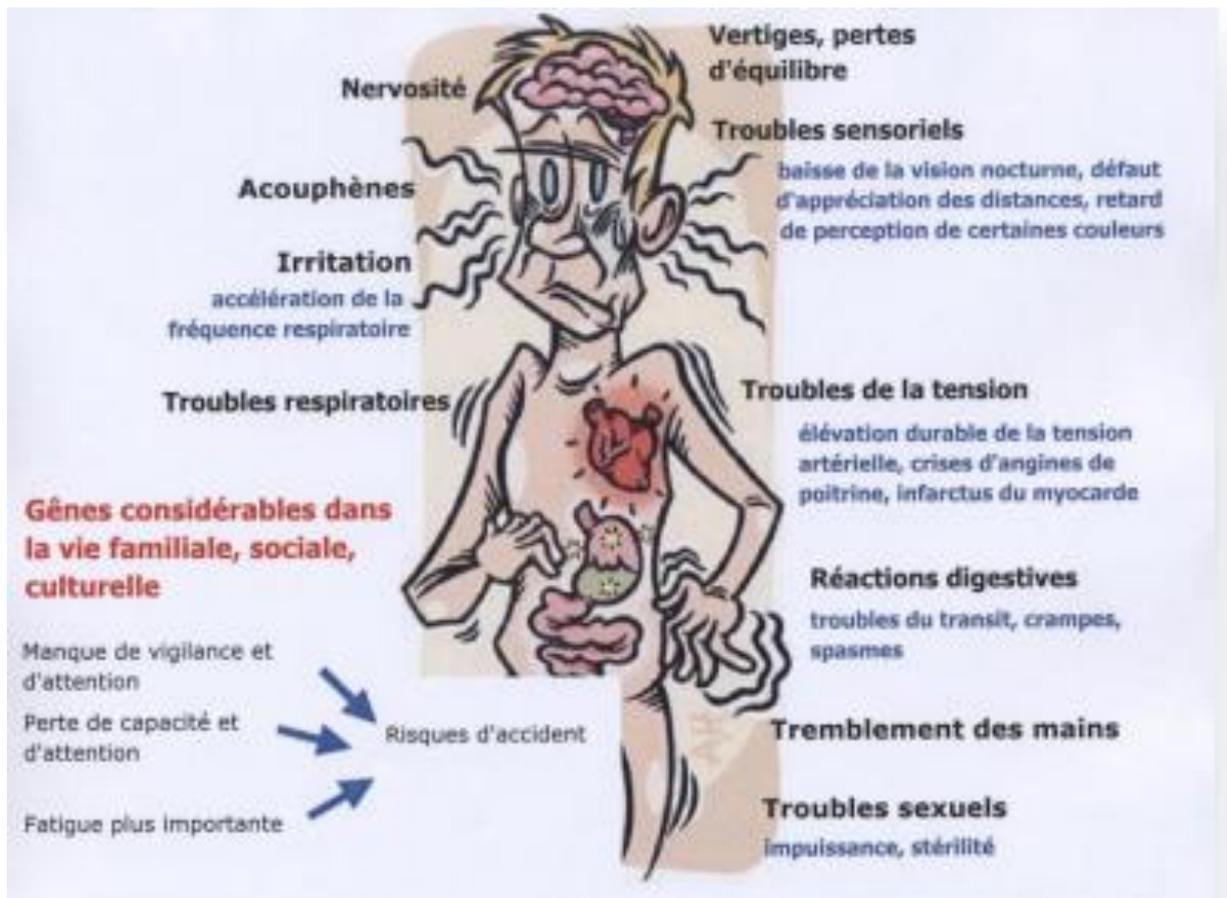


Figure I.7 : Les effets des bruits sur la santé (Source : <https://docplayer.fr>)

Les conséquences du bruit au niveau de la santé sont le résultat de nombreux facteurs :

- L'intensité de niveau sonore ;
- La durée d'exposition au niveau sonore ;
- La fréquence du son (quand les fréquences des sons sont entre 500 et 5000 Hz l'oreille est plus sensible) ;
- La nature du son (un bruit impulsionnel à un niveau sonore égal est très dangereux pour l'audition) ;
- Les vibrations liées au bruit ; ... (Vincent, 2016).

I.3.2.4. Mesure de bruit

Effectuer des mesures sur les niveaux de pression acoustique nécessite plusieurs instruments et techniques afin de capter la pression acoustique tel que le microphone, l'audiométrimètre, sonomètre, L'ensemble de ses instruments doivent être calibrer par un calibreur acoustique. Le choix de l'instrument dépend de type et de genre du bruit qui va être mesurer et les diverses données qu'il faut recueillir.

La mesure des niveaux de pression acoustique des différents espaces permet de prendre des décisions cohérentes pour que le système auditif de l'être humain ne souffre pas des nuisances gênantes, de vérifier l'application des réglementations, d'améliorer les connaissances physiques pour contrôler les niveaux sonores (Hamayon, 2014).

I.3.2.4.1. Décibel

Décibel est un langage particulier traité facilement par les scientifiques surtout les acousticiens, mais il est ambigu pour le plus grand nombre. Le décibel est symbolisé par dB, il est une unité de mesure sans dimension qui exprime la mesure du niveau sonore. Cette notion permet de montrer une certaine relation entre l'intensité acoustique (W/m^2) et la plus petite intensité audible par l'oreille humaine à 1000 Hz (intensité de référence) selon une échelle logarithmique (figure I.8) (Hamayon, 2014).

L'ÉCHELLE DE NIVEAU DE BRUIT

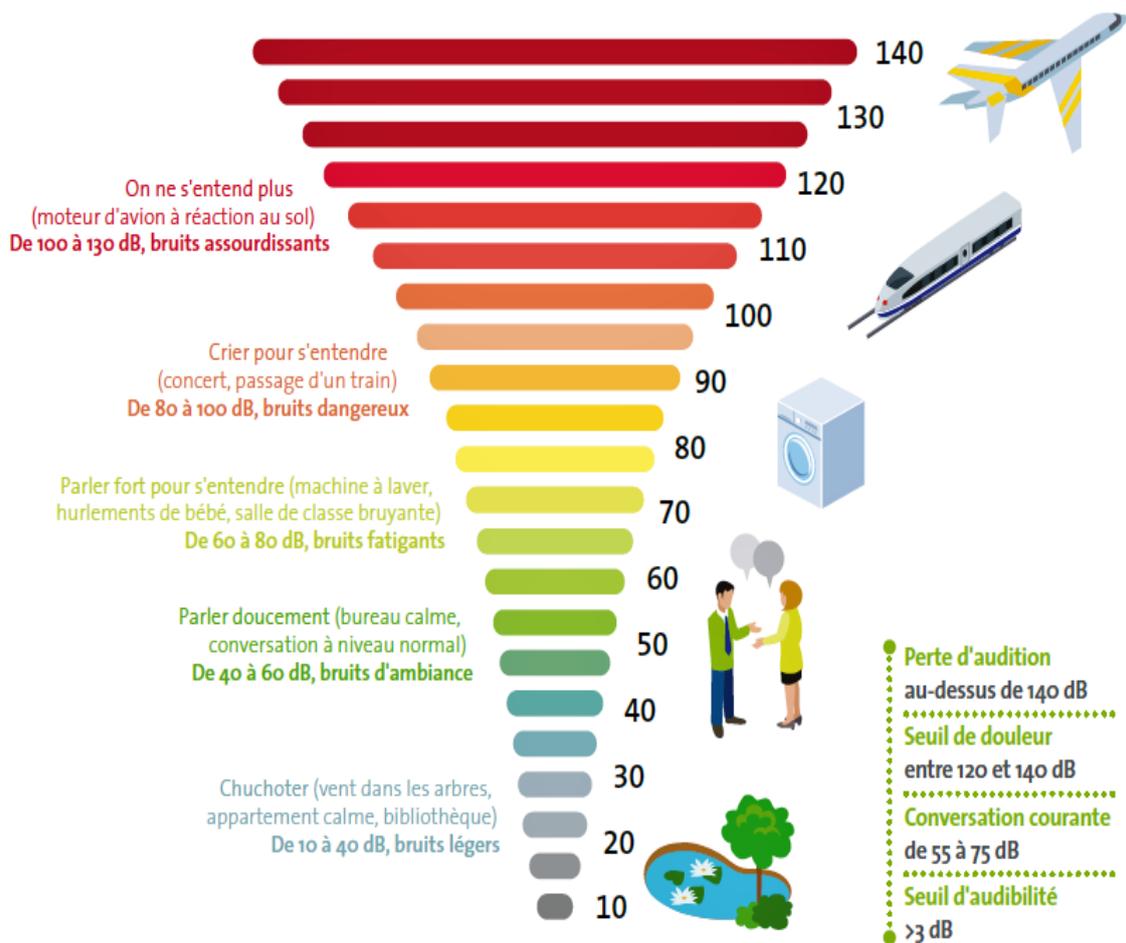


Figure I.8 : L'échelle logarithmique de décibel (Source : www.franceenvironnement.com)

Cette échelle logarithmique peut sembler grossière mais au contraire elle simplifié les chiffres. Elles se rapport à :

- Une précision de mesure de 2 dB en dohrs des conditions de laboratoire.
- Une tolérance de 3 dB applicable aux réglementations des constructions.
- Une perception du nuisance sonore (bruit).

Pour l'être humain une augmentation de :

+ 5 dB : la sensation est un peu plus fort.

+ 10 dB : la sensation est deux fois plus fort.

+ 20 dB : la sensation est quatre fois plus fort.

+ 60 dB : la sensation est soixante-quatre fois plus fort (Rapin, 2017).

I.3.2.4.2. Décibel pondéré A

Décibel pondéré A ou dB(A) est l'unité physiologique de mesure du niveau de pression acoustique. Les appareils de mesure sonore sont équipés par les systèmes de pondération afin de prendre en compte les différentes sensations spectrales de système auditif provoquées par des sons de différentes fréquences. Ces systèmes de pondération représentent plusieurs filtres qui s'appellent « courbes de pondération » (figure I.9).

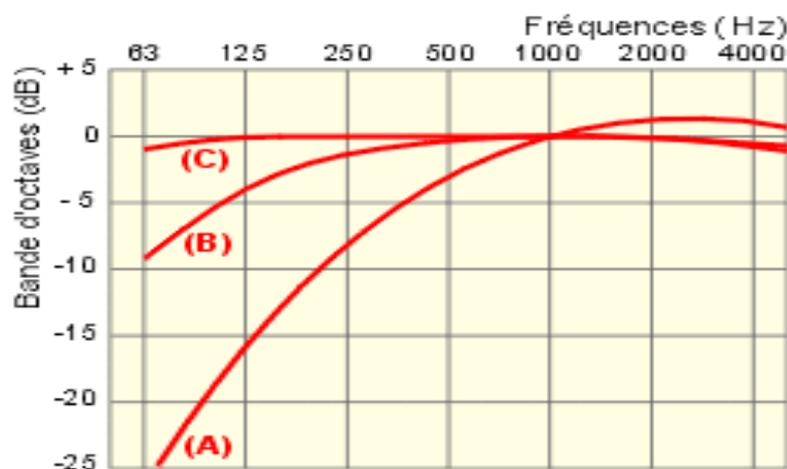


Figure I.9 : Courbes de pondération (Source : <https://energieplus-lesite.be>)

La figure ci-dessus montre les trois principales courbes qui sont :

- La courbes de pondération A : c'est la courbe exploitée dans le domaine de batiment, elle représente le comportement de l'oreille à des niveaux de pression acoustique inférieur à 55 dB. Ce niveau mesuré s'exprime en décibels A.

- La courbes de pondération B : c'est la courbe qui représente le comportement de l'oreille à des niveaux de pression acoustique qui se situent entre 55 dB et 85 dB. Ce niveau mesuré s'exprime en décibels B.
- La courbes de pondération C : c'est la courbe qui représente le comportement de l'oreille à des niveaux de pression acoustique supérieurs à 85 dB. Ce niveau mesuré s'exprime en décibels C (Jedidi, 2017).

I.3.2.4.3. Sonomètre

Les sonomètres représentent tous les appareils exploités pour les mesures acoustique, que ce soit des instruments spécifiques où des appareils qui utilisent le micro-ordinateur. Ces instruments ont évolué dans les dernières trente années (figure I.10).



Figure I.10 : L'évolution de l'instrument sonomètre (Source : <https://www.bruit.fr>)

Les premiers sonomètres commercialisés ne mesurent pas les bruits continus et stables, ils ressemblent à des voltmètres avec microphones.

Les sonomètres de deuxième génération (sonomètres intégrateurs) offrent la possibilité de mesurer les bruits fluctuants ainsi que le calcul de niveau de pression continu équivalent (L_{eq}).

Les sonomètres modernes mesurent non seulement les niveaux de pression sonores mais ils permettent de faire des analyses spectrales qui déterminent la répartition de l'énergie du niveau de bruit selon les fréquences en dB. Les sonomètres actuels stockent une quantité très grande d'informations dans leurs cartes mémoires, cet avantage permet de remplir plusieurs fonctions en même temps. Le système de stockage est associé à des outils multimédias pour le dépouillement des résultats (Hamayon, 2014).

I.3.3. Le système auditif (physiologie de l'acoustique)

Les ondes sonores sont recueillies, transmises et transformées par l'oreille humaine qui est formée de trois organes : l'oreille externe, l'oreille moyenne ainsi que l'oreille interne (figure I.11).

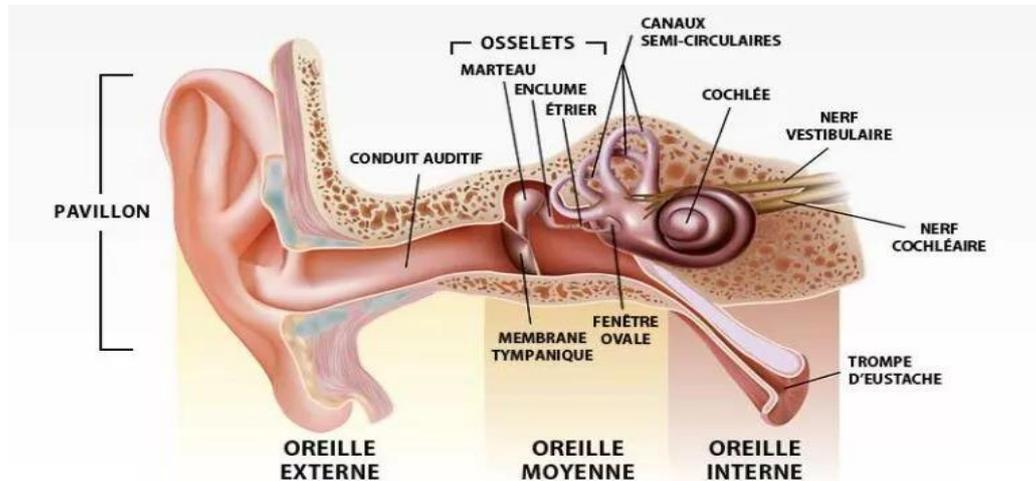


Figure I.11 : Structure interne de système auditif (Source : www.auditionsolution.ca)

L'oreille externe regroupe le pavillon et le conduit auditif externe, afin de capter les vibrations sonores et de les envoyer vers le tympan. L'oreille moyenne permet d'amplifier et d'acheminer les vibrations sonores vers la fenêtré ovale qui délimite l'entrée à la partie interne de l'oreille. Cette dernière se compose de l'organe vestibulaire et la cochlée (limaçon) qui représente l'organe de l'audition. Elle englobe des cellules (des cils) à partir desquelles les fibres nerveuses se regroupent pour former le nerf de l'audition qui vas transmettre les messages sonores au cerveau pour qu'il les interprète (Hamayon, 2014).

I.3.4. Perception des sons

L'audibilité et l'inaudibilité du son dépend principalement de système auditif de l'être humain. Ce système a des limites qu'il faut les prendre en compte vue que la notion du confort est fortement liée à la perception auditive. Ces limites sont représentées comme suite : le seuil d'audibilité qui permet la perception du son par l'oreille humaine est inséré entre 20Hz et 20000Hz : du 20Hz à 400Hz (basses fréquences) et du 1600Hz à 20000Hz (hautes fréquences) l'oreille humaine percevoir mal les sons et du 400Hz à 1600Hz (moyennes fréquences) le système auditif percevoir très bien les sons. Le domaine de l'acoustique du bâtiment et de l'environnement étudié les fréquences qui se situent entre 100Hz et 5000Hz (figure I.9) (Champilou & Coutant, 2012).

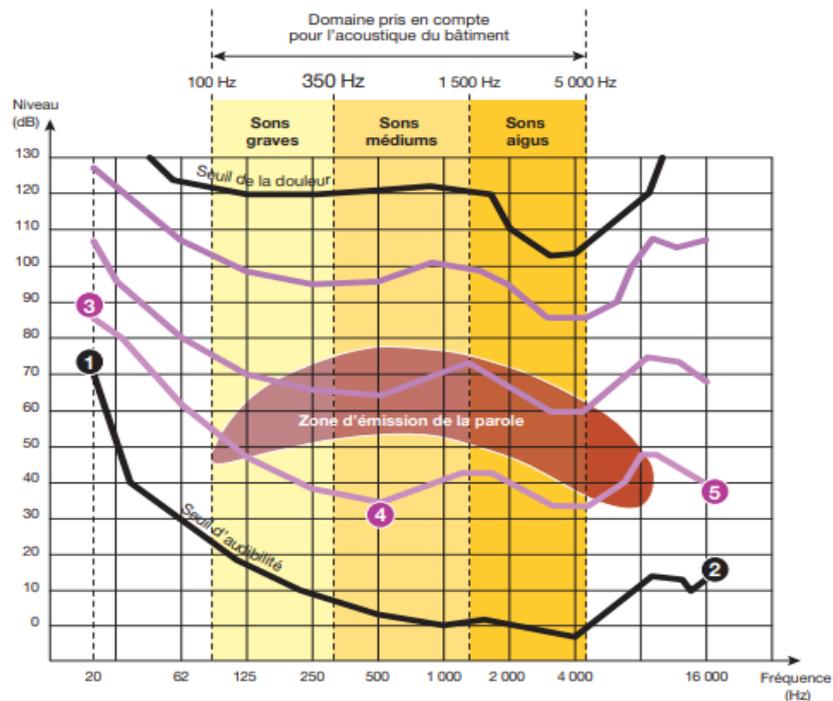


Figure I.12 : Perception du bruit et sensibilité de l'oreille (Source : Meisser, 2005)

Les courbes dans la figure I.12 montrent, en fonction de la fréquence (Hz), la sensation auditive égale et les seuils d'audibilité et de douleur. Le seuil d'audibilité représente le niveau sonore minimum qui provoque une perception sonore par l'oreille contrairement au seuil de douleur qui correspond à un niveau du son très élevé qui provoque une sensation dangereuse et insupportable pour le système auditif (Cloud, s.d.).

I.3.5. Propagation de son

Les vibrations sonores se propagent de proche en proche. Leur vitesse de propagation est nommée « la célérité du son » (c). Cette dernière dépend d'élasticité et d'homogénéité du milieu dans lequel les ondes acoustiques se déplacent (tableau I.2), mais elle ne varie pas en fonction de la nature, la forme et la grandeur de l'énergie initiale.

Tableau I.2 : Célérité du son dans les différents milieux(Source : <http://tpeson-verre.weebly.com/>)

Phase de milieu :	Nature de milieu :	Vitesse du son (m/s) :
Gazeux	Dioxyde de carbone (CO ₂)	260
	Oxygène	320
	Air	330
	Hélium	390
	Hydrogène	1270
Liquide	Mercure	1450
	Eau douce	1460
	Eau de mer	1520
Solide	Bois de pin	3320
	Acier	5000
	Verre	5500

Le son se déplace dans l'air à une vitesse de 330 m/s et d'une vitesse de 1460m/s dans l'eau. La célérité du son augmente légèrement avec la température (Rapin, 2017 ; Hamayon, 2014).

I.3.5.1. Propagation du son dans un espace libre

Il existe deux différents types des sources sonores : les sources ponctuelles et celles linéaires.

- Les sources sonores ponctuelles représentent des sons effectués sur un point par des ondes sphériques centrées. Elles se divisent aux sources fixes (usine, instrument musical, éolien, ...) et aux sources mobiles (avion en vol, voiture en marche, ...).
- Les sources sonores linéaires représentent des sons qui sont effectués sur une ligne par des ondes cylindriques centrées (trafic routière et ferroviaire).

La figure I.13 illustre les deux types des sources sonores.

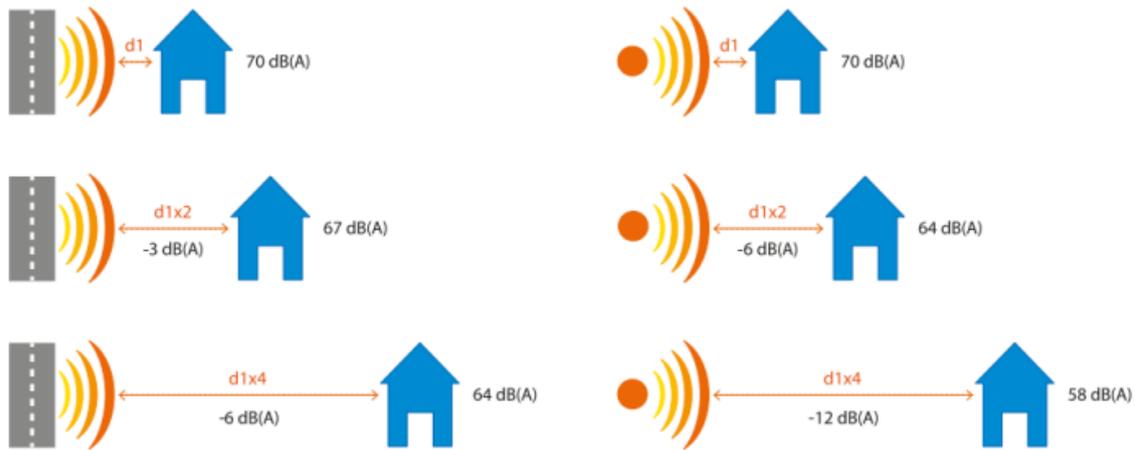


Figure I.13 : Sources sonores linéaires et ponctuelles (Source : Mezerdi, 2019)

- Dans un champ libre, le niveau sonore baisse de 06 dB quand la distance qui sépare le lieu de mesure et la source sonore ponctuelle est pratiquement multipliée par deux.
- Sous l'absence des masques, le décroissement de niveau sonore est de 03 dB quand la distance qui sépare le point de mesure et la source sonore linéaire (routière) est pratiquement multipliée par deux (Jedidi, 2017 ; Van Tran, 1996).

I.3.5.2. Propagation du son dans un espace clos

Les ondes sonores qui sont diffusées à l'intérieur d'un local fermé connaissent de nombreux phénomènes acoustiques différents. Ils dépendent de volume de l'espace, les lois de la physique (fréquence, nature de l'onde, ...) et aussi de la nature de ses surfaces ainsi que celle des obstacles rencontrés.

I.3.5.2.1. Réflexion, absorption et transmission du son

Dans un bâtiment, les ondes sonores qui rencontrent une paroi (horizontal ou vertical) envoient une quantité d'énergie acoustique à cette paroi qui s'appelle : une énergie incidente.

Une partie de cette dernière sera réfléchi et le rapport entre l'énergie réfléchi et l'énergie incidente s'appelle « un coefficient de réflexion (β) » qui se détermine par la formule suivante :

$$\beta = \frac{E_r}{E_i}$$

Avec :

- E_r : Energie réfléchi (W/m^2) ;
- E_i : Energie incidente (W/m^2).

La partie qui reste de l'énergie incidente soit dissipée ou émergée de l'autre côté du mur tout en donnant une énergie absorbante (la somme entre l'énergie dissipée et l'énergie émergée).

Le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie incidente s'appelle « un coefficient d'absorption (α) » qui se détermine par la formule suivante : $\alpha = \frac{E_a}{E_i}$

Avec :

- E_a : Energie réfléchie ($E_a = E_i - E_r$) (W/m^2).

-La variation des deux coefficients (α et β) est entre 0 et 1 qui dépend des propriétés de la fréquence du son et de la paroi.

-La somme de coefficient d'absorption (α) et coefficient de réflexion (β) est égale à 1 ($\alpha + \beta = 1$).

Le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie incidente s'appelle « un coefficient de transmission (τ) » qui se détermine par la formule suivante : $\tau = \frac{E_t}{E_i}$

Avec :

- E_t : Energie transmise (W/m^2) (Van Tran, 1996).

La figure I.14 montre les trois phénomènes produits par la rencontre d'une onde sonore et une paroi.

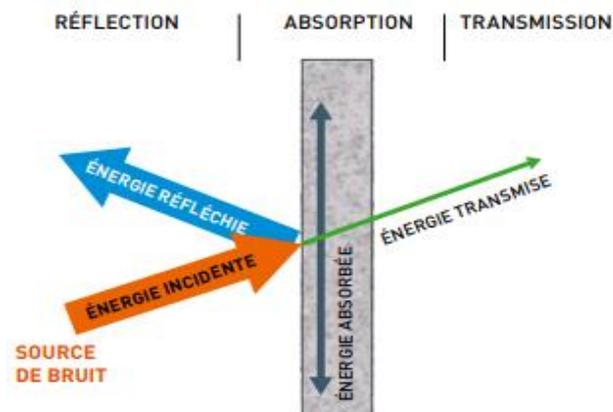


Figure I.14 : Propagation des ondes sonores (Source : Barles et al., 2017)

-**Réflexion** sur le mur d'une partie de l'énergie sonore car les molécules d'air légères sont renvoyées du bord du mur lourd.

-**Absorption** par la paroi d'une partie de l'énergie sonore car le mur se déforme ; à cause des ondes venant avec de nombreuses incidences ; et le matériau qui le compose subit des pertes interne.

-**Transmission** d'une partie de l'énergie sonore au travers des matériaux de la paroi vers l'espace qui se situe dans l'autre côté par rapport à l'emplacement de la source (Barles et al., 2017 ; Branchu, 2012).

I.3.5.2.2. Diffraction et réfraction

Diffraction est un phénomène physique de changement dans le sens de l'onde, il représente le comportement des ondes acoustiques après le rencontre des obstacles qui ne sont pas complètement transparent, c'est un phénomène qui permet d'entendre des sons émis derrière les obstacles (figure I.15). Elle représente le résultat d'interférence des ondes sonores diffusées par chaque point (Jedidi, 2017).

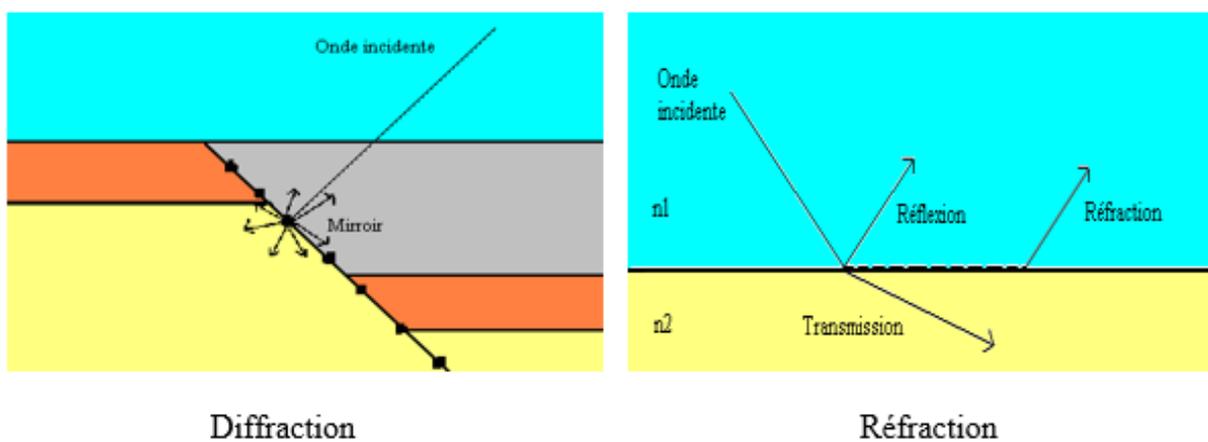


Figure I.15 : Diffraction et réfraction d'ondes incidentes

(Source : <http://forumbachelor.free.fr>)

Réfraction est un principe de déviation de l'onde causé pendant un changement du milieu. Il existe également des phénomènes de réfraction dans un même milieu lorsque il a des caractéristiques physiques hétérogènes (figure I.15) (Delcros, 2016).

I.3.5.2.3. Durée de Réverbération

Le temps de réverbération est la durée mise par les ondes acoustiques pour se diminuer après une réflexion sur les parois d'un espace clos ou un espace semi-clos, il signifie le temps nécessaire pour que le niveau d'intensité sonore décroisse de 60 dB après une coupure de la source sonore (figure I.16) (Rapin, 2017).

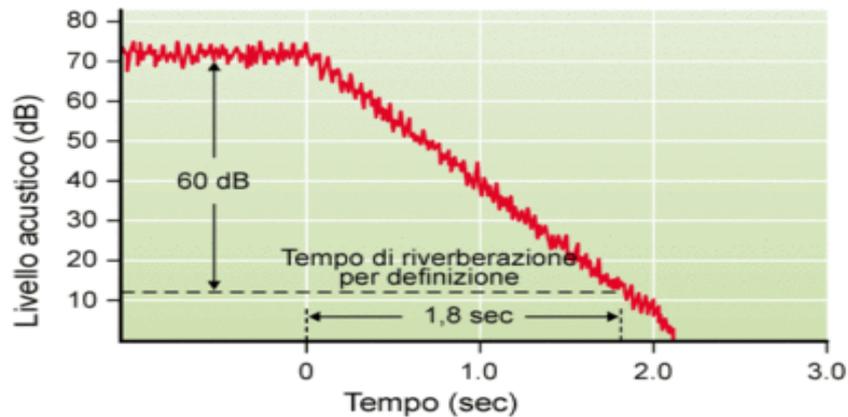


Figure I.16 : Durée de réverbération (Source : <https://www.acousticlab.com/fr>)

La durée de réverbération (T , T_r ou T_{60}) varie en fonction du volume d'un local et d'une surface qui s'appelle « aire d'absorption équivalente (A) ». Elle s'exprime en second et elle est obtenue à l'aide de la formule de Sabine :

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

Avec :

- T_r : Temps de réverbération (s) ;
- V : Volume d'un local (m^3) ;
- A : Aire d'absorption équivalente (m^2) qui dépend le facteur d'absorption α des éléments absorbant dans la salle ($A = S \cdot \alpha$) (Rapin, 2017).

La formule de Sabine est déterminée par W.C. Sabine ; un chercheur américain ; à la fin de XIXe siècle. Elle est la formule la plus appliquée dans la pratique malgré l'existence d'autres formules comme celle de Millington, de Eyring ou de Pujolle à cause de sa simplicité. Elle repose sur deux hypothèses : les coefficients d'absorption sont faibles et la répartition des absorbants est homogène (Hamayon, 2006).

I.3.5.2.4. Echo

Echo est un phénomène produit par la réverbération des ondes sonores sur les parois après leurs réflexion. La figure suivante illustre le parcours des ondes directes et des ondes réfléchies qui arrive en retard par rapport aux premiers ondes produisant le phénomène d'écho.

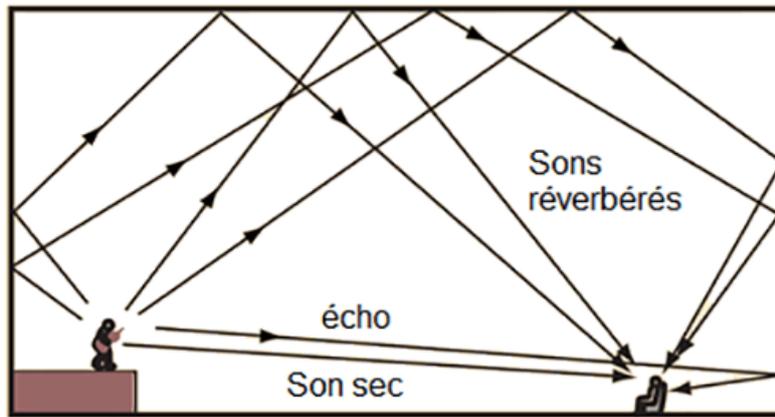


Figure I.17 : les parcours des ondes sonores produisant l'écho par la réflexion des murs

(Source : www.spicaacoustique.ca)

Ces ondes sont parvenues à un point précis selon deux sons où plus séparés produisant un retard critique. A cet effet, le récepteur perçoit des sons directs et des sons réfléchies. Ces derniers représentent le phénomène d'écho. La valeur enregistré du retard critique varie en suivant la différence entre les niveaux des sons (Van-Tran, 1996).

I.3.6. Pression acoustique

La pression acoustique (P) représente la différence entre la pression atmosphérique en présence des ondes sonores au point considéré et celle en absence de ces ondes (dans la pression atmosphérique P_{at}). Elle s'exprime en pascal (Pa).

La pression acoustique est considérée comme une pression effective (P_{eff}) qui se détermine

par la relation suivante :

$$P_{eff} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} (P_i - P_{at})^2 dt}$$

Avec :

- P_i : Pression instantanée de l'atmosphère au point considéré ;
- P_{at} : Pression atmosphérique en absence des ondes sonores ;
- T : La période des ondes sonores en secondes ;
- t_1 et t_2 : Deux instants qui limitent la période des ondes.

La pression acoustique indique les sons le plus faible que le système auditif puisse percevoir qui est d'une valeur de 2×10^{-5} Pa à 1000 Hz (valeur de seuil d'audibilité). Elle indique aussi la valeur de seuil de douleur qui représente la pression maximale que l'être humain souffre de la douleur au niveau du tympan est de 63 Pa à un son de 1000 Hz de fréquence (Van-Tran, 1996).

I.3.7. Puissance acoustique

La puissance acoustique est le paramètre qui permet la caractérisation des sources acoustiques. Elle est une grandeur physique intermédiaire dans les calculs selon les acousticiens. Elle représente l'énergie libérée par les ondes sonores pendant l'unité de temps.

Cette énergie est mesurée en Watts (W) et symbolisée par la lettre W (Van-Tran, 1996).

I.3.8. Intensité acoustique

La source sonore envoie une énergie dans l'espace pour que nos oreilles la perçoivent. Ainsi, l'intensité acoustique est déterminée. Cette grandeur signifie la quantité de l'énergie émise par les ondes sonores traversant une surface placée d'une manière perpendiculaire au sens de propagation par l'unité du temps. Elle est symbolisée par la lettre I et exprimée W/m².

La formule ci-dessous représente la relation entre la pression et l'intensité acoustique.

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

Avec :

- I : Intensité acoustique (W/m²) ;
- P : Pression acoustique efficace (Pa) ;
- ρ : Masse volumique de l'air (1,293 Kg/m³) ;
- c : Célérité du son (m/s) ;
- ρc : Impédance de l'air.

La pression et l'intensité acoustique ne sont pas des grandeurs indépendantes, plus que l'intensité est forte plus la pression devient forte mais les intensités s'ajoutent inversement aux pressions quand plusieurs sources sonores émettent simultanément (Hamayon, 2014).

I.4. Réglementation algérienne pour la lutte contre le bruit

Les nuisances sonores ont une forte incidence sur le rythme de vie des usagers de l'espace, chez soi, en vacances, à l'école, au travail, ... et aussi les relations entre les voisins. A cet effet, en Algérie, les problèmes liés aux nuisances sonores ont été pris en compte dès 1983 par le pouvoir public afin de lutter contre les bruits dans les différents espaces de vie (Gramez, 2010).

I.4.1. Les lois

- Loi n° 83-03 du 05 février 1983 : concernant la sauvegarde de l'environnement, il met en œuvre ; dans les articles 119,120 et 121 de chapitre 05 ; une politique nationale qui stipule sur

le respect de l'environnement par la préservation et la lutte contre la pollution et les nuisances. Cette loi stipule que toute personne morale ou physique est responsable lorsqu'il existe une émission sonore susceptible de gêner autrui en les obligeant à appliquer toutes les dispositions utiles pour les supprimer (Bendjedid, 1983).

-Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 : porte sur le nom de la protection de l'environnement dans le cadre de développement durable, ou dans le titre 04 intitulé « protection contre les nuisances » et au sein des articles 72, 73, 74 et 75 de chapitre 02 se trouve des prescriptions de protection contre les nuisances acoustiques (les mesures de prévention, d'aménagement et d'isolation phonique, les conditions d'éloignement, etc.).

I.4.2. Les arrêtés

-Arrêté du 25 février 1964 : porte sur la lutte contre les bruits excessifs, il a pour objectif de sensibiliser les gens sur les impacts de bruits sur les différents espaces : lieux de travail, voies publics, ... afin de débattre les nuisances sonores et il interdit les gens d'exploiter des dispositifs qui émettent le bruit pour ne pas influencer sur la tranquillité et le repos des habitations ainsi que celle des voisinages.

-Arrêté du 13 avril 1972 : correspond au bruit émis par des véhicules automobiles et baux condition qu'il faut respecter par ces dispositifs. Il fixe les mesures de bruit à appliquer par les moyennes de transport et les automobiles.

-Arrêté du 17 octobre 2004 : correspond à l'approbation du cahier des charges définissant les normes de confort et de surface applicable aux logements de vent et de location. Il donne des réglementations phoniques pour le niveau sonore plusieurs espaces : les pièces habitables ne dépassent pas 38 dB, les pièces de services ne dépassent pas 45 dB, les circulations communes ne doit pas dépasser 76 dB.

I.4.3. Les décrets exécutifs

-Décret exécutif n° 91-175 du 28 mai 1991 : ce décret défini les règles d'aménagement, d'urbanisme et de construction. L'article n° 04 stipule que lorsque les bâtiments sont susceptibles d'être confrontées à de graves nuisances dues au bruit à cause de leurs emplacements, le permet de construire ne peut pas être accordé et il va être refusé, que sous réserve des instructions particulières établies par les règlements et les lois en vigueur.

-Décret exécutif n° 93- 184 du 27 juillet 1993 : relative aux réglementations d'émission des bruits en appui aux articles 119 et 120 de la loi n°83-03 du 5 février 1983, susvisée. Ce décret

comprend 11 articles dans lesquels se trouve des réglementations qui limitent les niveaux de bruit émis dans les différents domaines et par chaque type d'équipement et de matériels.

I.4.4. Le document technique réglementaire DTR C 3.1.1

Ce document est intitulé « isolation acoustique des parois aux bruits aériens, règles de calcul », son but est d'identifier les méthodes qui déterminent l'indice d'affaiblissement acoustique des parois des bâtiments et le calcul d'isolation brut des murs (Db) vis-à-vis les bruits aériens. Ces valeurs permettant d'évaluer la qualité acoustique des murs et de vérifier la conformité des bâtiments à usage d'habitation par rapport à la réglementation acoustique.

Le document technique réglementaire a été adhéré par la Commission Technique Permanente (CTP) et il est publié par le journal Officiel. Il a pour objectif de lutter contre les nuisances sonores.

Conclusion

L'acoustique, en tant qu'une science des sons, a un rôle primordial dans notre vie quotidienne. Il étudie la nature des ondes sonores, leurs émissions, leurs propagations et leurs réceptions, ces ondes se caractérisent par plusieurs indices : l'intensité acoustique, la pression acoustique, la fréquence, ... La maîtrise de cette science permet de protéger l'individu de tous dégradations causées par tous types de bruit ; quel que soit aérien, d'impact ou d'équipement ; qui n'influent pas seulement leur qualité de vie mais aussi leur santé.

Le secteur de bâtiment contient nombreuses sources provoquant des nuisances sonores ; qui représentent des effets psychologiques dépendant de la perception subjective de chaque individu. A cet effet, des textes réglementaires et des normes acoustiques sont imposés pour divers bâtiments : habitat, équipements publics, ... afin de garantir aux occupants un meilleurs confort acoustique et de lutter contre les bruits. Donc, l'acoustique est une science importante qu'il faut respecter dans tous les étapes de la conception de projet architectural tout en utilisant des différents stratégies (correction et isolation acoustique) qui l'assurent.

CHAPITRE II :
Le confort acoustique dans les établissements scolaires

CHAPITRE II : le confort acoustique dans les établissements scolaires

Introduction

La compréhension des phénomènes de l'acoustique et leur relation avec la conception architecturale permet d'avoir des constructions de haute performance acoustique qui sont le résultat des meilleurs choix des matériaux, des systèmes constructifs, des divers dispositifs, ... faite par les acteurs de construction que ce soit : architectes, ingénieurs de bureau d'étude, étudiants, concepteurs, ... afin de se protéger du bruit et de favoriser l'écoute dans les espaces.

Ce deuxième chapitre intitulé le confort acoustique dans les établissements scolaires représente les stratégies adoptées dans les conceptions pour garantir le confort acoustique des usagers. Il explique les règles d'isolation et de correction acoustique ainsi que les techniques de base qu'ils ne faut pas négliger lors de la conception architecturale globalement et plus précisément dans les milieux scolaires. Le chapitre a pour objectifs de régler les problèmes liés à l'acoustique des espaces scolaires existants et d'améliorer leurs architectures futures à travers le respect des exigences et des normes de correction et d'isolation acoustique.

II.1. Le confort acoustique

-Le confort est une notion subjective qui dépend les sensations de chaque individu, il se compose de confort thermique, acoustique, visuel, ...

-Le confort acoustique représente l'élément le plus ignoré dans le domaine de bâtiment, il est actuellement un enjeu majeur évolutif du contenu et il est difficile à saisir.

Le confort acoustique influe sur la production des logements de qualité car le silence et le confort représente des arguments du vente ainsi que les représentations sociales concernant la qualité de vie des occupants (Chelkoff, 2015).

II.1.1. Conditions de confort acoustique

Pour atteindre un confort acoustique des usagers dans un espace sans avoir des agressions sonores extérieures il faut respecter les limites normatives et techniques du ce concept qui concerne :

- L'amélioration du son à l'intérieur d'une pièce par la maîtrise de plusieurs notions tels que : la réverbération du son, le problème d'écho, ... à travers des modifications dans la capacité d'absorption et de réflexion des parois afin d'avoir un espace sonore bien traité. Alors, on parle de la correction acoustique.
- La limite des transmissions de bruit provenant de l'extérieur (trafic routier, jeux des enfants, ...), des espaces voisins de même bâtiment (bruit d'impact, bruit aérien et d'équipement) et aussi de l'intérieur d'un local considéré vers l'extérieur à travers l'utilisation de l'ensemble des techniques, ce qui permet d'avoir une bonne isolation acoustique (Chelkoff, 2015).

II.2. Les stratégies de la conception acoustique dans les bâtiments

Le traitement acoustique dans le domaine de bâtiment contient deux types de stratégie qui permettent de résoudre les problèmes provoqués par les nuisances sonores dans un local par des solutions adéquates : soit des décisions architecturales, soit des décisions techniques ou les deux à la fois (Jedidi, 2017).

II.2.1. Isolation acoustique

L'isolation acoustique est un ensemble des dispositions et des systèmes constructifs réalisés dans un bâtiment afin de réduire et de limiter la propagation de l'énergie acoustique des sources sonores qui la produisent vers d'autres locaux qu'il faut les protéger tout en agissant sur le traitement de leurs parois. Elle vise à changer le rendu sonore d'un local pour qu'il soit adapté à son usage (Jedidi, 2017).

II.2.1.1. Principe de l'isolation acoustique

L'isolation acoustique d'un local est définie par l'indice d'affaiblissement acoustique symbolisé R qui est une grandeur, mesurée en laboratoire, donnant la performance sonore en transmission d'un système constructif ou d'un matériau. Cette mesure est effectuée sans transmissions latérales pour pouvoir évaluer les performances de différents produits, systèmes de construction ou matériaux (Jedidi, 2017).

L'indice d'affaiblissement acoustique décrit la capacité d'une paroi à réduire la transmission du bruit, il est exprimé en dB, est déterminé par la formule suivante :

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

Avec :

- R : Indice d'affaiblissement acoustique (dB) ;
- τ : Facteur de transmission, qui représente le rapport entre l'énergie transmise (E_T) et l'énergie incidente (E_I) :
$$\tau = \frac{E_T}{E_I}$$

II.2.1.2. Les types d'isolement acoustique

L'isolement acoustique consiste à diminuer l'intensité acoustique entre deux locaux différents ; le local d'émission à l'intérieur d'une enceinte et le local de réception à l'extérieure de celle-ci (Jedidi, 2017) ; il est fonction de :

- La transmission directe par le mur séparatif qui dépend de l'amplitude de la paroi à réduire la transmission des sons et aussi sa surface.
- La transmission latérale par les murs liés au mur séparatif.
- La transmission parasite.
- Le volume de locale de réception qui est un paramètre important influençant sur l'énergie transmise.
- L'aire d'absorption équivalente de la pièce qui recevait le bruit (local de réception) (Hamayon, 2014).

II.2.1.2.1. Isolement acoustique brut D_b

L'isolement acoustique brut, symbolisé D_b , représente la différence arithmétique entre le niveau sonore émis $L_p(e)$ dans le local d'émission et le niveau sonore reçus $L_p(r)$ dans le local de réception, il s'exprime en dB (Rapin, 2017).

$$D_b = L_p(e) - L_p(r)$$

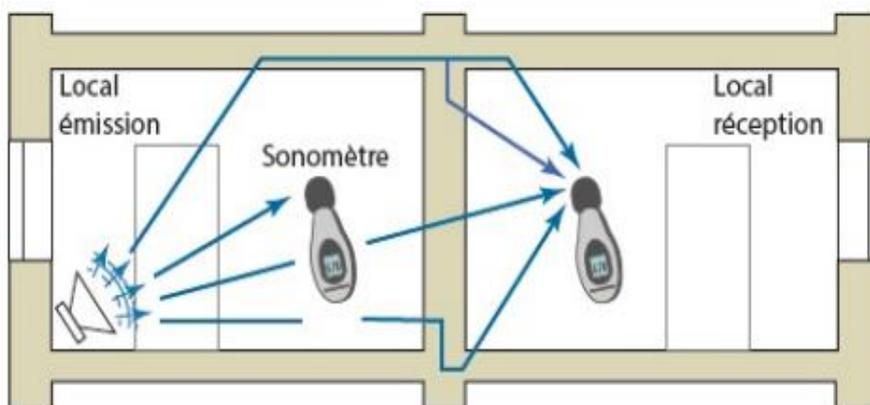


Figure II.1 : Mesure de l'isolement brut entre deux locaux (Source : Rapin, 2017)

L'isolement acoustique brut dépend de la fréquence de son et il varie selon la forme de la nuisance sonore émis (Jedidi, 2017).

II.2.1.2.2. Isolement acoustique normalisé D_n

L'isolement acoustique normalisé, noté D_n , est la valeur de comparaison entre l'isolement d'un local vide et l'autre meublé quand les mesures sont faites. Il considère l'absorption du local de réception tout en la comparant avec l'absorption de référence A_0 . Il est déterminé par

la formule suivante : $D_n = D_b - 10 \log \frac{A}{A_0}$

Avec :

- D_n : Isolement acoustique normalisé (dB) ;
- D_b : Isolement acoustique brut (dB) ;
- A : Absorption du local de reception (m^2) ;
- A_0 : Absorption de référence (m^2) (Hamayon, 2014).

II.2.1.2.3. Isolement acoustique standardisé D_{nT}

L'isolement acoustique standardisé, noté D_{nT} , représente la durée de réverbération T de l'espace récepteur en la comparant avec le temps de réverbération de référence T_0 (qui est en général 0,5 s). Donc il est la persistance du son dans l'espace de réception après l'interruption de la source acoustique dans le local d'émission (Rapin, 2017). Il est déterminé par la formule

suivante : $D_{nT} = D_b - 10 \log \frac{T}{T_0}$

Avec :

- T : Durée de reverberation du local de reception (m^2) ;
- T_0 : Durée de reverberation de référence (m^2) (Hamayon, 2014).

II.2.1.3. L'isolation acoustique des locaux contre les bruits aériens

L'isolation acoustique entre deux locaux consiste à freiner et à lutter contre les bruits aériens propageant. Cette stratégie s'appuie sur trois principes de base :

- **La loi de masse** : plus le matériau est épais et lourd, plus il isole les bruits (figure II.2). Donc plus la masse de matériau est présente plus il devient efficace dans la diminution des bruits aériens parce que les ondes sonores ne peuvent pas faire vibrer les éléments lourds.

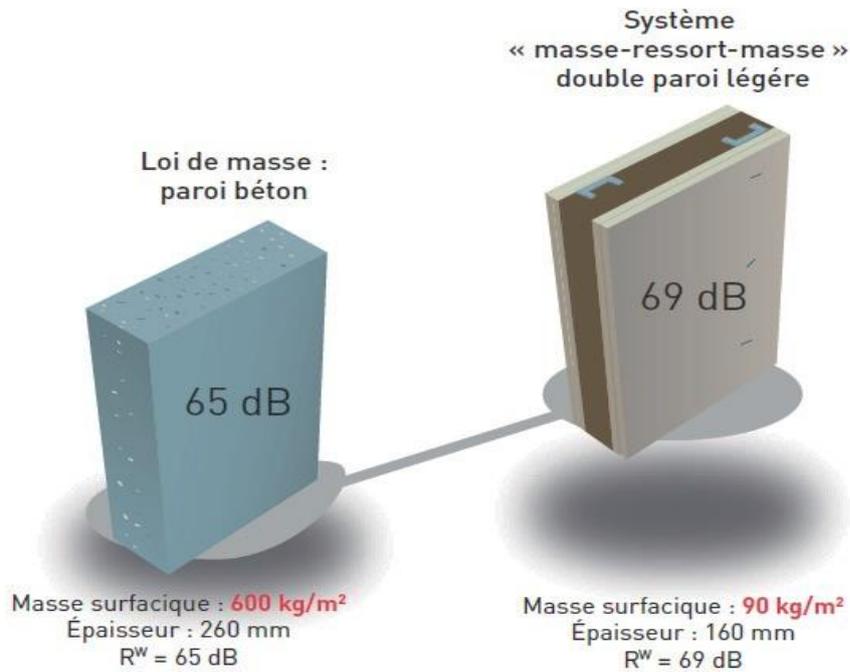


Figure II.2 : L'effet de loi de masse sur la transmission du bruit

(Source : <https://www.kenzai.fr>)

C'est le même principe qui s'applique pour l'épaisseur des matériaux, plus un mur est épais, moins il laisse les nuisances sonores passer.

- **La loi masse-ressort-masse** : ce principe se base sur la séparation acoustique de deux masses au moyen d'un ressort (isolant ou air), il consiste à combiner certains matériaux par l'utilisation de doubles parois séparant par une laine minérale qui atténue et absorbe l'énergie sonore (figure II.3).

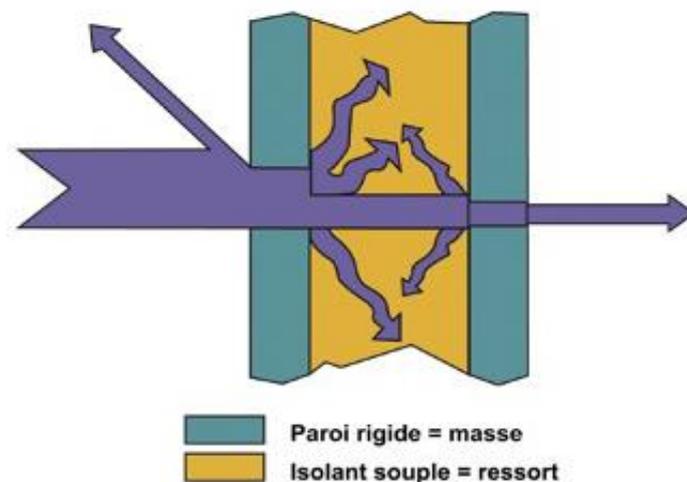


Figure II.3 : Principe masse-ressort-masse (Source : <https://insonorisation.weebly.com>)

Quand l'onde sonore frappe sur la première masse, elle va osciller. Le ressort reçoit ces vibrations et agit comme un amortisseur, donc le niveau de bruit est officiellement diminué lors de sa transmission à l'autre masse.

- **La loi d'étanchéité** : c'est un paramètre important pour l'optimisation de l'isolation acoustique puisqu'un petit trou, une fissure ou l'air passe, l'onde sonore passe (figure II.4).

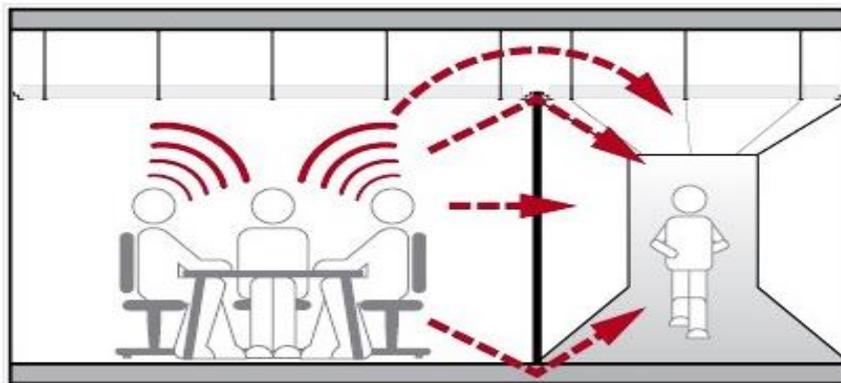


Figure II.4 : L'effet de l'étanchéité sur la transmission de bruit

(Source : <https://insonorisation.weebly.com>)

De ce fait, il faut lutter contre les fuites sonores à travers la recherche d'une homogénéité et d'une étanchéité maximale de la paroi (Adnet, 2018)

II.2.1.3.1. Modes de transmission des bruits aériens

Les bruits aériens transmettent d'un local à un autre par trois chemins de transmission qui sont illustrés dans la figure ci-dessous :

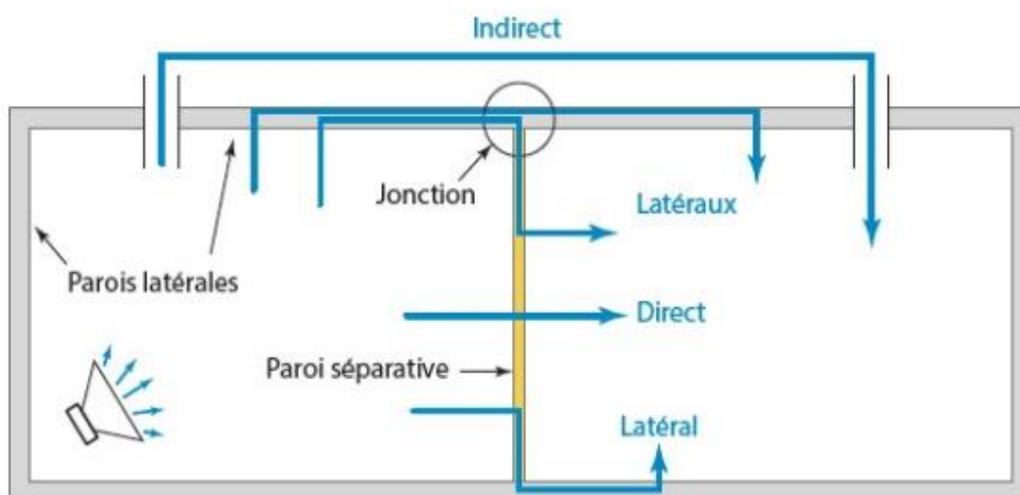


Figure II.5 : Modes de transmission du bruit (Source : Rapin, 2017)

- **Transmissions directes (TD)** : au travers des parois de séparations qui ont mis en vibration (plancher, mur intérieur, plafond, ...).
- **Transmissions indirectes (TL)** : par les parois latérales raccordées à la paroi séparative (à travers le plafond, les murs latéraux et le plancher reliés à la cloison).
- **Transmissions parasites (TP)** : dues aux défauts de l'étanchéité présents dans la paroi de séparation et les éventuels trous (fissure, fuites par les portes, passages des canalisations de ventilation, ...) (Barles et al., 2017 ; Branchu, 2012).

II.2.1.3.2. Facteurs influençant sur l'isolation aux bruits aériens

L'isolation aux bruits aériens entre deux pièces varie en fonction de plusieurs facteurs :

- **La surface de mur de séparation entre les pièces** : La surface du mur de séparation joue un rôle important dans l'isolation. Si cette surface est double, le bruit traversant le mur serait réduit de 3dB (figure II.6).

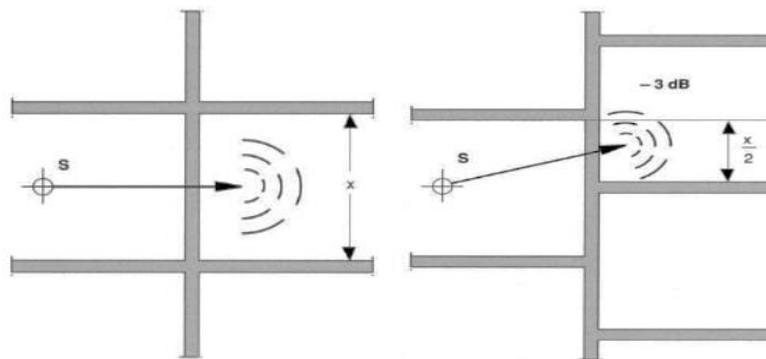


Figure II.6 : Influence de la surface de mur de séparation sur l'isolation

(Source : Atienza et al., 2010)

- **Le volume du local de réception** : si le volume de ce dernier est double par rapport au local d'émission, le bruit recevant serait réduit de 3 dB (figure II.7).

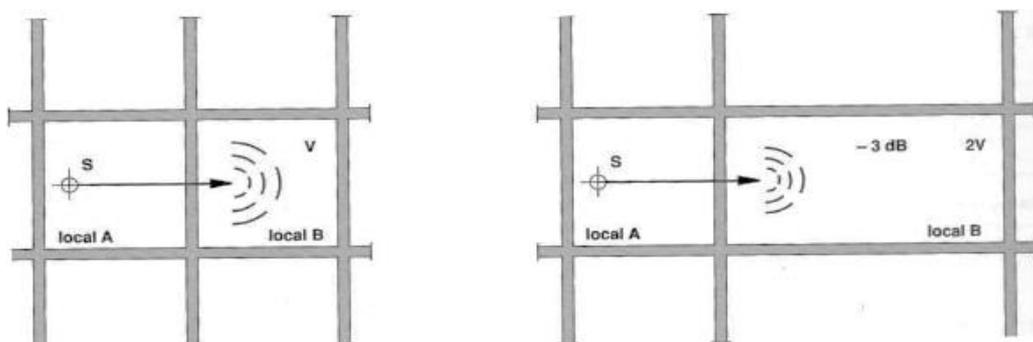


Figure II.7 : Influence de volume du local de réception sur l'isolation

(Source : Atienza et al., 2010)

- **Transmissions latérales** : quand toutes les murs sont lourds (béton coulé) et de nature identique, il y aura deux fois plus de transmission latérale d'énergie que de transmission directe. Si seul le mur séparatif est renforcé, le résultat de l'isolation ne dépendra que des transmissions latérales, qui ne changeront pas (figure II.8).

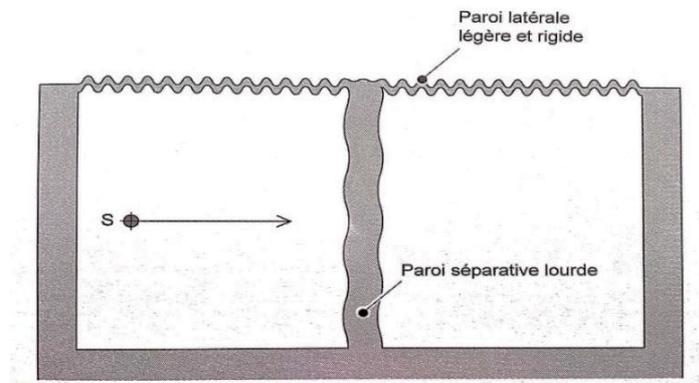


Figure II.8 : Influence des transmissions latérales sur l'isolation (Source : Hamayon, 2014)

- **Transmissions parasites** : relatives aux ponts phoniques (prises électriques incorporées, joints de portes et fenêtres, trous dans les murs, ... mal fini dans la fixation d'une paroi légère) (figure II.9).

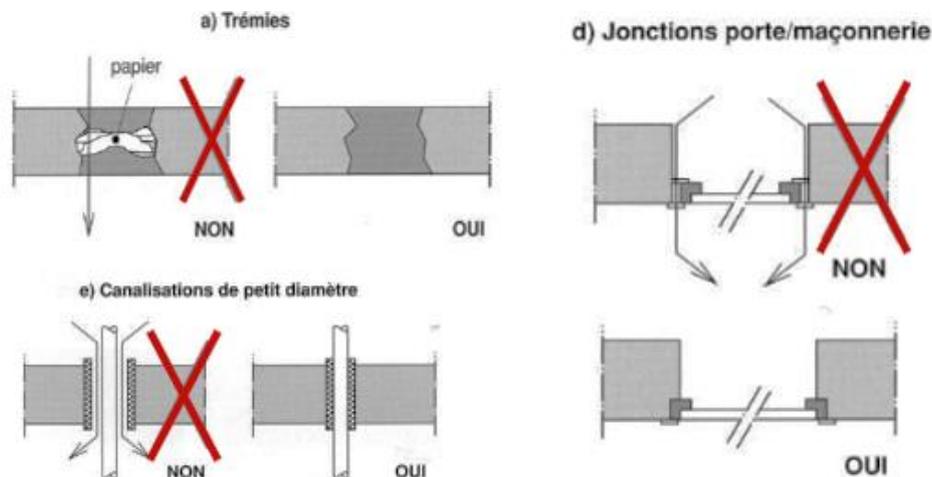


Figure II.9 : Voies des transmissions parasites (Source : Atienza et al., 2010)

II.2.1.4. Principes de l'isolation acoustique des bruits solidiens

Contrairement au bruit aérien, le bruit solidien est marqué par une force localisée sur un mur, et donc par une forte énergie transmise sur une petite surface dans un temps assez court.

De nombreuses techniques et matériaux se protègent de ces bruits à travers l'exploitation des principes qui sont résumés dans les trois points suivants :

- **Création des coupures à l'endroit de choc** : ce principe présente le cas de l'utilisation de pantoufles au lieu de souliers à semelle dure, c'est également le cas de positionnement d'une moquette épaisse ou avec un revêtement au niveau de sol (figure II.10), ainsi que le même cas d'exploitation d'un matériau résilient entre le tuyau et son collet, ou un joint souple entre la baignoire et le mur.

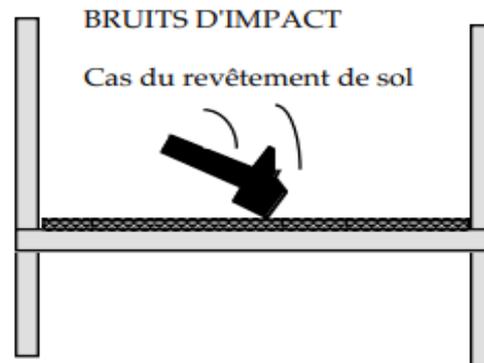


Figure II.10 : Revêtement du sol pour lutter contre les bruits de choc (Source : Delétré, 2004)

Ces matériaux sont donc plus performants quand leur épaisseur est plus importante. Ils sont recouverts d'une couche plus résistante à l'eau, au poinçonnement, à l'usure ou aux produits chimiques (Delétré, 2004).

- **Création des coupures dans la masse de la structure** : ce principe représente le cas d'exploitation de quelques parquets flottants ou des dalles flottantes (figure II.11) ou la disposition d'un socle sous une pompe, une chaudière, ...

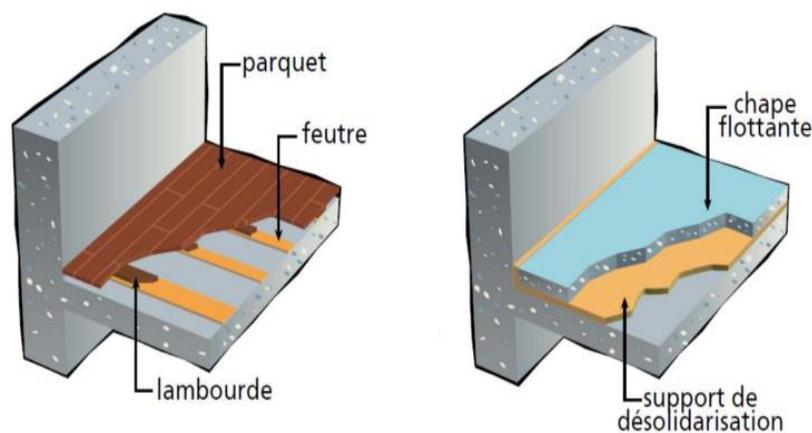


Figure II.11 : Isolation acoustique de plancher (Source : Nouredine, 2012)

Ces chapes et dalles flottantes sont très efficaces, elles peuvent accueillir tous les revêtements de surface. Elles sont plus performantes lorsqu'elles ont une épaisseur importante. Elles représentent l'inconvénient d'être très couteuses et difficile à réaliser (Delétré, 2004).

- **Création d'une coupure à la sortie du choc** : ce principe est basé sur la réalisation des plafonds suspendus (figure II.12).

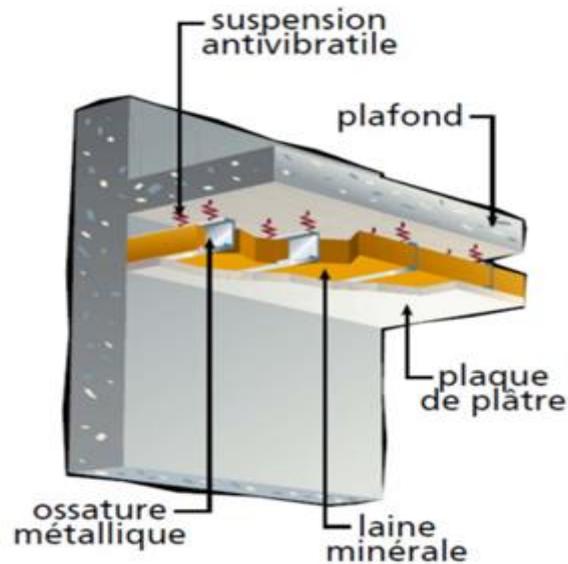


Figure II.12 : Le plafond suspendue (Source : Nouredine, 2012)

Le plafond suspendu est la solution que les utilisateurs "du dessous" ont adoptée. Cette solution est peu efficace, car les transmissions indirectes seraient prédominantes (Delétré, 2004).

II.2.1.5. Principes de l'isolation acoustique des bruits d'équipement

Les bruits d'équipement est le résultat de deux différentes catégories d'équipement que ce soit des équipements sanitaires ou des équipements techniques du bâtiment. Cette partie représente quelques équipements optimaux adoptés dans un bâtiment et leurs utilités pour un meilleur confort.

II.2.1.5.1. Les bruits des équipements sanitaires

- **Robinetterie** : la qualité sonore des robinets représente un facteur clé de l'achat. La qualité est indiquée par un indice "Ds" qui s'exprime en dB(A), plus il est important, plus le robinet est peu bruyant (Jedidi, 2017).
- **Canalisation** : pour limiter les bruits de tuyauterie, il est conseillé de largement dimensionner les tuyaux d'entrée ou de vidange, de ménager les drains d'admission d'air, et de réaliser des coudes à grand rayonnement de courbure. Il est également recommandé de fixer les tuyaux avec des colliers flexibles. Enfin, il existe des manchettes acoustiques, ou anti-bélier pour éviter les vibrations (Delétré, 2004).

- **Les appareils sanitaires :** Si le bruit des appareils est transmis par les murs ou les sols, l'objet vibrant doit être désolidarisé de son support. Les amortisseurs antivibratoires peuvent donc être placés entre l'objet et le plancher (machine à laver) ou bien entre l'objet et la paroi (chaudière murale) (Jedidi, 2017).

II.2.1.5.2 Les bruits des équipements technique du bâtiment

Il s'agit d'un grand nombre de matériaux et de matériels : les machines tournantes (ventilateurs), les ascenseurs, les systèmes de renouvellement d'air (VMC). Tous ces dispositifs ont un niveau pression acoustique qui accroît avec l'usure de leurs composants ou leur encrassement (filtres à air).

Le contrôle technique et le remplacement préventif des pièces sont souvent la garantie d'une bonne qualité de son. Un bruit anormal est généralement le témoin d'une usure de l'installation. C'est sur ce principe d'ailleurs que se base la technique de la maintenance préventive des machines dans l'industrie.

Ils sont généralement rassemblés dans des locaux techniques qui nécessitent d'être correctement situés par rapport aux locaux adjacents ou à proximité : éloignement, sas, double mur éloigné, isolation renforcée, ... (Delétré, 2004).

II.2.2. La correction acoustique

La correction acoustique est une stratégie appliquée dans le domaine de bâtiment, elle s'intéresse aux comportements des sons à l'intérieur d'un espace clos où elle traite la diffusion des sons dans la pièce qui contient simultanément la source sonore (émetteur) et les usagers (récepteur) en jouant sur les performances de réflexion et d'absorption des parois (Hamayon, 2006).

Une bonne correction acoustique d'un local dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- Les caractéristiques d'un local : volume, forme, mobilier, géométrie, ...
- Les matériaux exploités dans la conception des parois d'un local qui déterminent leurs qualités sonores (Adnet, 2018).

II.2.2.1. L'objectif de la correction acoustique

La correction acoustique assure une propre qualité acoustique d'un local, ses objectifs varient en raison de la fonctionnalité de l'espace, elle permettra de :

- Favoriser l'intelligibilité dans les espaces d'enseignement, les théâtres, les salles de réunion, ...

- Diminuer le niveau des bruits perturbateurs dans les espaces de bureaux, les ateliers, les locaux industriels, les lieux de circulation, ...
- Eviter l'effet de la réverbération et améliorer l'intelligibilité sonore des espaces qui veut dire que l'écoute doit être favorisée et le niveau du son diminuer en même temps comme les salles de sport, les restaurants, ...
- Assurer une clarté et une force sonore dans les espaces d'écoute, les salles musicales, ... (Adnet, 2018).

II.2.2.2. Principes de la correction acoustique

La correction acoustique traite l'absorption des divers sons pour le but de diminuer la réverbération, elle est évaluée par la mesure des paramètres suivants :

- Le coefficient d'absorption α des matériaux ;
- Aire d'absorption équivalent A ;
- La durée de réverbération d'un local T_R (Hamayon, 2006).

II.2.2.3. Absorption

L'énergie absorbée par un local influe de sa part sur la qualité acoustique à l'intérieur de ce milieu où lorsqu'il existe plus d'absorption, plus le temps de réverbération devient court, donc :

- Plus le son émis est clair car les réflexions le perturbent moins ;
- Plus le son émis est entendu fortement car il est moins nourri par les réflexions.

Au contraire, lorsqu'il existe moins d'absorption dans une salle, plus le temps de réverbération devient long, donc :

- Plus le son peut être confus car un son qui est émis précédemment et que se continue à se réfléchir peut-être superposer par un nouveau son émis ;
- Plus le son émis risque d'être entendu fortement grâce au nouveau son émis à un instant en le ajoutant des autres sons émis précédemment et que se continuent à se réfléchir (Hamayon, 2010).

II.2.2.3.1. Les matériaux absorbants

Les matériaux absorbants atténuent la réflexion de l'énergie acoustique incidente ce qui permet de diminuer la réverbération. Il se trouve trois grandes familles de matériau absorbant :

-Matériaux poreux et fibreux : dans le domaine de l'acoustique, les matériaux poreux et fibreux (laine de verre, de roche, mousses) ont un caractère d'absorption qui contiennent une

porosité ouverte (qui représente le rapport entre le volume des vides et le volume total) ce qui veut dire que leurs pores ont une communication entre- eux (figure II.13).

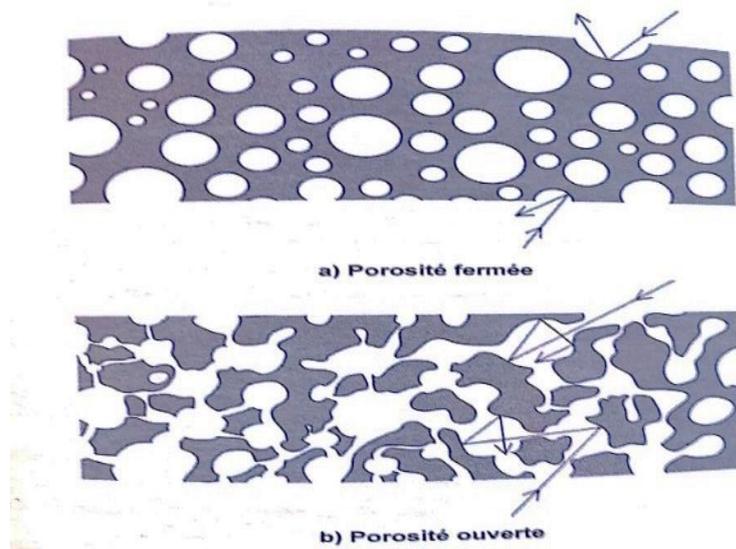


Figure II.13 : Matériau poreux (Source : Hamayon, 2014)

Les ondes sonores mis en mouvement l'air qui existe à l'intérieur de ces matériaux. Elles libèrent de l'énergie sous l'effet de frottement des atomes d'air sur les matériaux, cette énergie acoustique se transforme en chaleur (Hamayon, 2010).

La figure ci-dessous présente les différentes courbes typiques de la variation de coefficient d'absorption α de chaque matériau absorbant exploité pour la correction acoustique des salles suivant la fréquence.

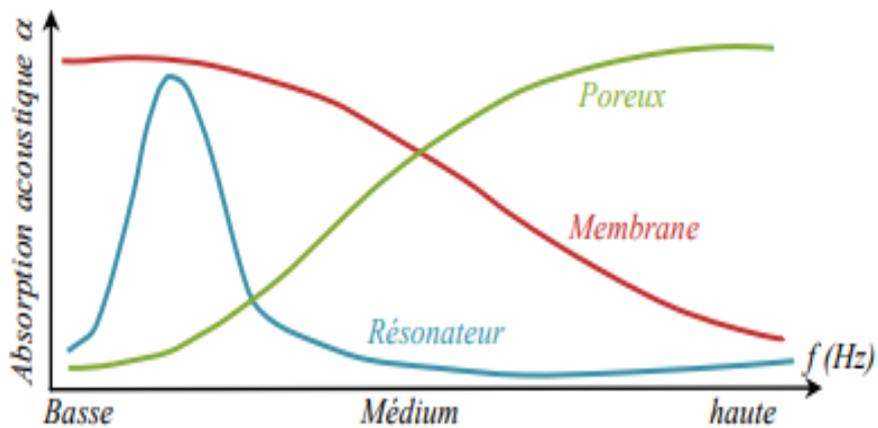


Figure II.14 : Courbes typiques de coefficient d'absorption α pour les trois catégories de matériau absorbant (Source : Horsin Molinaro & De Sa, 2017)

Dans les fréquences aiguës, l'absorption des matériaux poreux et fibreux est plus importante que dans les fréquences basses (figure II.14), ces dernières nécessitent l'augmentation de l'épaisseur du matériau pour augmenter leur absorption (Barles et al., 2017).

-Résonateurs : le résonateur est un récipient contenant un volume intérieur avec son col (tube étroit) qui assure une communication avec l'extérieur (figure II.15). L'air situé dans le tube agit comme une masse élevée sur un ressort. C'est le même principe utilisé lors d'une absorption acoustique par un panneau perforé situé à proximité d'une paroi (Barles et al., 2017).

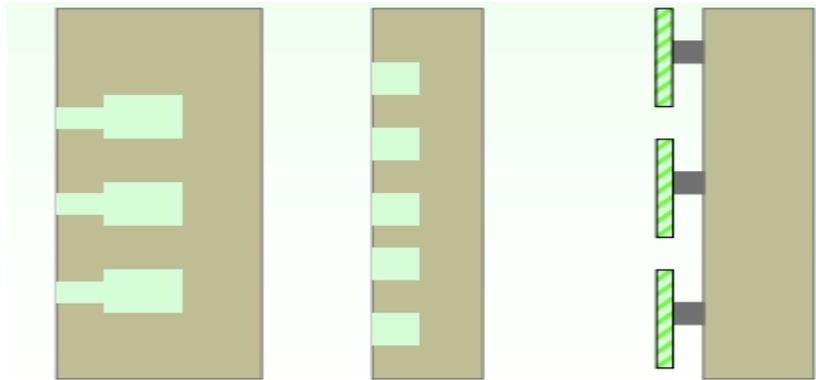


Figure II.15: Système absorbant résonateur (Source : Atienza & Balez, s.d.)

Chaque résonateur a sa propre fréquence qui dépend de la longueur de col, de son diamètre et sa section ainsi que le volume du corps. Leur absorption est très importante dans les médiums fréquences (figure II.14) qui se déterminent par la formule de Helmholtz :

$$F_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(L + 0,8D)V}}$$

Avec :

- F_0 : Fréquence propre de résonateur (Hz) ;
- c : Célérité du son (m/s) ;
- S : Section du col (m^2) ;
- L : Longueur du col (m) ;
- D : Diamètre du col (m) ;
- V : Volume du corps (m^3) (Hamayon, 2014).

-Membranes : les membranes appelées aussi « les panneaux fléchissant » ou « les diaphragmes » sont des résonateurs mécaniques. Ils sont composés de panneaux (ou de tissus

impermeables) posés à quelques centimètres d'un mur qui retient plus ou moins l'air qui se situe sur leur face arrière (figure II.16).

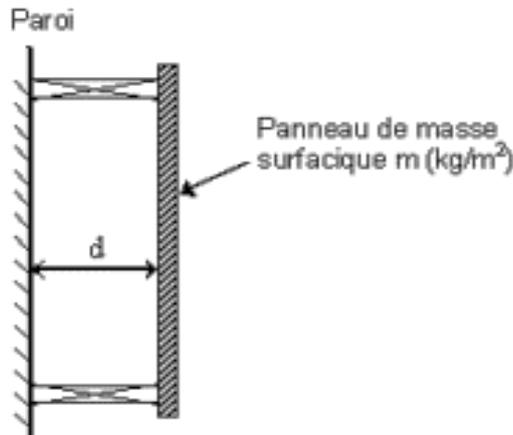


Figure II.16 : Schéma d'une membrane (liège) (Source : Vuylsteke, 2012)

Les membranes sont exploitées pour l'absorption des fréquences basses (figure II.14) qui sont déterminées par la relation suivante :

$$F_0 = \frac{600}{\sqrt{m \times d}}$$

Avec :

- F_0 : Fréquence de résonance (Hz) ;
- m : Masse surfacique du panneau fléchissant (kg/m^2) ;
- d : Distance séparant le panneau de la paroi (cm) (Hamayon, 2014).

II.2.2.3.2. Diffusion

La diffusion acoustique est un phénomène qui caractérise la répartition homogène des ondes sonores dans une salle ou la structure des surfaces qui la composent. Elle est produite simultanément en raison du phénomène de réfraction, de réflexion et de diffraction du son sur une paroi dont l'onde incidente se répartit dans des différentes directions. Plus la surface qui reçoit l'onde sonore est irrégulière plus elle la diffuse (Cherpillod, 2010).

II.2.2.3.3. Traitement des locaux

Le volume, la géométrie et la qualité d'absorption, de réflexion et de diffusion des parois d'un local ont un impact primordial sur la qualité sonore de cet espace. Ils doivent être adaptés pour son utilisation (Hamayon, 2014).

-Volume optimal : le choix du volume optimal concerne principalement l'acoustique des grandes salles tel que : les salles de concert qui sont destinées à la musique.

Le volume optimal dans ces espaces est très important pour prendre en compte l'absorption des parois et de mobilier, il dépend de l'usage de chaque espace (Hamayon, 2014).

-Géométrie optimale : la géométrie d'un local est un paramètre très important dans la propagation des ondes acoustiques et la qualité acoustique d'un espace. la géométrie optimale d'un local est déterminée par nombreuses méthodes, parmi lesquelles : la maquette, l'acoustique géométrique et la simulation informatique.

- Méthode de la maquette : permet d'étudier un projet en trois dimensions par des maquettes réalisées à différentes échelles de 1/10 jusqu'à 1/50.
- Méthode de l'acoustique géométrique : consiste à appliquer les mêmes règles des rayons lumineux aux rayons sonores. Elle permet de faire une étude en deux dimensions tout en donnant, dans une salle, des traces sonores trop complexe.
- Méthode de la simulation informatique : appelée aussi « la méthode des rayons et des sources-images » consiste à la réalisation d'une image tridimensionnelle d'une pièce et la simulation de la diffusion et de l'absorption d'une source et d'un récepteur qui définit chacune des surfaces. Elle permet de déterminer plusieurs facteurs de l'acoustique des salles comme : la pression acoustique, la durée de réverbération, ... (Hamayon, 2014).

II.3. Le confort acoustique dans les milieux scolaire

Des études récemment menées ont montré l'importance de l'environnement sonore dans le déroulement de l'apprentissage au milieu scolaire. En effet, l'exposition au bruit peut engendrer des problèmes de mémoire et des troubles de l'attention, une mauvaise intelligibilité de la parole, ce qui peut conduire à une détérioration du comportement et à une fatigue auditive. Dans l'enquête PISA de 2009, près de 20 % des élèves interrogés ont déclaré ne pas être en mesure de bien travailler en raison des nuisances sonores (Guigou Carter et al., 2016).

II.3.1. Source de bruit dans les équipements scolaires

La pollution sonore dans le milieu d'enseignement est un véritable problème vécu par l'ensemble de la population scolaire. Les sources de bruit dans les établissements scolaires sont nombreuses. La figure ci-dessous montre ces différentes sources qui influent négativement sur la santé physique et mentale et les capacités d'apprentissage.

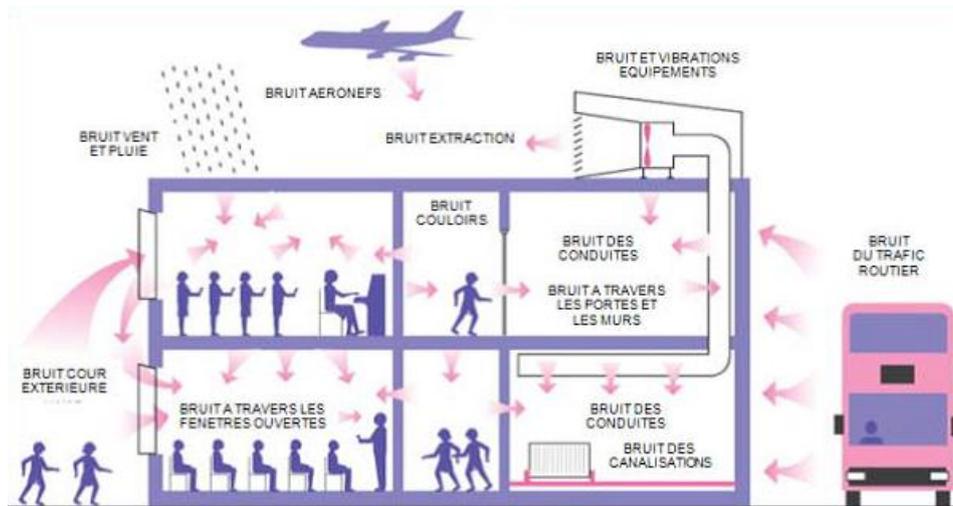


Figure II.17 : Source de bruit dans les écoles (Source : www.renovermonecole.be/fr)

Les sources de bruit se situent soit à l'extérieures du bâtiment scolaire (trafic ferroviaire et routier, bruit aérien, activités industrielles) ou intégrées à l'activité de l'école (sonneries, entrée et sortie des classes, etc.). Elles peuvent aussi être dues à la conception et à l'architecture de ces milieux (mauvaise disposition des locaux, matériaux et volumétrie qui favorisent la réverbération, de mauvais choix de composants de façade, ...) ou même par le comportement des usagers des locaux (discussions inutiles, bruits de chute de matériel, bruit de chaises, ...) (Clotuche, 2015).

II.3.2. Réglementation du confort acoustique dans les équipements scolaires

Les conditions de la réglementation acoustique ont pour but de garantir aux usagers des performances d'isolation acoustique minimale in-situ afin que les pollutions sonores perçues dans le bâtiment ne perturbent pas leur bien-être.

II.3.2.1. Intelligibilité

Au sein d'une salle de classe non traitée acoustiquement, l'importante réverbération ne permet pas d'écouter convenablement les mots dites par l'enseignant. La réglementation oblige à un traitement acoustique qui se concrétise par la fixation d'une surface de revêtements absorbants permettant la satisfaction de l'objectif. L'intelligibilité de la parole est améliorée, mais peut encore être renforcée par la position des produits absorbants, par exemple en recouvrant de nombreux murs par des matériaux absorbants (Gamba, 2017).

La figure ci-dessous présente les différentes actions qu'il faut les prendre en considération pour l'atténuation de niveau de bruit dans les divers bâtiments.

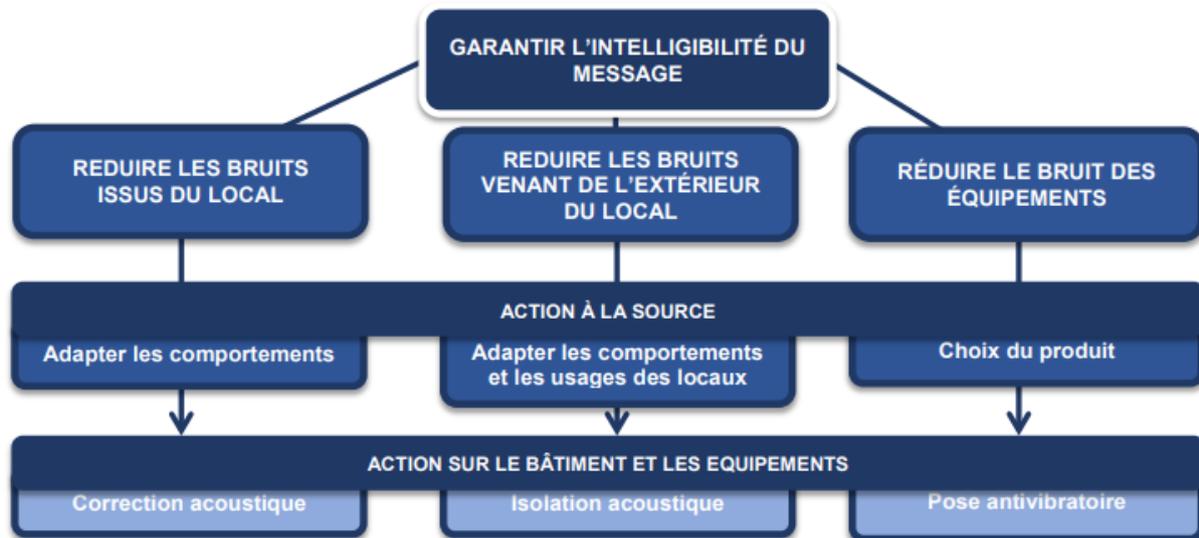


Figure II.18 : Solution pour une meilleure intelligibilité (Source : Clotuche, 2015)

Pour assurer l'intelligibilité du message dans les salles de classe, il faut analyser et viser l'origine des nuisances sonores et les diminuer par des actions diverses. L'intelligibilité d'un message est considérée comme satisfaisante lorsque 95% des phrases sont bien comprises, elle est indiquée par STI (Speech Transmission Index) (Lecointre, 2012).

II.3.2.2. Temps de réverbération

L'acoustique de la salle peut influencer considérablement l'intelligibilité de la leçon donnée par le professeur. Le "confort acoustique" est lié à la sonorité de la salle considérée. Plus la durée de réverbération est longue, plus on constate un phénomène d'écho, et plus la pièce devient bruyante. Le temps de réverbération est lié au volume de la pièce ainsi qu'aux propriétés d'absorption des matériaux employés dans la pièce (Lecointre, 2012).

Le tableau suivant montre les valeurs de temps de réverbération à respecter dans les différentes pièces d'un établissement scolaires.

Tableau II.1 : Durée de réverbération à respecter dans les établissements d'enseignements

(Source : Gamba, 2017)

Locaux meublés et non occupés :	Durée de réverbération moyenne T_r (s):
Salles de repos, salles d'exercice et salles de jeux des écoles maternelles	$0,4 \leq T_r \leq 0,8$ s
Local d'enseignement, de musique, d'étude, d'activités pratiques, salle de restauration et salle polyvalentes d'un volume $\leq 250\text{m}^3$	$0,4 \leq T_r \leq 0,8$ s
Local médical ou social, infirmerie, sanitaire, administration, foyer salle de réunion, bibliothèque, CDI	$0,4 \leq T_r \leq 0,8$ s
Local d'enseignement, de musique, d'étude, d'activités pratiques $> 250\text{m}^3$, sauf atelier bruyant	$0,6 \leq T_r \leq 1,2$ s
Salle de restauration d'un volume $> 250\text{m}^3$	$T_r \leq 1,2$ s
Salle polyvalente d'un volume $> 250\text{m}^3$	$0,6 \leq T_r \leq 1,2$ s Et une étude particulière obligatoire
Autres locaux et circulations accessibles aux élèves d'un volume $> 250\text{m}^3$	$T_r \leq 1,2$ s si $250\text{m}^3 < V \leq 512\text{m}^3$ $T_r \leq 0,15\sqrt[3]{V}$ (s) si $V > 512\text{m}^3$
Salle de sport	

Ces locaux doivent répondre aux exigences de la réglementation concernant la correction acoustique des lieux de travail. Les résultats provisoires doivent être validés par la réalisation d'une étude précise à ces locaux (Gamba, 2017).

II.3.2.3. Isolement acoustique vis-à-vis de l'environnement extérieur et entre locaux

Sensibiliser les élèves et les enseignants à l'environnement sonore dans lequel ils se trouvent et aux conséquences des nuisances sonores sur la santé et l'apprentissage est un premier pas qui peut s'avérer très utile. En choisissant des solutions simples, pratiques à appliquer et adaptées au public, tout le monde sera responsabilisé et attentif à son engagement. Cette sensibilisation

peut se réaliser notamment en demandant au maître de gymnastique de baisser la musique, en réorganisant les horaires de midi, remplaçant les sonneries criardes par une musique plus calme, en graissant les charnières des portes, ... (Clotuche, 2015).

L'isolation acoustique entre les pièces ou les niveaux sonores des bruits d'impact ou d'équipement doivent être contrôlés, autrement ils peuvent causer ou augmenter la gêne susmentionnée (Gamba, 2017).

II.3.3. Spécificités acoustiques des différents espaces

L'obtention d'une meilleure acoustique dans les établissements scolaires repose sur le choix d'un traitement acoustique optimal et sur le respect des exigences recommandées pour chaque pièce de cet équipement.

II.3.3.1. Salle de classe

La salle de classe est le milieu d'apprentissage où le maître fait passer son savoir en se basant sur la communication orale et les élèves le suivent et participent à la séance et discutent entre eux. En classe, les élèves ont besoin d'un milieu favorable qui encourage la concentration, l'apprentissage et la compréhension. Ce milieu doit satisfaire à de nombreux paramètres, à savoir une lumière suffisante, une température ambiante, une aération confortable et une bonne intelligibilité de la parole. La figure II.19 illustre la propagation du son dans une salle de classe sans et avec un traitement acoustique.

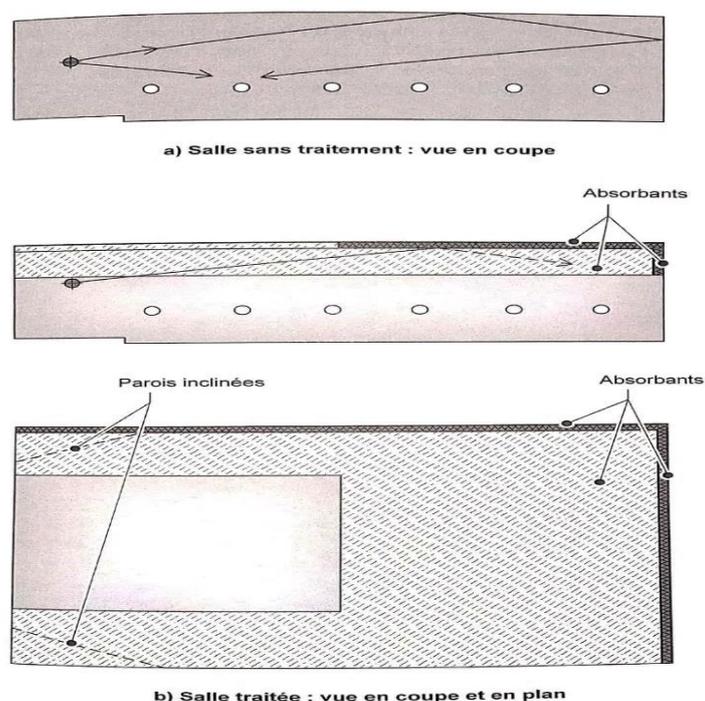


Figure II.19 : Salle de cours avec et sans traitement acoustique (Source : Hamayon, 2014)

Donc pour garantir une bonne intelligibilité de la parole, il est nécessaire de traiter le mur latéral et le mur du fond de la pièce ainsi que la partie du plafond qui se trouve au fond en utilisant des matériaux absorbants (Hamayon, 2014).

II.3.3.2. Cantine

La cantine scolaire est généralement un grand espace dans lequel se répartissent les chaises et les tables pour les élèves. Ce grand espace est associé à l'espace de cuisine. Il s'agit parfois d'une simple division visuelle à travers un léger cloison, mais le plus souvent il s'agit d'une salle spécifique dotée d'une porte entrée.

Dans une cantine, il faut être capable de parler à son voisin sans avoir élevé la voix pour masquer le bruit des discussions des tables voisines à travers l'exploitation des divers dispositifs acoustique (figure II.20).

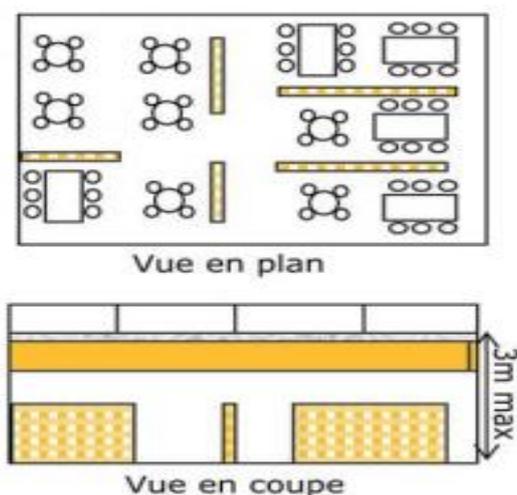


Figure II.20 : Traitement acoustique d'une cantine scolaire (Source : www.bruit.fr)

Deux dispositifs sont à mettre en application :

- **Les écrans entre les tables :** ils réduisent les interactions qui existent entre tables. Ils sont obligatoirement étanches et ont une masse au minimum de 10 kg/m^2 . Ils peuvent être réflecteurs ou être revêtus par un matériau absorbant sur leur partie supérieure ;
- **Le traitement absorbant du plafond :** les plafonds à baffles verticaux sont bien adaptés au problème acoustique, si la hauteur de milieu les permet et il faut les poser le plus bas possible (Rapin, 2017).

II.3.3.3. Espaces de circulation

Les espaces de circulation regroupent les aires de transition dans les institutions qui sont les halls d'entrées, les cages d'escaliers, les couloirs. Dans ces espaces, le but essentiel est de

contrôler l'amplification de la réverbération afin de ne pas engendrer de pollutions sonores dans les autres locaux.

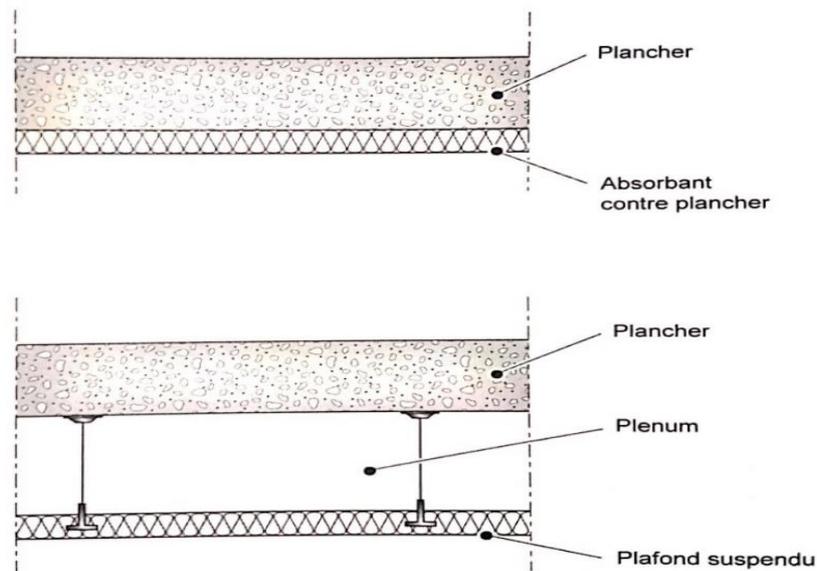


Figure II.21 : Disposition des matériaux absorbants dans la circulation

(Source : Hamayon, 2014)

La figure ci-dessus montre que le traitement acoustique des espaces de circulation est assuré généralement par la disposition des matériaux absorbants dans le plafond qui peuvent être appliqués contre le plancher haut ou être fixés en suspension tout en bénéficiant d'un plenum (qui améliore les performances dans les basses fréquences) (Hamayon, 2014).

II.3.3.4. Amphithéâtre

La qualité des réverbérations est un paramètre important pour le jugement de l'acoustique dans l'amphithéâtre qui doit être réalisé dans un endroit calme. S'il est intégré dans un bâtiment, il faut qu'il soit isolé avec soin par rapport aux espaces adjacents.

La répartition des récepteurs en gradins permet de favoriser l'absorption avec l'utilisation des réflecteurs dans le côté de l'enceinte afin de diffuser les ondes acoustiques au milieu et au fond de cet espace (figure II.22).

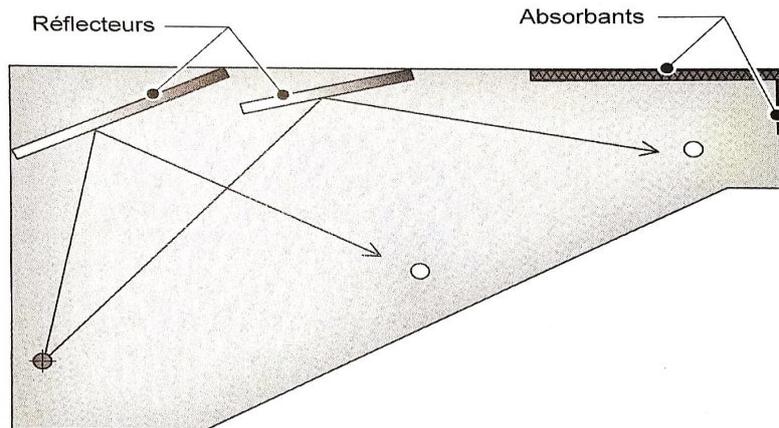


Figure II.22 : Traitement acoustique d'un amphithéâtre (Source : Hamayon, 2014)

Les parois latérales d'un amphithéâtre doivent les rendre diffusantes à travers le recouvrement par des reliefs afin de casser leurs parallélisme et le sol doit être traité avec linoléum ou avec un revêtements élastiques dans le but d'avoir une meilleure homogénéité du champ acoustique (Hamayon, 2008).

II.3.3.5. Gymnase scolaire

Le traitement acoustique des salles de sport scolaire est assuré par des matériaux absorbants particuliers qui résistent aux chocs et permettent de pratiquer les jeux de ballon au faible nuisances sonores (figure II.23).

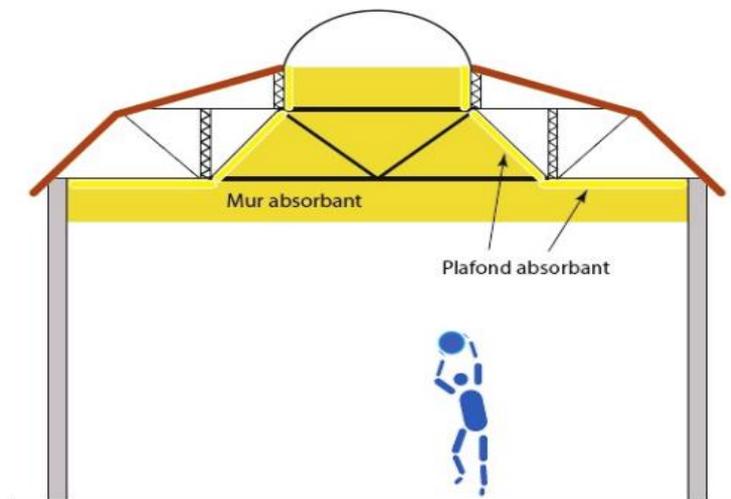


Figure II.23 : Traitement acoustique d'un gymnase (Source : Rapin, 2017)

Le gymnase scolaire nécessite un traitement au niveau de plafond et les deux parois verticales adjacentes pour un meilleur confort acoustique (Hamayon, 2014).

II.3.3.6. Bibliothèque

La bibliothèque est un lieu de culte dans l'établissement scolaire qui nécessite une bonne intelligibilité de la parole et un environnement intérieur calme. Les conditions de confort acoustique seront assurées dans cet espace par l'exploitation des matériaux qui ont de coefficients d'absorption supérieurs sur les plafonds ainsi que le revêtement de plancher par de liège ou des moquettes (Hamayon, 2014).

Conclusion

La qualité acoustique d'un espace est un important facteur pour le confort des usagers, elle est assurée par deux stratégies qui sont la correction et l'isolation acoustique. La correction acoustique concerne l'espace où se trouve simultanément l'émetteur et le récepteur du son, elle dépend de deux facteurs primordiaux : les caractéristiques d'un local (volume, forme, ...) ainsi que les matériaux de construction. L'isolation acoustique se fait entre deux milieux différents, par l'exploitation de nombreux dispositifs absorbant les ondes sonores dans le local de réception et l'adoption des bonnes stratégies de construction dès la phase de conception.

Dans les milieux scolaires, il existe plusieurs types de bruits qui sont engendrés par différentes sources (les élèves, sonneries, trafic routier, chute de matériels, ...). Donc, il faut réduire et limiter ces nuisances sonores ; qui influent négativement sur les usagers de ce bâtiment ; par la prise en considération des conditions du confort acoustique. Un meilleur confort acoustique dans les établissements d'enseignement est assuré grâce aux réglementations imposées sur le temps de réverbération de chaque espace de cet équipement qui dépend de la forme, l'indice d'absorption acoustique de chaque paroi et celui de mobilier et des objets disposés dans le local, ainsi que le bon choix des matériaux absorbant selon le fonctionnement des surfaces à traiter.

DEUXIÈME PARTIE : PRATIQUE

CHAPITRE III :

**Etude empirique du confort acoustique dans les établissements
scolaires**

CHAPITRE III : Etude empirique du confort acoustique dans les établissements scolaires

Introduction

Dans les deux chapitres antérieurs, nous avons présenté l'ensemble des concepts relatifs à notre recherche. Dans ce troisième chapitre, d'abord nous présentons le cas d'étude et son implantation par rapport aux nuisances sonores existants dans le site afin de déterminer l'impact de contexte immédiat sur le cas d'étude, puis nous montrons la méthodologie approuvée pour effectuer notre étude analytique sur la qualité d'écoute dans les établissements scolaires. Cette étude analytique comporte deux aspects : l'aspect objectifs et l'aspect subjectifs. Le premier est défini par la prise des mesures acoustique in situ à travers les instruments appropriés, le deuxième est défini par la perception de chaque individu des phénomènes sonores par le biais d'un questionnaire attribué aux usagers de l'espace.

III.1. Présentation de cas d'étude

III.1.1. Situation

Le bâtiment étudié a une relation directe avec le thème de recherche ainsi que le projet de fin d'étude, il représente le plus récent établissement secondaire fonctionnel de type 1000 dans la région de Bejaia.



Figure III.1 : Situation géographique de lycée (Source : Auteur, 2021)

Le cas d'étude ; lycée Issad, Ahmed O Bachir ; est un établissement scolaire étatique de type 1000 élèves qui se situe à sidi Ali Lebhar. Il a été ouvert par le ministre de l'éducation Noria Ben Ghebrit au cours de l'année 2016.

III.1.2. Environnement immédiat

Le lycée se situe au periphérie d'un contexte urbain, il est exposé aux plusieurs nuisances sonores causé par les différents bâtiments et routes existant dans le site.

La figure III.2 (voir l'annexe A) montre l'ensemble des sources qui influent sur le fonctionnement de lycée Issad Ahmed O Bachir.



Légende:

- | | | |
|---|---|--|
|  Lycée Sidi Ali Lebhar |  Route nationale 9 |  Marché de Gros |
|  Aéroport de Bejaïa |  Route Ferdjellah Mohand Oulhadj |  Zone urbaine |
|  Terrain de sport et air de jeux | | |

Figure III.2 : Les nuisances sonores influants sur le fonctionnement de lycée

(Source : Google Earth traitée par l'Auteur, 2021)

① Aéroport de Bejaia - Abane Ramdane - : c'est un carrefour aérien très important de la république algérienne. Le lycée est exposé aux nuisances sonores aéroportuaires qui correspond à des bruits aériens extérieurs (trafic aérien).

② Route nationale 9 : c'est une voie principale, très proche au lycée, elle a un caractère commercial, ce qui veut dire qu'elle contient trop de mouvement se qui cause des forts bruits aériens (trafic routier) pour cet établissement.

③ Boulevard Ferdjellah Mohand Oulhadj : c'est la route qui mène vers l'aéroport, elle structure la zone de Sidi Ali Lebhar et a une fonction de transit ainsi que commercial. Le mouvement au niveau de cet route est moins important que la RN9 mais elle influe de sa part sur le lycée par des bruits aériens extérieurs (trafic routier).

④ Marché de Gros : c'est un entreprise qui est consacré pour les activités de secteur industriel notamment : toute les boissons et l'alimentation. Les bruits résultant de ce marché sont des bruits aériens extérieurs.

⑤ Zone urbaine : représente le cadre bâti de Sidi Ali Lebher qui englobe trois typologies: les logements collectifs, les logements individuels ainsi que les équipements. Cette zone influe sur l'établissement à travers des bruits aériens extérieurs.

⑥ Terrain de sport et l'air de jeux: est considéré comme un espace de détente pour les usagers de cette zone. Ils ont une influence très importante sur le fonctionnement des activités de lycée vue leurs proximité.

III.1.3. Description de cas d'étude

Le choix de lycée Issad Ahmed O Bachir a été faite selon la spécificité de la thématique de recherche, la faisabilité de l'étude et les cibles assignées (faire un diagnostique sur la situation acoustique dans les milieux scolaires et comprendre le fonctionnement de cet aspect).

Le principe de conception de ce lycée est basé sur une composition compacte, qui se compose de plusieurs blocs du forme rectangulaire ou carré attachés entre eux pour obtenir la forme de cette établissement qui inclue une grande cour au milieu afin de garantir le contrôle et la surveillance des élèves (figure III.3).

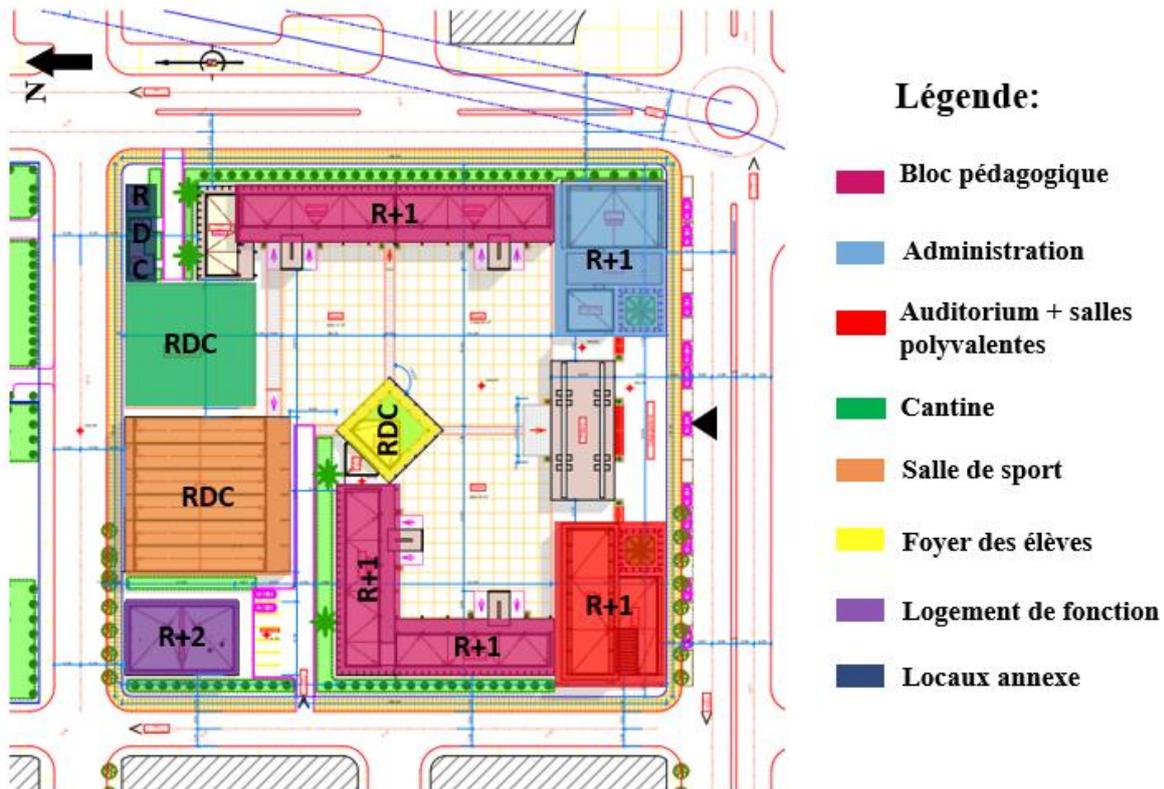


Figure III.3 : Fonctionnement des blocs de lycée Issad Ahmed O Bachir

(Source : Auteur, 2021)

Le principe adopté comme base pour le projet consiste à étendre l'ensemble du programme tout au long de la parcelle, augmentant également l'emprise au sol tout en réduisant l'impact visuel du complexe.



Figure III.4 : Lycée Issad Ahmed O Bachir (Source : Auteur, 2021)

L'objectif de choix ce cas d'étude est pour démontrer les impacts de nuisances sonores et le bruit (aérien et routier) sur le comportement acoustique des élèves à travers les choix et les

décisions qui sont effectués par l'architecte durant la période de la conception a propos des divers éléments et dispositifs exploiter dans cet établissement scolaire pour mieux exercer ses fonctions.

III.1.4. Analyse acoustique de la salle de classe

En plus des différents bruits aériens produits par de nombreux batiments et des voies extérieurs de l'environnement immédiat, il existe d'autres type de bruit à l'intérieur de ce lycée.

On cite dans le 1er lieu la cour de récréation qui produit des forts bruits aériens intérieurs surtout dans la journée ou les élèves pratique le sport. Aussi, on trouve le même type de bruit au niveau de couloir qui est aussi la source d'un bruit d'impact causant par la chute d'un objet par les élèves ou les personnels. Le bruit d'équipement joue aussi son rôle dans cette établissement, il est due au différentes sources tels que : les canalisations de l'eau (eau de chauffage par les radiateurs) à l'intérieur de la salle de classe, le e bruit gênants causée par l'électricité, ...

Le lycée de Sidi Ali Lebhar compte 18 salles de classe d'un seul plan type rectangulaire de 10m*6,2m (62m²). Elles ne comportent aucun traitement acoustique et sont orientées vers l'est et le ouest. Caque classe contient trois rangés de table, le premier rangé de coté de la porte a six tables, les deux autres ont sept tables.

La figure III.5 illustre le plan type utilisé dans la conception de cet établissement.

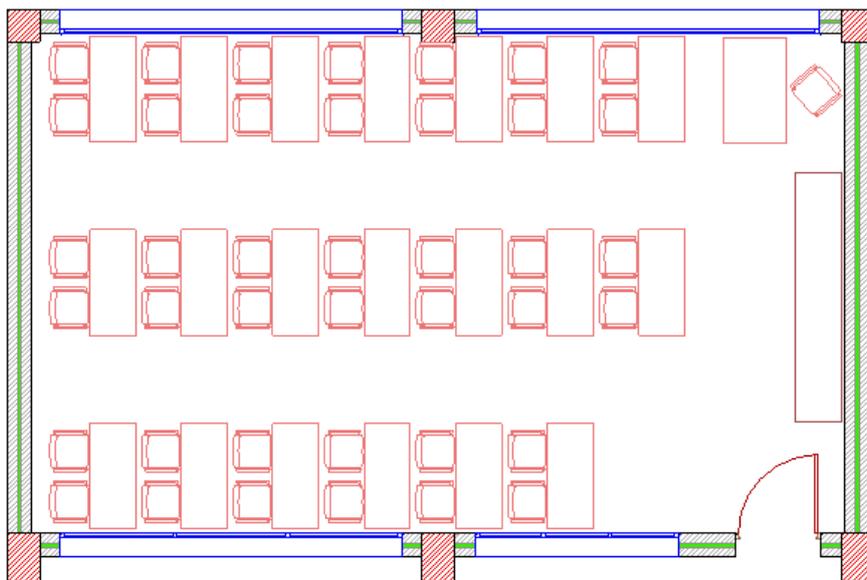


Figure III.5 : Plan type d'une salle de classe (Source : Auteur, 2021)

Les cloisons intérieure des salles de classe sont composés de maçonnerie (brique creuse) de 10 cm et les parois extérieurs sont des murs de 30 cm : un mur extérieur de 15 cm et le mur

intérieur et de 10 cm avec une isolation (lame d'air) de 5cm. Les planchers sont à corps creux de 20 cm avec une hauteur sous plafond de 3.06 m.

La figure III.6 présente les différentes composantes des parois et le plancher d'une salle de classe.

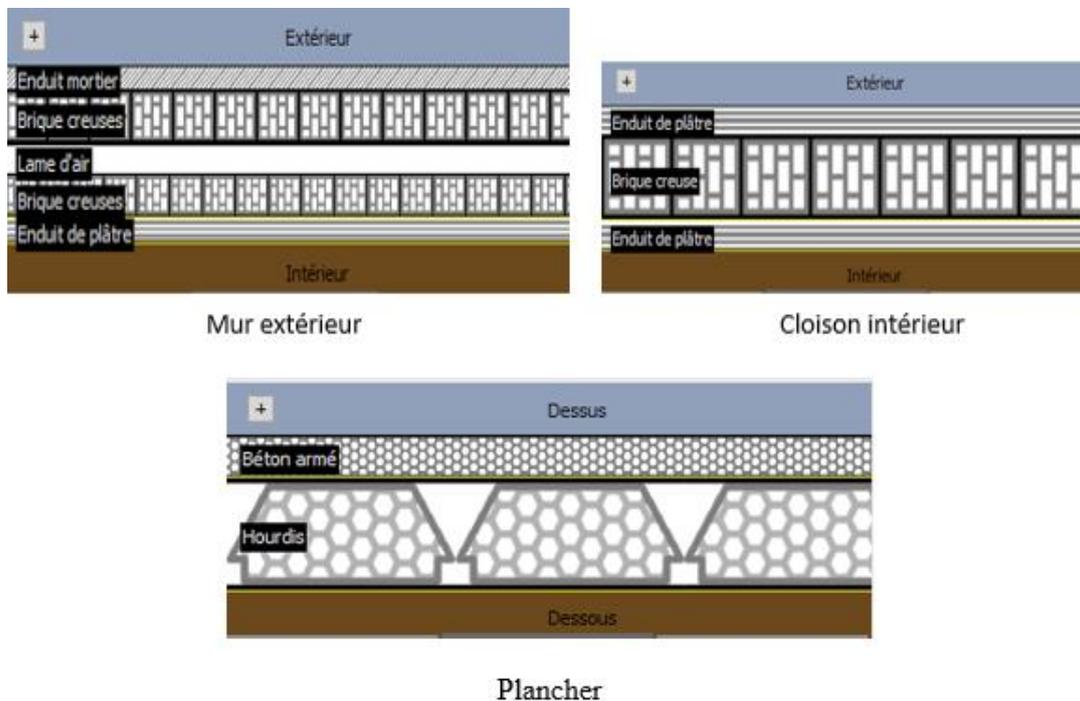


Figure III.6 : Vue en coupe des composantes des parois et de plancher de la salle de classe

(Source : Auteur, 2021)

Pour le mobilier utilisé dans les salles de classe on trouve des tables à 04 pieds et des chaises scolaires en bois avec une structure métallique.



Figure III.7 : Le mobilier exploité dans les salles de classe (Source : Auteur, 2021)

Le tableau III.1 montre le coefficient d'absorption de quelques matériaux exploités dans les salles de classe.

Tableau III.1. : Les coefficients d'absorption des matériaux (α) (Source : Bruitsociete, 2006)

Coefficient d'absorption des matériaux (α)	Fréquence en hertz (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Brique creuse	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
Bloc de béton plein	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Bois	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Platre sur support solide	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04
Mortier de ciment	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Béton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Parpaings	0,35	0,35	0,80	0,60	0,45	0,55
Carrelage	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
Gravier en vrac	0,25	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80

L'absorption des parois et leur matériau est défferente selon les fréquences, et le coefficients d'absorption est présenté par la bande d'octave. Dans les établissements scolaires, les coefficients d'absorbtion α utilisés prennent en compte que les ces trois fréquences 500, 1000 et 2000 Hz (Hamayon, 2014).

III.2. Méthodologie d'étude du confort acoustique

Cette recherche s'appuis sur une étude empirique sur la qualité sonore au sein de cette établissement scolaire à travers l'étude qualitative et quantitative afin de réponde sur la problématique.

III.2.1. Etude quantitative du confort acoustique

La recherche est focalisé sur un établissement scolaire et plus précisément sur un lycée qui est choisi grace à la nouveauté de sa construction. Cette étude quantitative a été effectuée sur le cas d'étude par la prise de mesures in situ.

III.2.1.1. Déroulement et protocole de prise de mesure

Pour enrichir l'étude analytique du confort acoustique dans les établissements scolaires, on met en pratique la méthode quantitative qui consiste à prendre des mesures acoustiques dans le cas d'étude (lycée Issad, Ahmed O Bachir) à l'aide d'une application sonomètre afin d'obtenir des résultats concrets.

Le cas d'étude ; lycée Issad, Ahmed O Bachir ; se compose des salles de classe qui sont inscrit dans un même modèle architecturale que ce soit dans la surface, l'orientation, la finition, l'aménagement et leurs capacité d'accueil. Pour cela nous avons focalisé notre étude sur une seul salle de classe qui vas s'appliquer sur tous les autres salles par la suite.

Le cas d'étude est la salle de classe numéro 16 qui se situe au 1^{er} étage dans le coté est de lycée (Figure III.8). Le choix de cet endroit est fait parceque il représente la salle de classe la plus défavorable en raison de son exposition aux problèmes sonores externes provenant de terrain de sport et l'aire de jeux à proximité de lycée et les nuisance du marché de gros, et aussi son exposition aux sources de bruit internes venant de la cours de récréation, le couloir, la salle de sport ainsi que les classes adjacentes.

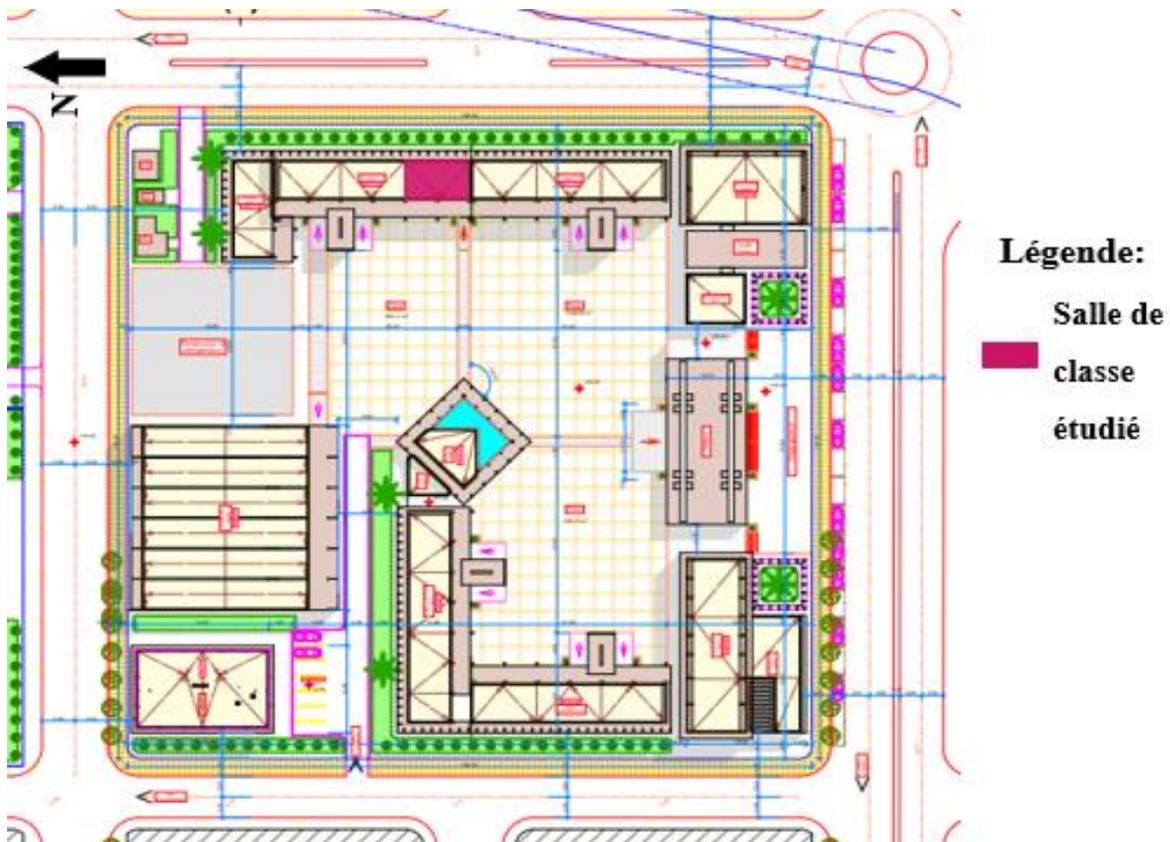


Figure III.8 : L'emplacement de la salle de classe étudié (Source : Auteur, 2021)

Premièrement, nous avons relevé le plans de cette salle, puis nous avons dessiner une grille de d'une distance de 1m*1m à l'aide d'un mètres rubans sur une hauteur de 1,2 m afin de déterminer les points ou les mesures acoustiques seront effectuées.

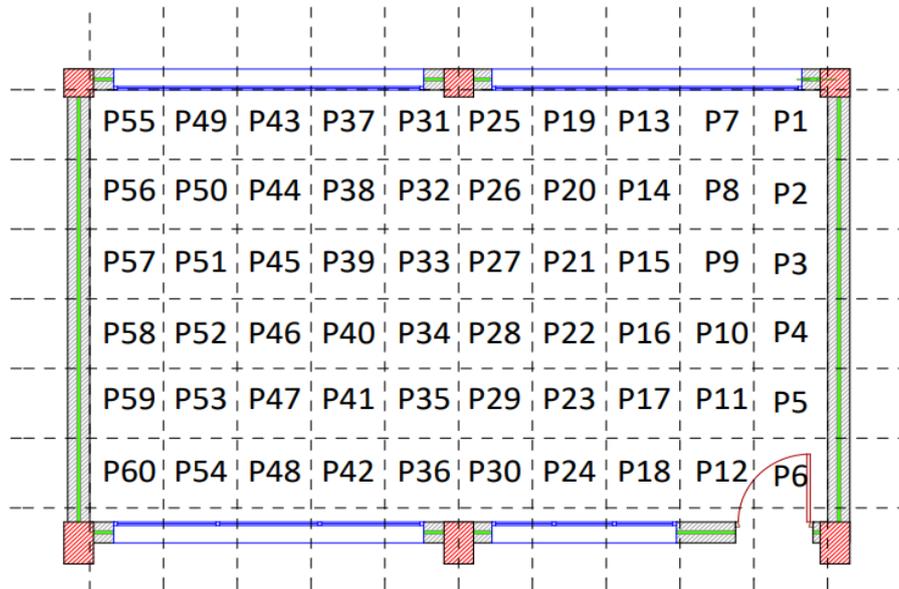


Figure III.9 : La grille tracée pour la prise des mesures (Source : Auteur, 2021)

Deuxièmement, nous avons pris les mesures au milieu des différents carrés définissent par la grille. Ces mesures acoustiques sont portées sur 3 scénarios, pendant la période des vacances scolaires, dans une journée défavorable qui était bruyante sous l'effet de la présence de plusieurs sources sonores dans l'entourage (bruit des gens qui jouent dans le terrain de sport et l'aire de jeux, bruits de marché du gros, décollage d'un avion, circulation routière, etc.) :

- **Le calme** : ou il n'existe aucune source de bruit à l'intérieur de salle de classe afin d'étudier les caractéristiques physiques des matériaux exploités dans la construction et le niveau de bruit aérien extérieur de contexte immédiat.
- **L'existence d'une source de bruit** :
 - a. **Une source de bruit interne stable** : ou niveau du bureau avec le même niveau sonore (55 dB : bruit ambiant) afin de déterminer la performance acoustique de l'espace intérieur. Ce niveau sonore est choisi par rapport aux normes exigées.
 - b. **Une source de bruit externe** : ou niveau de couloir avec un niveau sonore de 70 dB qui reflète le niveau des sources produites lors de l'existence des élèves dans cet endroit afin d'évaluer l'isolation acoustique entre les espaces.

Troisièmement, nous avons dessiné et coloré les carrés à partir des mesures obtenues.

III.2.1.2. Instrument de prise de mesure

L'application sonomètre est un instrument de mesure du niveau de la pression acoustique qui est une grandeur physique attachée au volume du son.

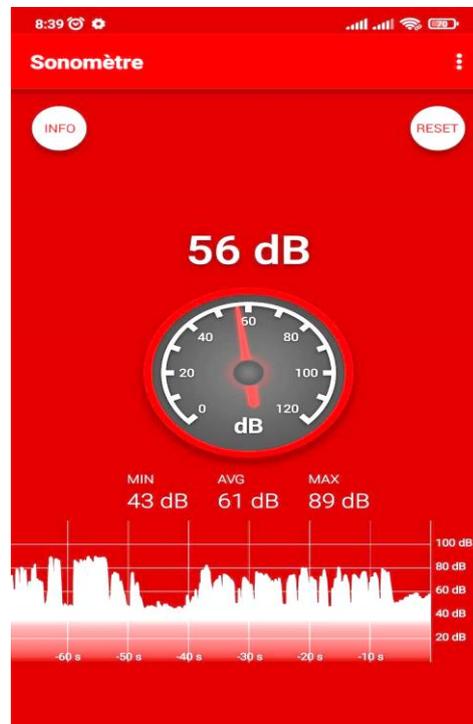


Figure III.10 : Application sonomètre utilisée pour la prise de mesure

(Source : Auteur, 2021)

Cette application s'utilise dans l'acoustique environnementale pour les études de la quantité des nuisances sonores et dans l'acoustique architectural afin d'évaluer la répartition de bruit dans des locaux. Elle exprime des niveaux sonores en décibels (dB) sous diverses formes.

Caractéristiques

L'application sonomètre se caractérise par :

- Désigne les décibels par mesure ;
- Indication la référence du bruit actuel ;
- Affichage des valeurs de décibels min / avg / max ;
- Visualisation des décibels par des graphes ;
- Calibrage de décibel pour chaque instrument.

La figure III.11 montre le calibrage entre l'instrument sonomètre et l'application utilisée pour effectuer la recherche.



Figure III.11 : Calibrage entre les résultats obtenus par l'instrument et l'application lors d'une essai (Source : Auteur, 2022)

Pour confirmer la fiabilité de cette application utilisée et sa précision, nous avons comparé les résultats obtenus par cette dernière avec l'instrument sonomètre lors d'un essai et nous avons trouvé que les valeurs des deux instruments sont similaires ou avec un très faible écart.

III.2.2. Etude qualitative du confort acoustique (le questionnaire) :

L'étude qualitative se concentre sur la satisfaction et la sensation acoustique des élèves de cet établissement secondaire étudié. A cet effet, une enquête de 30 questionnaires a été réalisé et distribué dans ce cas d'étude afin de vérifier les hypothèses de la recherche. Chaque questionnaire se compose de 11 questions qui sont fermées (voir l'annexe B).

Le questionnaire est élaboré en deux langues ou les questions sont posées en français avec traduction en arabe ci-dessous pour le but d'assurer leurs compréhension.

III.2.2.1. Objectif de questionnaire

Le questionnaire fait partie de l'audit acoustique réalisé au niveau de lycée Sidi Ali Lebhar. Le but de ce questionnaire est de bien appréhender et repérer les désagréments causés par les nuisances acoustiques potentiellement existantes au niveau de la salle de classe. Les questions obligent le répondant à un choix limite et à une forme de réponse précise. La population ciblée par cette évaluation est les élèves qui représentent les utilisateurs de ce milieu.

Ce questionnaire porte sur 3 axes principaux :

- Le bruit perçu au niveau de lycée et plus précédemment au sein de la salle de classe à travers l'exploitation des questions permettant de savoir la source de ces nuisances ainsi que la période la plus défavorable de la journée.
- Le confort acoustique dans la salle de classe lors de l'explication de cours par l'enseignant (la sensation et la satisfaction acoustique des élèves pendant la présence des nuisances intérieures et extérieures).
- Effets de ces bruits sur le comportement des élèves.

III.3. Résultats et interprétations

Les informations obtenues au cours de cette étude s'inscrivent dans deux axes :

- Des informations scientifiques mesurées à l'aide d'une application sonomètre.
- Des informations d'analyse de questionnaire.

Toutes ces informations seront analysées avant l'étude, pendant et après l'étude. Elle seront présentées à l'aide des logiciels tels que : ArchiCAD, Word, OriginLab afin de réaliser des diagrammes et des graphiques représentatifs.

III.3.1. Etude quantitative du confort acoustique :

Les premiers résultats de cette recherche sont basés sur l'analyse des cartes obtenues par l'étude quantitative. Ils sont répartis en trois volets selon les scénarios présentés dans le protocole de prise de mesure.

- **Scénario de calme :**

Les résultats obtenus par la prise de mesure lors du scénario de calme dans la salle de classe sont indiqués dans la figure III.12 après leurs représentations dans un tableau (voir l'annexe C.1).

La figure suivante montre les différentes valeurs de décibels mesurés à l'aide de l'application sonomètre au sein de la salle de classe dans son état naturel.

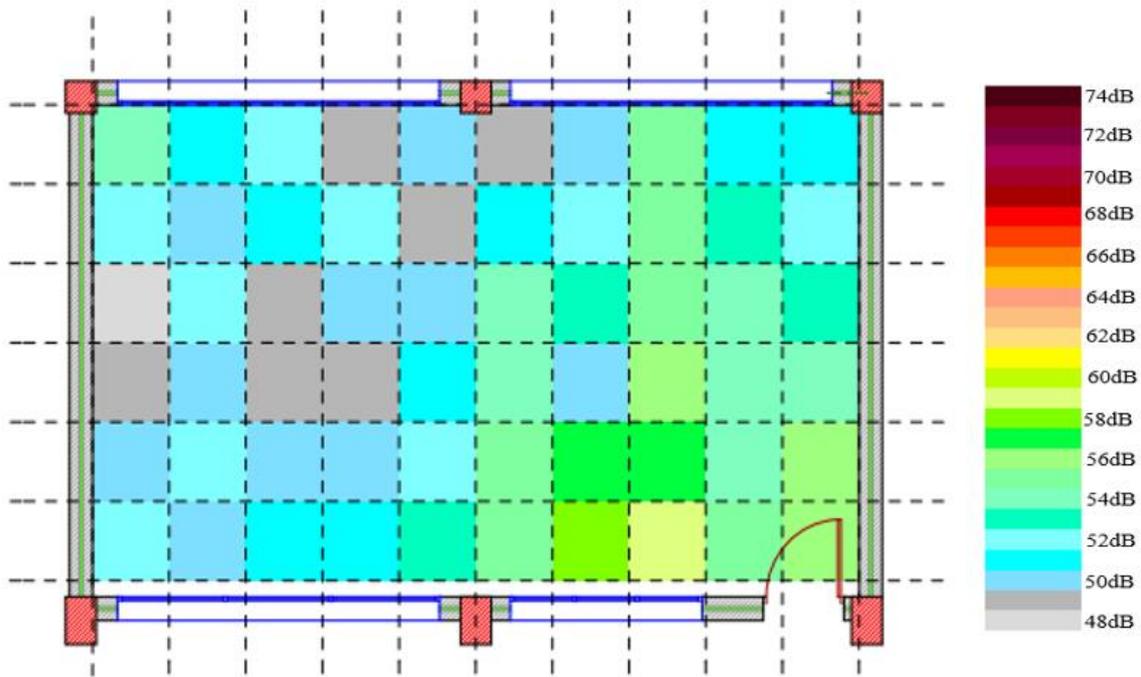


Figure III.12: Carte de résultats lors d'un scénario du calme (Source : Auteur, 2022)

Sur la base des mesures réalisées, on remarque que le niveau de pression acoustique se situe entre un minimum de 48 dB et un maximum de 59 dB dans le cas d'un silence total au niveau de la salle de classe. Ces valeurs sont conformes aux normes pour une communication normale, mais cela ne signifie pas que la qualité acoustique de cette salle de classe est bonne car elle ne répond pas norme de bruit de fond (ou personne ne parle) qui ne doit pas dépasser 50 dB.

D'après la figure ci-dessus, on observe que le niveau sonore enregistré est d'une irrégularité remarquable à cause des composantes de la paroi et la présence d'une grande surface vitrée dans les deux côtés de la salle, ce qui permet la transmission directe des ondes sonores extérieures vers l'intérieur. A cet effet, on voit que, dans la partie la plus proche à la porte et les fenêtres de ce côté, les valeurs du son sont plus augmentées (du 52 dB jusqu'à 59 dB), mais par contre les valeurs sont normalisées (de 48 dB jusqu'à 52 dB) au milieu et au fond de la salle de classe.

Donc, le comportement acoustique dans la salle de classe étudiée affirme que cette espace est inconfortable car les valeurs de niveau sonore obtenues sont supérieures à la plage de confort acoustique (entre 30 dB et 60 dB : bruit d'ambiance), ce qui provoque l'insatisfaction des usagers en appuyant ces résultats aux recherches faites par les chercheurs Zannin et Marcon (2006) sur le confort acoustique dans un école brésilien.

Ce scénario montre que l'inconfort acoustique enregistré est influencé premièrement par les caractéristiques des matériaux de construction exploités dans cette salle qui ont une faible performance acoustique, puis par l'existence obstacles extérieurs qui changent la direction des ondes acoustiques venants des sources extérieurs (trafic routier, marché de gros, ...).

- **Scénario de l'existence d'une source de bruit :**
 - a. **Une source de bruit interne stable :**

Les valeurs enregistrées (voir l'annexe C.2) dans le cas de l'existence d'une source bruyante interne stable (55 dB : bruit ambiant) au niveau de la salle de classe sont illustrées dans la figure suivante :

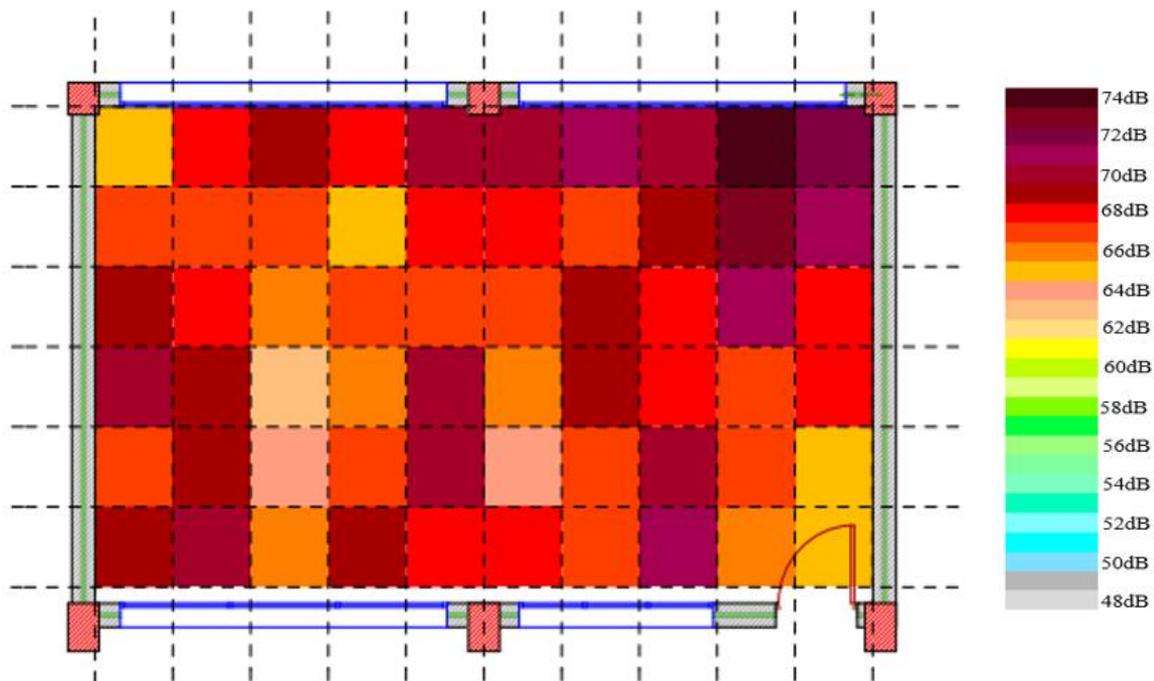


Figure III.13 : Carte de résultats lors d'existence de bruit interne (Source : Auteur, 2022)

D'après cette figure, on observe que le niveau sonore varie entre un minimum de 63 dB et un maximum de 74 dB. Ces valeurs ne sont pas conformes aux normes exigées qui ne doit pas dépasser 63 dB. On remarque que le niveau de pression acoustique représente une irrégularité remarquable, ou dans le coin de bureau de l'enseignant et le coin opposé à ceci ; les valeurs enregistrées sont plus hausses (de 68 dB jusqu'à 74 dB) et dans les autres parties qui restent les valeurs varient entre de 63 dB jusqu'à 68 dB. Ces résultats signifient que cette salle compris une mauvaise qualité acoustique sous l'effet d'un seul paramètre qui est les matériaux de sa construction. Ces derniers sont exploités aléatoirement sans la prise en considération de l'aspect

acoustique, ils engendrent une grande irrégularité en raison de la synchronisation des ondes sonores directes et réfléchies qui s'accumulent entre eux, ce qui donne ces résultats croissants.

Donc, le comportement acoustique de la salle de classe lors de la présence d'une source sonore intérieure affirme l'absence de confort acoustique dans ce local, ce qui affecte négativement sur le confort acoustique des élèves et leurs compréhensions.

b. Une source de bruit externe (au niveau de couloir)

La figure suivante présente les niveaux sonores enregistrés (voir l'annexe C.3) dans le cas de l'existence d'une source sonore externe au niveau du couloir de lycée (70 dB : reflète le niveau sonore produit lors de l'existence des élèves dans le couloir).

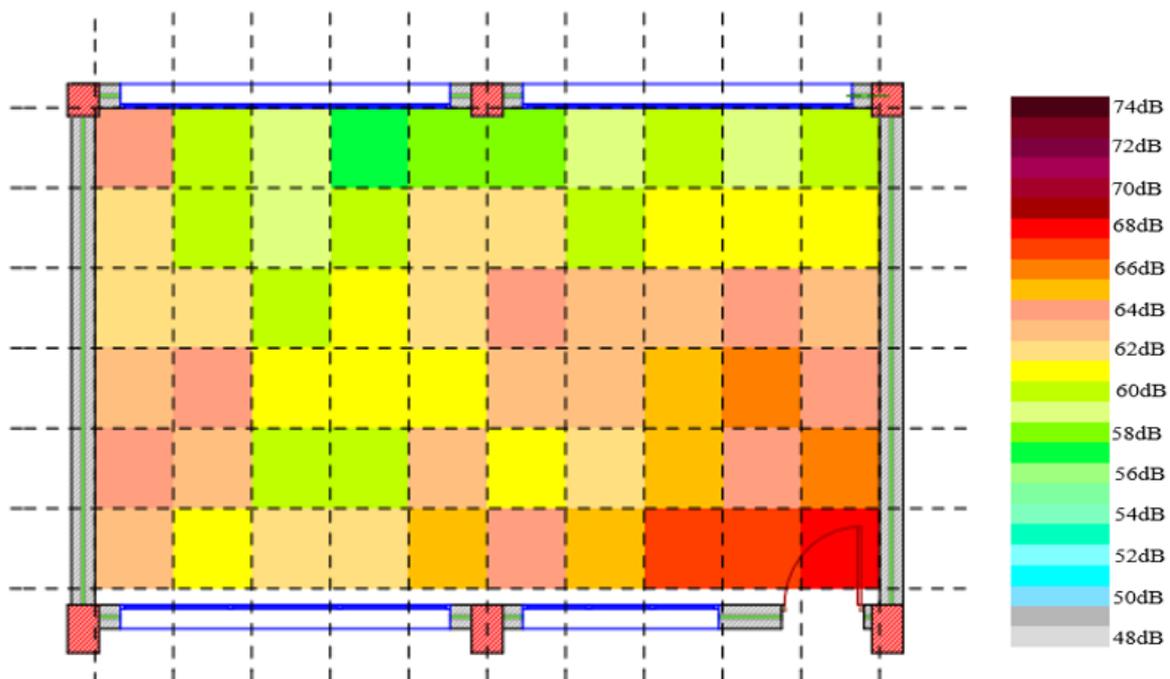


Figure III.14 : Carte de résultats avec l'existence de bruit externe (Source : Auteur, 2022)

On constate que le niveau sonore change entre un minimum de 57 dB et un maximum de 68 dB. Ces valeurs sont conformes aux normes exigées mais cela ne dit pas que la qualité sonore de cette salle est bonne.

On remarque que le niveau sonore est plus augmenté (de 61 dB jusqu'à 68 dB) dans la partie orientée vers le couloir (le côté de la porte), cette hausse des valeurs est en raison de la présence des ouvertures en simple vitrage et la porte qui influe sur la sensation auditive des usagers d'une manière négative. Mais dans l'autre partie de la salle de classe, on observe que les valeurs enregistrées sont normalisées (de 57 dB jusqu'à 61 dB) sous l'influence de la distance

d'éloignement à la source de bruit. Au fond de la salle de classe, on voit aussi une petite augmentation des valeurs (de 62 dB jusqu'à 64 dB) par rapport à celles enregistrées dans le côté de bureau à cause de la synchronisation des ondes sonores transmises à l'intérieur de la salle de classe.

Donc, le comportement sonore de cette salle de classe affirme l'absence du confort acoustique dans le cas d'existence d'une source sonore externe sous l'effet de la négligence de la stratégie d'isolation acoustique dès la phase de la conception ce qui influe négativement sur le comportement des usagers de l'espace.

En conclusion, cette étude quantitative effectuée sur une salle de classe du lycée Issad, Ahmed O Bachir à Sidi Ali Lebher permet de connaître et de déterminer les différents éléments qui influencent le fonctionnement acoustique de la salle et le comportement de ses usagers.

À partir des valeurs obtenues et des trois cartes présentées ci-dessus, nous pouvons constater une très grande variation des niveaux de pression acoustique dans une petite zone de 62 m² et un affaiblissement de ces niveaux lorsque la source sonore s'éloigne du récepteur. Ceci est dû aux différents modes de propagation du son (absorption, réflexion et transmission) qui causent un comportement acoustique inconfortable pour les utilisateurs et une mauvaise intelligibilité de la parole lorsqu'ils sont ignorés dans la conception de l'espace. Les phénomènes de propagation du son sont contrôlés à travers le choix adéquat des matériaux de construction. Par conséquent, dans notre cas, nous déterminons que les salles de classe de ce lycée n'offrent pas les meilleures conditions d'apprentissage à ses élèves en raison d'un choix aléatoire des matériaux exploités dans la construction de la surface pleine et la surface vitrée ainsi que le manque de traitement acoustique intérieur et extérieur de ces espaces.

III.3.2. Etude qualitative du confort sonore (le questionnaire)

Les résultats de l'étude qualitative sont basés sur l'analyse de 28 questionnaires avec un pourcentage de 93,3% du nombre de trente questionnaires en raison de l'élimination de deux d'entre eux vue leurs réponses incomplètes. Ces questionnaires sont distribués aux élèves de la classe sur laquelle ont été effectuées les mesures quantitatives durant la période des devoirs de 3^{ème} trimestre, qui comptent 57,1% de filles et 42,9% de garçons.

Les figures ci-dessous montrent les différents résultats obtenus lors de cette étude au sein de l'établissement scolaire. En premier lieu, on commence par la figure III.15 qui illustre les résultats liés à la sensation d'écoute des élèves dans la salle de classe pendant les cours.

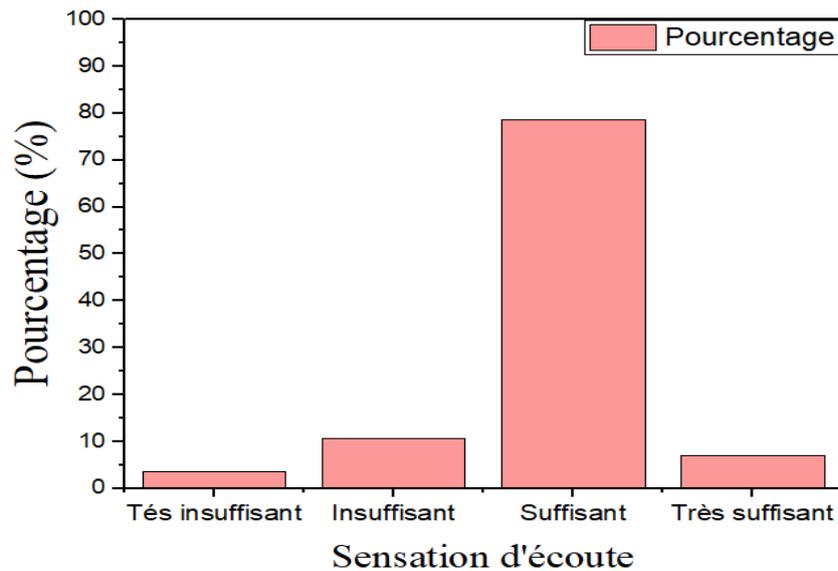


Figure III.15 : La sensation d'écoute des élèves dans la salle de classe

(Source : Auteur, 2022)

La sensation d'écoute pendant le cours est variable selon chaque élève, dont la quasi-totalité des usagers d'espace d'un pourcentage de 78,6% évaluent que la sensation d'écoute est suffisante à cause de l'occupation des places idéales dans la salle (au milieu) et 10,7% des usagers ont une sensation d'écoute insuffisante. Puis, on trouve un pourcentage de 7,1% des élèves ont une sensation d'écoute très suffisante contrairement à un pourcentage de 3,6% des usagers qui ont une sensation d'écoute très insuffisante.

Donc, la majorité des usagers de cette salle de classe trouve que la sensation d'écoute est suffisante pendant le cours ce qui affirme que cette salle offre des moyennes conditions pour le bon déroulement des études.

Les résultats atteints concernant les différentes sources potentielles de bruit à l'intérieur de lycée sont présentés dans la figure III.16.

D'après la figure ci-dessous, la première source de gêne dans cet établissement est la cour de récréation avec un pourcentage d'un de 39,3%, puis elle est suivie par les voies extérieures qui entourent le lycée avec un pourcentage de 32,1%. Un pourcentage de 28,6% est réservé pour les travaux extérieurs suivi par des travaux intérieurs avec un pourcentage de 25%. Les élèves aussi sont une source de bruit qui occupe de leur part un pourcentage important de 21,4%. Par rapport à les classes adjacents et les déplacements dans le couloir, les élèves interrogés les concédèrent comme des sources de gêne mais avec un petit pourcentage de 17,9%, de plus de ça, le mobilier aussi produit un bruit avec un pourcentage de 14,3%.

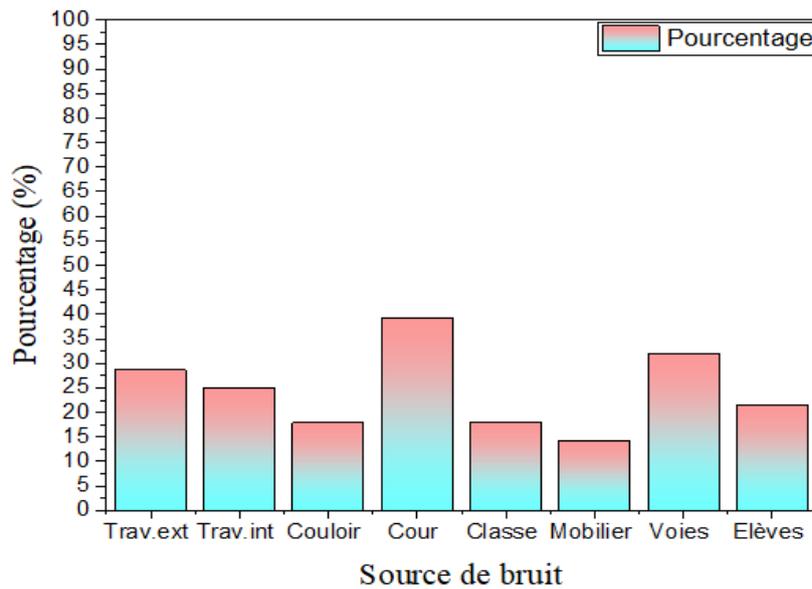


Figure III.16 : Les sources de bruit au sein de lycée (Source : Auteur, 2022)

Donc en générale, les bruits les plus gênants par rapport à la majorité des élèves venant de la cour de récréation et les voies extérieurs à cause de l'emplacement de ce lycée entre quatre voies et l'orientation des deux côtés vitrés des salles de classe sont orientés vers ces deux sources.

La figure suivante illustre les horaires les plus bruyantes pendant la journée au niveau de lycée.

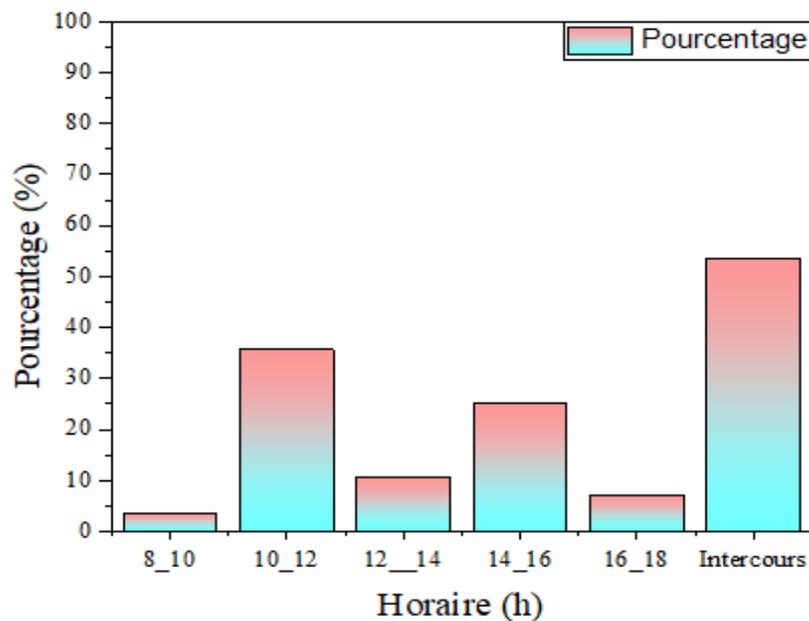


Figure III.17 : Les horaires sensible au bruit (Source : Auteur, 2022)

Pendant la journée, les horaires sensibles aux nuisances sonores sont inscrits entre les cours avec un pourcentage de 53,6% suivi par les horaires entre 10h et 12h avec un pourcentage de 35,7%. Un pourcentage de 25% concerne la période de 14h à 16h est mise en valeur par la population interrogée, puis la période de 12h à 14h avec un pourcentage de 10,7%.

Globalement, on détermine que les petites durées entre les cours sont les horaires les plus bruyant dans ce lycée à cause de déplacement de la quasi-totalité des élèves en même temps, et dans la période de 10h à 12h et 14h à 16h en raison des séances de sport qui s’effectuent au niveau de la cour de récréation.

La question 05 et la question 06 portent sur la détermination de la performance acoustique à travers le phénomène de réverbération et l’écho dans la salle de classe. La figure ci-dessous présente les résultats obtenus à propos de ces deux phénomènes.

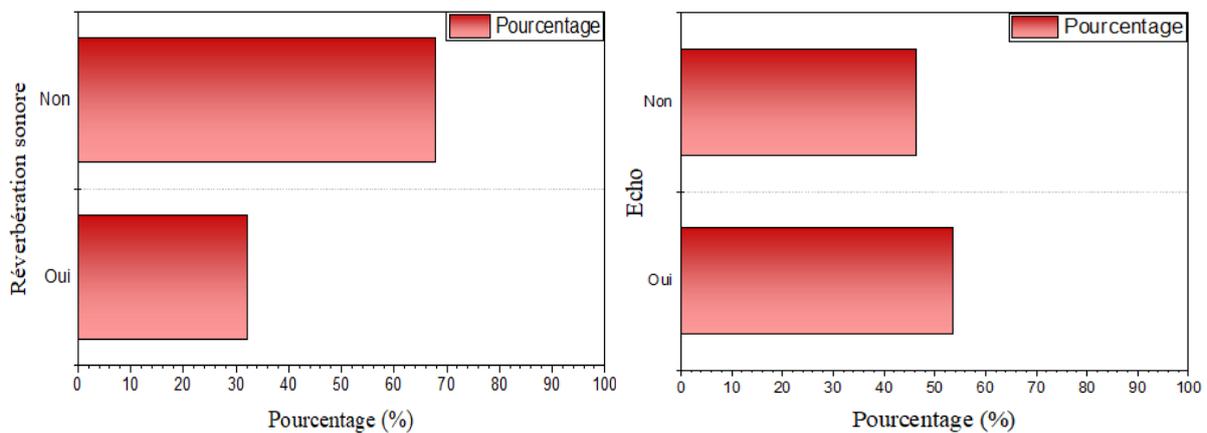


Figure III.18 : Sensation des élèves par rapport au phénomène de réverbération et d’écho dans une salle de classe (Source : Auteur, 2022)

D’après les réponses des élèves questionnés, ou 67,9% pensent que la salle ne renvoie pas le son avec un retard et un pourcentage de 32,1% mentionnent le contraire, on détermine que la perception du son par le récepteur ne pose pas des problèmes car il reçoit le son en même temps qu’il est émis. Mais ce local risque d’avoir le phénomène d’écho vue que la moitié de la population ciblée sont dérangé par le son qui se répète.

La répétition du son dans la salle de classe lors de la représentation des cours gêne chaque élève selon un degré qui est représenté dans la figure suivante :

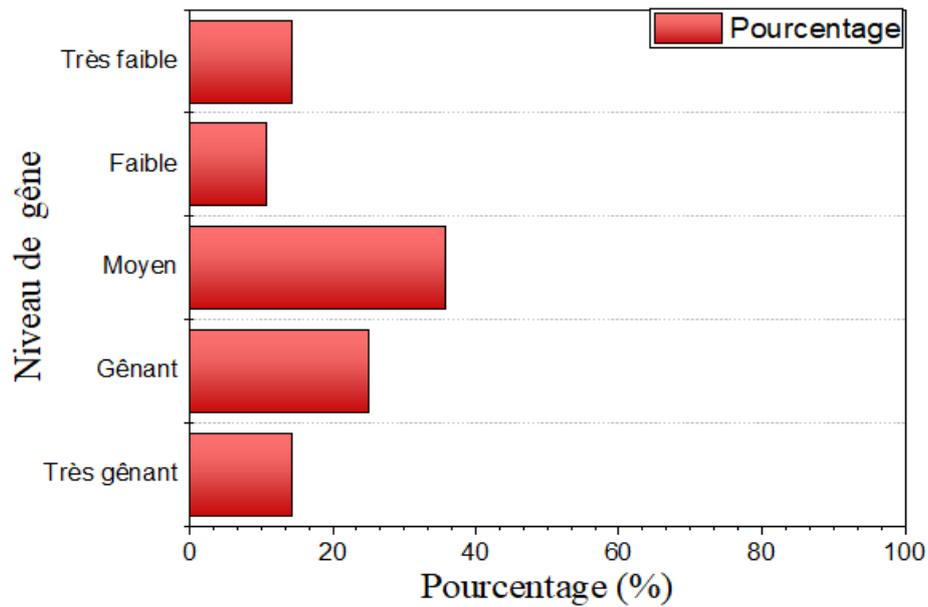


Figure III.19 : Le niveau de gêne de la répétition du son (Source : Auteur, 2022)

Cette figure illustre le niveau de gêne produit par la répétition du son au sein de la salle de classe. Un pourcentage de 35,7% des élèves interrogés évaluent le niveau de répétition comme moyen puis un quart de cette population signalent qu'il est gênant. Le degré très gênant et très faible sont indiqués par un même pourcentage de 14,3%. En finalisant par un pourcentage de 10,7% des élèves qui mentionnent que répétition de son est faible et ne pose pas un problème pour eux.

Globalement, on détermine que la salle de classe représente un espace inconfortable au terme du confort acoustique pour la plupart de ses usagers à cause de la réverbération sonore et l'écho.

La figure III.20 présente les résultats de l'influence des bruits sur le comportement des élèves. La quasi-totalité des élèves affirment que leur rendu scolaire est affecté par les divers bruits existant dans cet établissement d'enseignement.

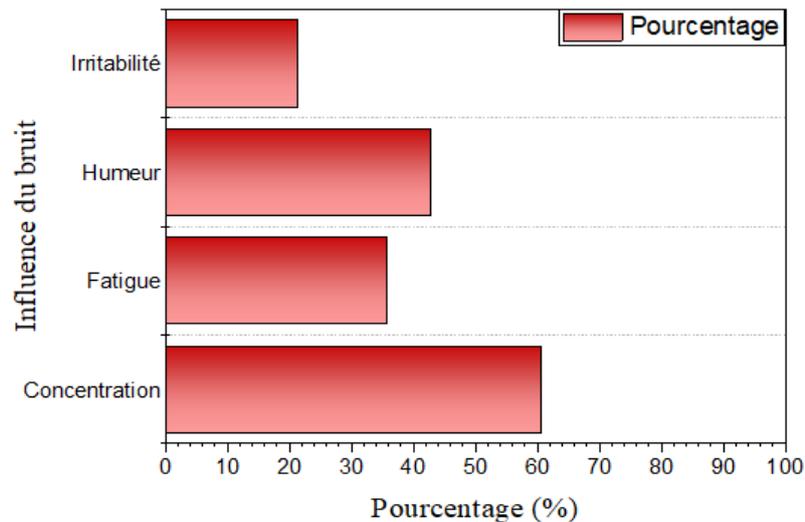


Figure III.20 : Les paramètres affectés par le bruit scolaire (Source : Auteur, 2022)

On constate que la concentration des élèves est le premier paramètre touché par les nuisances sonores avec un pourcentage de 60,7%, suivi par un pourcentage de 42,9% qui représente les réponses des élèves sur le facteur de l'humeur. Ces nuisances sonores ont un peu d'effet sur la fatigue de la population ciblée avec un pourcentage de 35,7% et sur leur irritabilité avec un pourcentage de 21,4%. Ces pourcentages démontrent que le bruit qui se présente au sein de lycée est un grand problème qui influe sur le rendu scolaire des élèves et plus précisément sur leurs concentrations.

Les résultats liés à l'évaluation du bruit qui vient de l'extérieur lorsque les ouvertures de la salle de classe sont ouvertes ou fermées sont représentés dans la figure III.21.

On constate, d'après la figure ci-dessous, que dans le cas de fermeture des fenêtres, la moitié de la population visée signale que le niveau de bruit est moyen et un quart constate que ce niveau est faible, puis on trouve un pourcentage de 14,3% qui affirme que le bruit extérieur est gênant même si les fenêtres sont fermées, contrairement à un pourcentage de 10,7% qui le trouve faible.

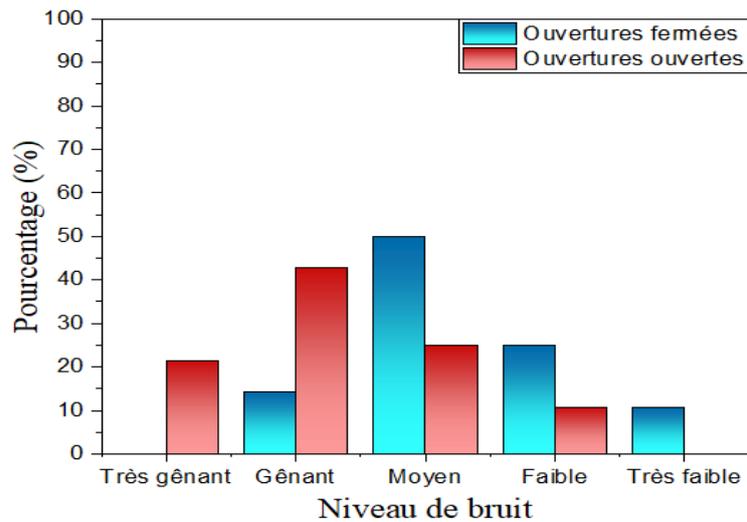


Figure III.21 : Le niveau de bruit lors de l’ouverture et la fermeture des fenêtres

(Source : Auteur, 2022)

On constate dans le cas des fenêtres ouvertes, un pourcentage de 42,9 des élèves interrogés trouve que les nuisances sonores venant de l’extérieur sont gênantes et un pourcentage de 25% mentionne que ce niveau est moyen. Le bruit est très gênant selon 21,4% de la population ciblée mais il est faible par rapport à 10,7% des usagers de cet espace.

Donc le niveau de bruit transmis de l’espace extérieur vers l’intérieur de la salle de classe varie en fonction de l’ouverture et la fermeture des fenêtres. Cette variation est en raison des caractéristiques physiques de vitrage exploité dans la conception de la salle de classe.

La figure suivante présente la satisfaction des usagers vis-à-vis le problème de bruit qui se focalise dans le cas d’étude.

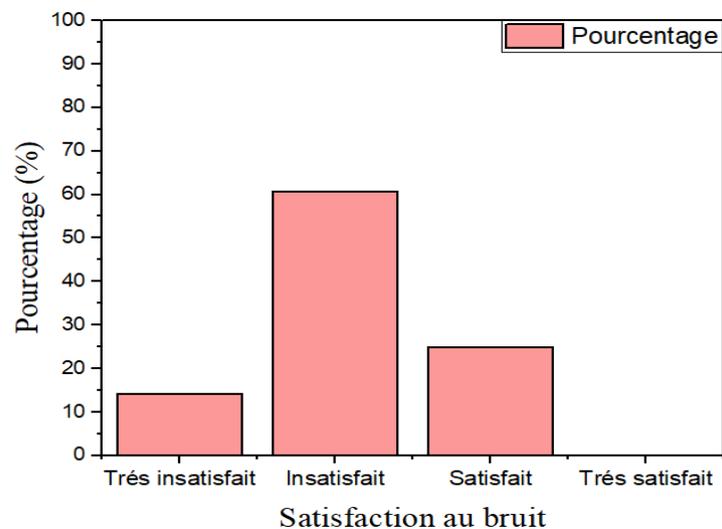


Figure III.22 : Satisfaction acoustique vis-à-vis le problème de bruit (Source : Auteur, 2022)

D'après la figure III.22, la plupart des élèves interrogés sont insatisfait vis-à-vis le problème de bruit avec un pourcentage de 60,7% et 14,3% sont très insatisfait à cause de leurs installations au fond de la salle de classe et à côté de la porte ainsi qu'au début de rangé à côté du bureau. Un quart de cette population sont satisfait parce qu'ils occupent une place au milieu de la salle.

Globalement, une certaine insatisfaction est générée dans cette classe vis-à-vis du problème acoustique dans l'établissement scolaire à cause de la réverbération du son et le phénomène d'écho qui se présentent dans ce local.

De cette analyse qualitative (questionnaire), on peut conclure que le problème majeur de qualité acoustique rencontré dans la salle de classe est celui de l'écho et de la réverbération. Ceux-ci sont générés par la réflexion du son sur les murs de la salle, ce qui influe négativement sur le bon fonctionnement de l'espace, l'intelligibilité de la parole ainsi que sur les performances académiques des élèves.

Conclusion

La détermination de la qualité sonore d'un espace se fait à partir des études sur les bâtiments existants tout en prenant en considération ces composants afin de mieux comprendre les phénomènes sonores présents dans ce milieu et les évaluer aux normes exigées pour pouvoir déterminer les différents problèmes et les solutionner. L'étude empirique effectuée dans le cas d'étude, qui réunit l'étude quantitative (mesures in situ) et l'étude qualitative (questionnaire), permet de connaître la performance acoustique des salles de classe, les facteurs qui influencent l'aspect sonore dans ces locaux, ainsi que la satisfaction et la sensation des élèves vis-à-vis des nuisances sonores existantes.

L'étude quantitative de cette recherche permet de connaître les divers éléments affectants sur le fonctionnement acoustique de la salle de classe ce qui génèrent des problèmes d'écho et de réverbération engendrant des dérangements sur le comportement des élèves et leurs performances académiques (questionnaire). En conséquence, les résultats obtenus lors de cette étude empirique affirment l'absence de confort acoustique à l'intérieur des salles de classe, ce qui affecte négativement le comportement des usagers. Cette situation d'inconfort est engendrée par le choix inadéquat des matériaux de construction utilisés, qui favorisent la réflexion excessive des ondes acoustiques directes et réfléchies, créant des troubles de l'intelligibilité de la parole et une mauvaise qualité sonore intérieure.

CHAPITRE IV :
**Optimisation du confort acoustique dans les établissements
scolaires**

CHAPITRE IV : Optimisation du confort acoustique dans les établissements scolaires

Introduction

Ce chapitre présente la dernière étape qui permet aux chercheurs de mieux appréhender les éléments et les phénomènes qui étudié à travers l'exploitation des logiciels de simulation et de modélisation numérique. Ces derniers sont reconnus en tant que des outils puissants qui aident à la prise de décision et qui permettent aux utilisateurs d'avoir une lecture globale sur des divers phénomènes que ce soit des phénomène physique (éclairage, température, pression acoustique, humidité relatif, ...) où énergétiques (électricité, chauffage, climatisation, ...) liées aux bâtiments ainsi que ces composants de construction. En acoustique du bâtiment, les logiciels de simulation permettent de déterminer rapidement les paramètres subjectifs et objectifs et avec précision, ainsi que de tenir en considération les normes acoustiques imposées pour la conception des différents projets. A ce fait, nous présenterons un logiciel de prédiction, RAP-ONE II, qui sera utilisé dans cette recherche, puis proposerons quelques scénarios sur lesquels l'étude sera réalisée avec une description des différentes étapes suivies afin d'arriver en final à un modèle optimal.

IV.1. Présentation du logiciel de simulation RAP-ONE II

La simulation numérique est le moyen de recherche le plus employé par les chercheurs dans la majorité des études compte tenu de ses avantages à plusieurs niveaux et également la fiabilité et l'exactitude des données obtenues.

RAP-ONE (Room Acoustics Prediction and Occupational Noise Exposure Software), développé par la société Soft dB (figure IV.1), est un logiciel novateur et facilement utilisable qui permettra d'analyser et de maîtriser le son dans tout type de pièce (Gauthier, 2022).



Figure IV.1 : Le logiciel de simulation exploité et son développeur

(Source : <https://www.softdb.com>)

Le logiciel RAP-ONE II est un milieu modulaire caractérisé par sa flexibilité grâce à une interface graphique (figure IV.2) et par des bibliothèques de composants. Il a été créé pour satisfaire les besoins des conseillers en acoustique, des ingénieurs et des spécialistes de l'hygiène industrielle (Gauthier, 2022).

Ce logiciel de simulation acoustique permet de déterminer de manière rapide et précise les niveaux sonores à chaque emplacement dans une salle ainsi que la contribution de chacune des sources sonores à ces emplacements.

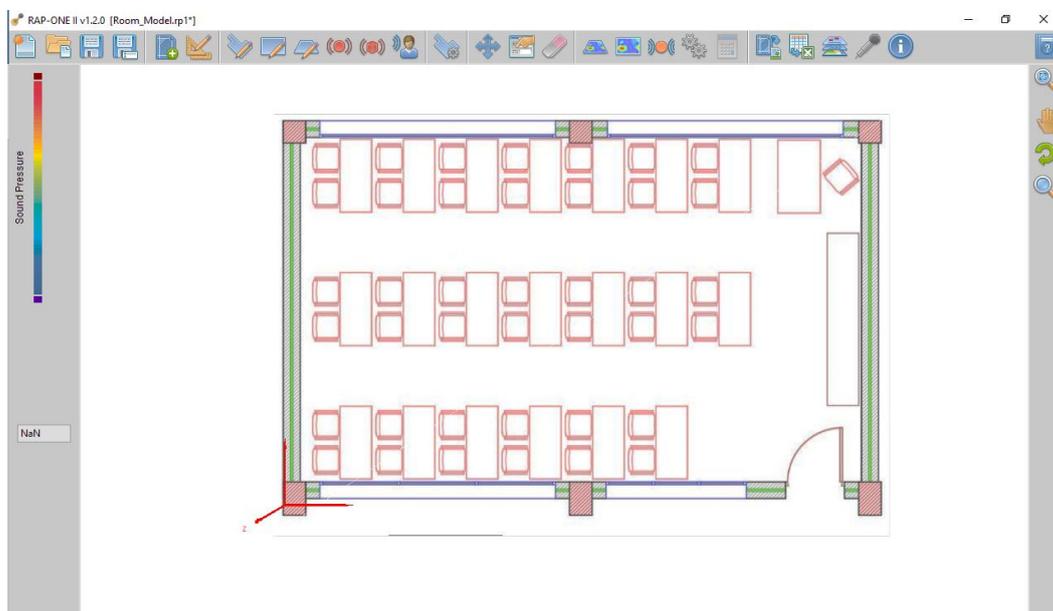


Figure IV.2 : L'interface graphique de logiciel avec le modèle à simuler

(Source : Auteur, 2022)

La simulation par le logiciel a été effectuée grâce à l'importation du modèle à simuler sous différents formats qui sont indiqués dans la figure ci-dessous.

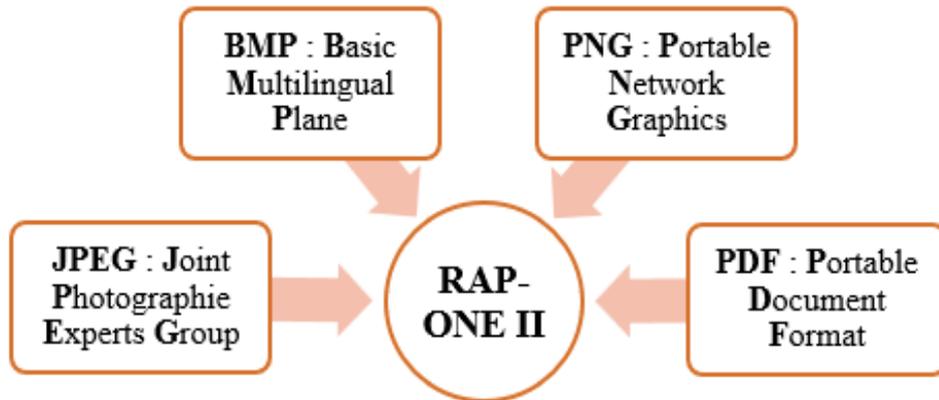


Figure IV.3 : Format de modèle à importer vers le logiciel (Source : Auteur, 2022)

Le logiciel de simulation acoustique RAP-ONE II nécessite de définir quelques paramètres d'entrée (inputs) pour effectuer la simulation et fournir des résultats (outputs). La figure suivante montre les divers entrées et sorties de la simulation acoustique par logiciel RAP-ONE II.

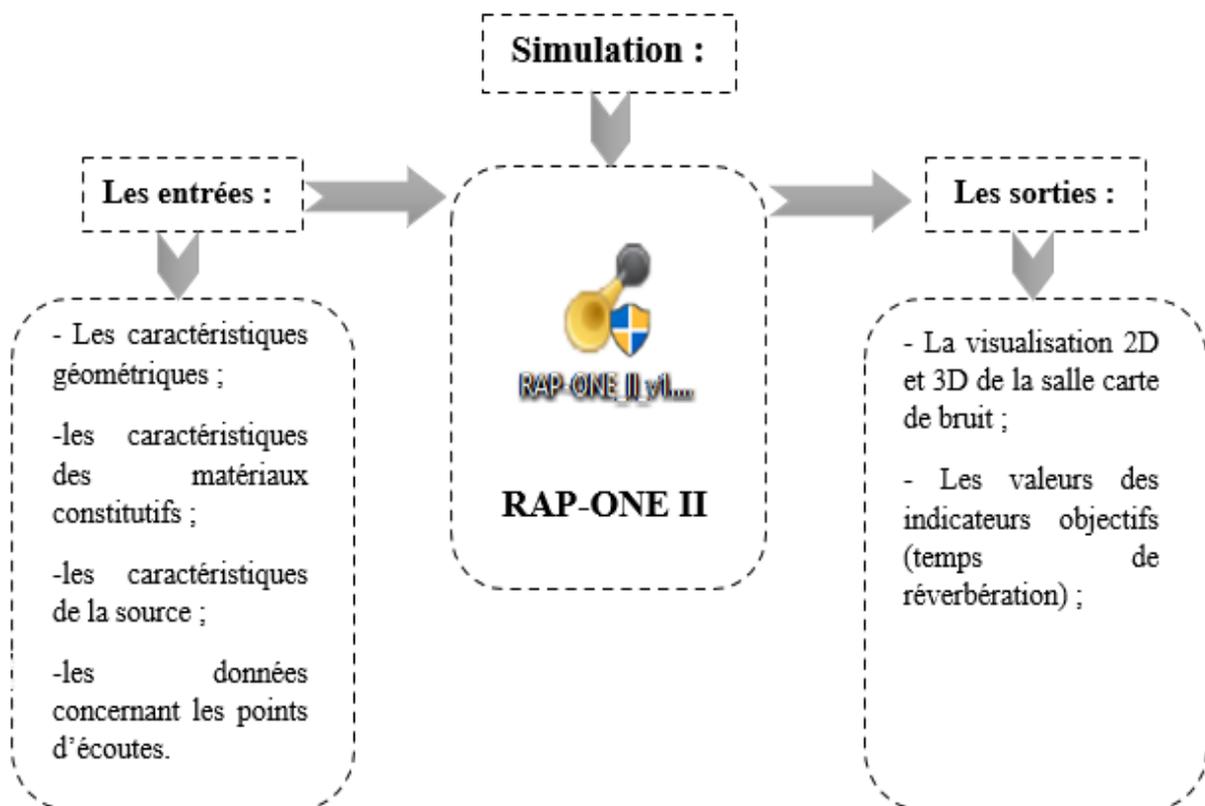


Figure IV.4 : Les entrées et les sorties de modèle simuler (Source : Auteur, 2022)

En commençant par les entrées (inputs) qui consistent à importer un fichier sous les formats identifiés dans la figure IV.3 afin de l'utiliser comme fond pour faciliter la modélisation de la

pièce. Après la définition de la géométrie de local a étudié (dimension et forme), il faut définir les caractéristiques acoustiques des murs et des ouvertures de la pièce à l'aide des valeurs prédéfinies dans de la bibliothèque incluse dans le logiciel. Par suit, il faut positionner les différentes sources de bruit définir leur puissance acoustique.

Concernant les sorties (outputs), ce logiciel fournit deux types de prédictions importantes fondées sur des méthodes d'acoustique géométrique :

- Cartographie de diverses quantités physiques sur la totalité de la population ;
- Les valeurs des indicateurs objectifs (temps de réverbération calculés par rapport à différentes fréquences).

Globalement, l'étude numérique sera réalisée à partir d'un processus (voir l'annexe D) qui se fait selon 3 phases importantes :

- La première phase concerne la modélisation de local a étudié après leur exportation au logiciel de simulation acoustique RAP-ONE II.
- La deuxième phase est consacrée à l'identification des caractéristiques acoustiques de chaque composant de la pièce afin de lancer la simulation numérique.
- La troisième phase est centrée sur l'exportation des informations obtenues sous format d'un fichier txt et la création des graphiques ainsi que l'interprétation des résultats.

IV.2. Etude paramétrique des composants de la paroi

Les composants d'une paroi jouent un rôle majeur dans la qualité de la performance acoustique d'un local. En effet, chaque élément affecte de son côté la perception auditive des usagers selon l'intensité du bruit existant dans l'environnement extérieur ce qui requiert des études détaillées sur les composants constructifs de chaque local en fonction de leur localisation (zone urbaine à forte densité, zone calme, ...). De nombreux paramètres ont été examinés dans cette recherche afin d'évaluer les répercussions des différents matériaux de construction sur la qualité de l'environnement sonore d'une salle de classe, à savoir : qualité acoustique de matériaux (insertion d'un isolant), type de vitrage, disposition des éléments dans la salle de classe.

IV.2.1. Etude de modèle de référence

La construction des salles de classe du lycée Issad Ahmed O Bachir n'est pas différente de celles des autres établissements scolaires en Algérie, quelles que soient les caractéristiques de la zone dans laquelle ces environnements seront construits. Le modèle de référence (témoin) de cette recherche est le même que celui dont l'étude quantitative est réalisée, il est situé dans une zone urbaine moyennement bruyante et occupe un espace au niveau de 1^{er} étage du bloc pédagogique du lycée (voir figure III.8 du chapitre III) qui donne directement sur une route extérieure à moyen trafic routier, l'aire de jeux et le terrain de sport, le marché de gros ainsi que la cour de récréation.

La figure suivante montre la forme de modèle témoin de cette étude inséré dans l'interface de logiciel de simulation acoustique RAP-ONE II.

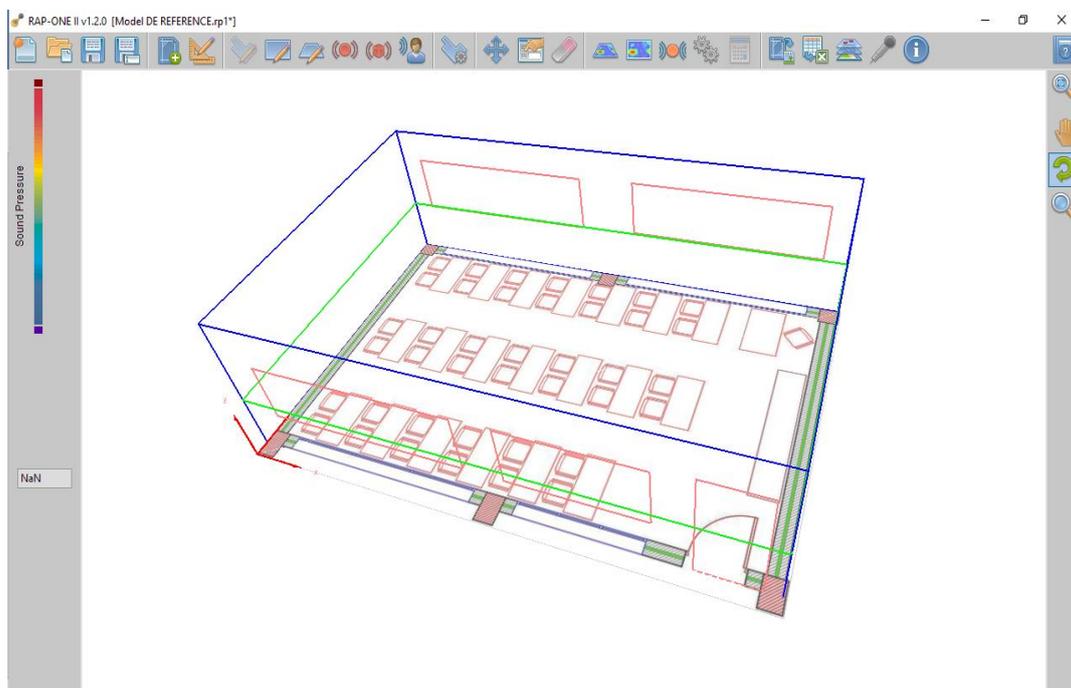


Figure IV.5 : La forme de modèle de référence dans l'interface de logiciel RAP-ONE II
(Source : Auteur, 2022)

Cette salle de classe représente un volume parallélépipédique de 10 mètres de longueur, 6,2 mètres de largeur et 3,06 mètres de hauteur, elle a une ossature en béton armé et un plancher construit en hourdis (voir la figure III.6 dans le chapitre III). Les murs constructifs extérieurs de ce local sont construits par des murs de 30 cm : un mur extérieur de 15 cm et le mur intérieur et de 10 cm avec une isolation (lame d'air) de 5cm et les cloisons intérieure sont composés de maçonnerie (brique creuse) de 10 cm. Ils contiennent des fenêtres très importantes de simple

vitrage de part est d'autre (4,2 mètres de longueur et 1,2 mètre de hauteur) dans le but de garantir un bon confort visuel aux élèves et une ventilation de la salle de classe.

Les coefficients d'absorption des matériaux de construction exploitée dans le modèle de référence sont représentés dans le tableaux III.1 de chapitre antérieur. Les matériaux de construction ont un impact primordial sur la qualité de confort (acoustique, visuel, thermique, ...). Dans l'acoustique des bâtiments, le choix des matériaux de construction se fait selon le coefficient d'absorption acoustique (α) de chaque élément.

IV.2.1.1. Simulation de modèle de référence

La simulation de modèle de référence se débutera après la modélisation conceptuelle de la salle de classe selon le processus suivant :

- L'importation du plan de la salle de classe sous format JPEG comme un arrière-plan pour définir facilement les paramètres géométriques de ce local (forme, dimensions) (figure IV.5).
- Association des caractéristiques acoustiques des matériaux exploités dans la construction de chaque composante de la salle à cette géométrie, avec l'insertion d'un barrière acoustique horizontal qui représente les chaises les tables et les tables de la salle de classe sur la même hauteur que celles utilisés dans le bâtiment existant. La figure ci-dessous présente l'étape de modélisation.

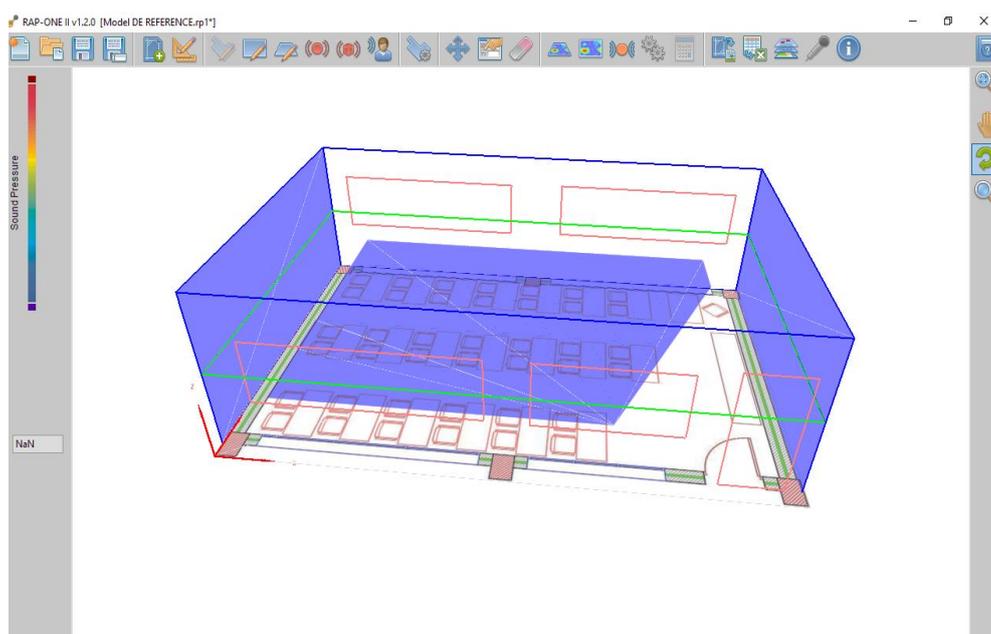


Figure IV.6 : Insertion des propriétés acoustique de chaque matériau de la salle de classe
(Source : Auteur, 2022)

Le logiciel de simulation RAP-ONE II contient une bibliothèque de donnée où se trouve les coefficients d'absorption acoustique (α) des divers matériaux de construction de la surface opaque et la surface vitrée. Ces coefficients ont été corrigé par rapport au tableau de coefficient d'absorption alpha Sabine afin de pouvoir commencer la simulation.

- Précision de l'emplacement de récepteur du son et la source sonore à travers le réglage de leurs hauteurs et la puissance acoustique de l'émetteur sonore.
- Création d'une carte sonore horizontale et l'identification de sa hauteur.

La figure IV.7 englobe toutes les étapes de modélisation de la salle de classe afin de passer à la simulation.

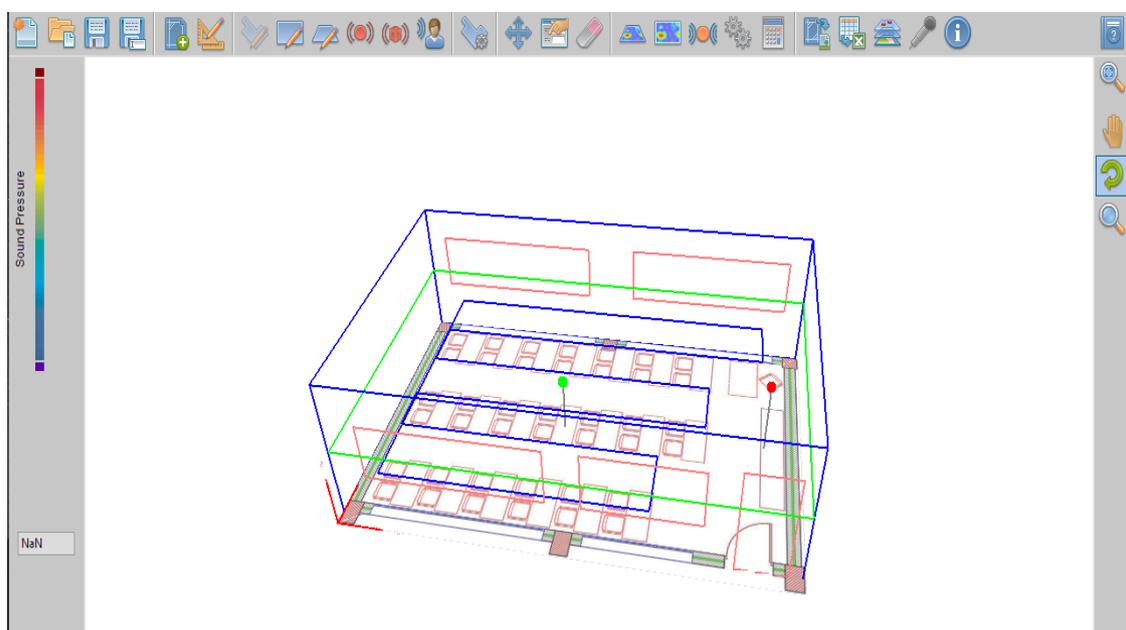


Figure IV.7 : Identification de toutes les étapes pour le passage à la simulation

(Source : Auteur, 2022)

Après avoir effectué ce processus, la simulation numérique de modèle témoin de la salle de classe est prête à travers la configuration des paramètres de simulation et le lancement de calcul. L'objectif de la simulation de ce modèle est de vérifier si le logiciel RAP-ONE II est validé dans la recherche de la simulation acoustique des salles grâce au degré de fiabilité des résultats à obtenir en les comparant à ceux de l'étude empirique de cette recherche.

IV.2.1.2. Résultats et interprétation de simulation de modèle de référence

Le lancement de calcul à permet d'obtenir une carte de bruit de modèle de référence. Ces résultats atteints sur cette carte sont en corrélation avec ceux qui sont mesurés par l'application

sonomètre dans le chapitre antérieur, ce qui affirme la validation de ce logiciel de simulation acoustique des salles (El-Hajj Hamam, 2020). Ce dernier facilite la conception acoustique et architecturale en raison de ses offres pratique et rapide de modélisation des conceptions et il vise à une bonne qualité sonore d'un locale d'écoute (Kouzeleas, 2002).

Dans la première simulation du modèle de référence qui est similaire au cas d'étude dans ses caractéristiques acoustiques, nous avons eu les résultats indiqués dans la figure ci-dessous.

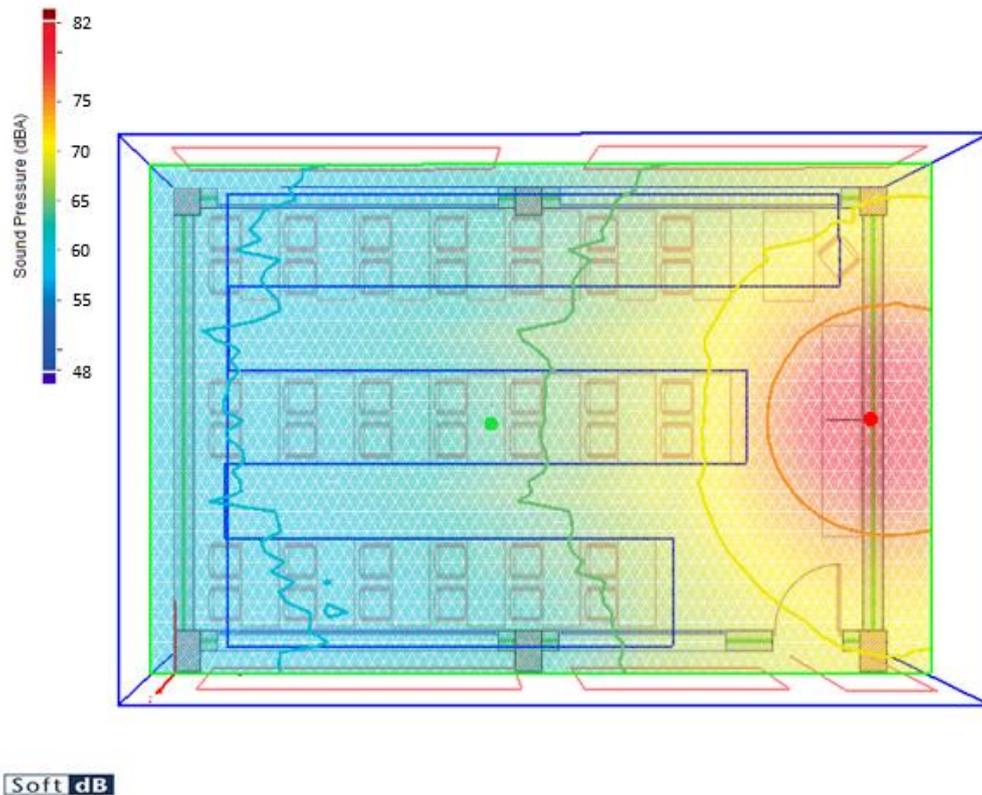


Figure IV.8 : La carte de bruit obtenus pour le modèle de référence (Source : Auteur, 2022)

D'après cette figure, nous pouvons voir que le niveau sonore perçu par les élèves dans la salle de classe représente une irrégularité remarquable car il change d'un endroit à l'autre avec de grandes valeurs incohérentes. Celles-ci diminuent de plus en plus à mesure que l'on s'éloigne de la source sonore, où elles sont très augmentées de 70 dB jusqu'à 80 dB à l'environ de l'émetteur et diminuent successivement de 70 dB jusqu'à 57 dB avec la hausse de la distance séparant la source et le récepteur.

Les deux graphiques qui suivent montrent l'évolution du niveau sonore et du temps de réverbération correspondant au modèle de référence, qui sont déterminés par la simulation acoustique du logiciel RAP-ONE II, en fonction de la fréquence sonore et du temps.

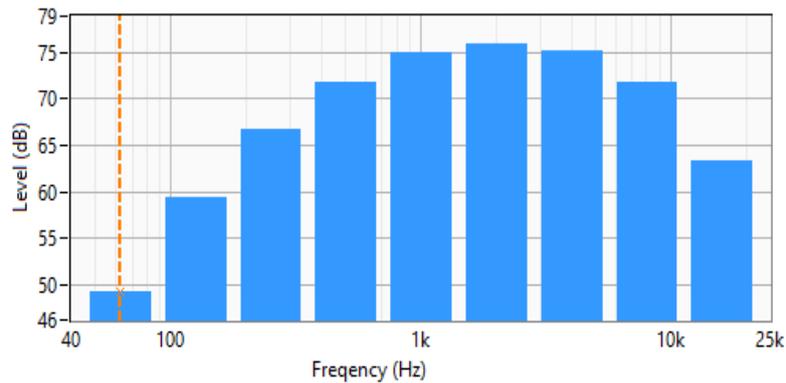


Figure IV.9 : Le niveau sonore relative au modèle de référence (Source : Auteur, 2022)

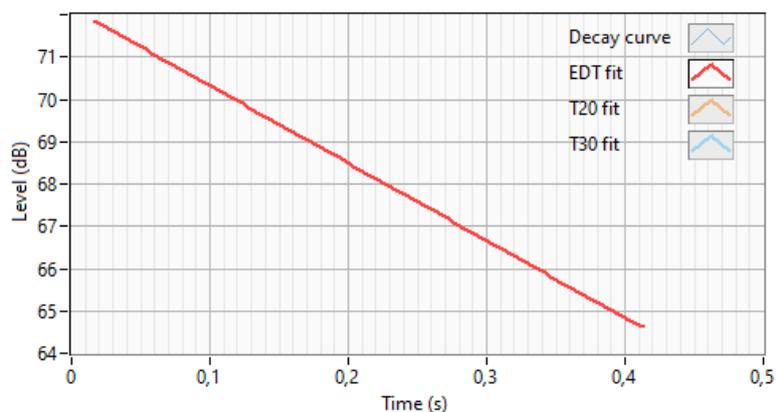


Figure IV.10 : Le temps de décroissance initiale relative au modèle de référence
(Source : Auteur, 2022)

D'après les graphiques ci-dessus, on observe que le niveau de pression acoustique du modèle de référence augmente en fonction de la fréquence du son, et le temps de décroissance initiale (EDT fit : Early Decay Time) qui reflète la façon de percevoir la réverbération sonore dans la pièce ; est très remarquable en fonction du niveau sonore où il diminue de 72 dB à 65 dB dans une durée de 0,4 s avec une durée de réverbération de 3,4s.

Donc, les valeurs enregistrées pendant la simulation acoustique du modèle de référence signifient une correspondance avec les résultats mesurés dans la salle de classe pendant l'existence d'une source sonore interne stable, ce qui montre que cette salle de classe comprenait une mauvaise qualité sonore en raison de la réverbération élevée qui existe sous l'effet des caractéristiques propriétaires des matériaux de construction utilisés. Ces derniers favorisent le phénomène de réflexion des ondes sonores en particulier derrière l'emplacement de la source, provoquant le phénomène gênant qui est l'écho. Ce phénomène produit un comportement

acoustique inconfortable à l'intérieur de cette salle qui affecte négativement sur les usagers ainsi que le fonctionnement de l'espace.

IV.2.2. Etude de l'impact d'un isolant (ouate de cellulose)

Dans le secteur du bâtiment, les matériaux employés doivent respecter plusieurs exigences. Tout d'abord, un matériau doit avoir des caractéristiques mécaniques suffisamment élevées pour garantir une certaine durabilité structurelle du futur bâtiment. De plus, les matériaux doivent satisfaire à des critères écologiques et économiques afin de réduire la consommation énergétique et de garantir le confort des usagers. La qualité sonore des bâtiments représente une troisième condition importante liée au confort des occupants. A cet effet, la transmission de l'énergie sonore d'une salle à l'autre doit être maîtrisée afin de réduire au maximum les niveaux de nuisances sonores transmises (Glé, 2013). Pour ce faire, l'éco-matériau acoustique ouate de cellulose est choisi pour réduire la transmission du bruit et satisfaire le besoin de confort acoustique des occupants à travers leur intégration dans la simulation suivante.

IV.2.2.1. Simulation de modèle avec un isolant (ouate de cellulose)

Pour étudier l'impact des isolants acoustiques sur le fonctionnement de la salle de classe quand l'espace extérieur est très bruyant, la ouate de cellulose est insérée dans la composition de la paroi du modèle témoin. Cet isolant est reconnu comme un matériau écologique, elle est obtenue par le recyclage du papier, des journaux non vendus, récupération des déchets de scierie et de papeterie. Il est surtout utilisé pour garantir l'isolation acoustique et thermique des murs (figure IV.11), des sols de combles non aménagés et des pentes de combles. L'absorption de ce matériau a été déterminée selon le dosage (Glé, 2013).

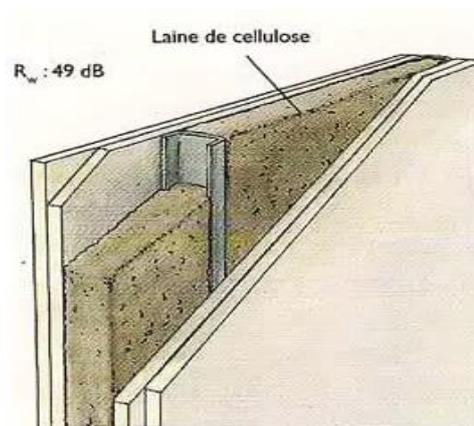


Figure IV.11 : Cloison emplie de laine de cellule avec 02 plaque du plâtre

(Source : <https://www.eco-logis.com/>)

Le tableau ci-dessous montre une petite comparaison entre les coefficients d'absorption acoustique de la ouate de cellulose et la laine de verre. En conséquence le choix est fait sur ces deux isolants parce qu'ils représentent les isolants les plus utilisés vue leurs côtés économiques et écologiques.

Tableau IV.1 : Comparaison entre les coefficients d'absorption acoustique de deux isolants
(Source : <https://www.eco-logis.com>)

Coefficient d'absorption des matériaux (α)	Fréquence en hertz (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ouate de cellulose :	0,25	0,68	1,17	1,09	1,14	1,13
Laine de verre :	0,20	0,36	0,64	0,81	0,90	0,94

Plus le coefficient d'absorption acoustique est élevé, plus l'isolation acoustique de matériau est bonne. Par conséquent, selon les normes requises, le matériau ouate de cellulose a un bon niveau de performance acoustique par rapport aux autres matériaux isolants et il représente un choix adéquat pour l'isolation acoustique ainsi que pour la durabilité du bâtiment.

La figure IV.12 montre l'insertion de matériaux ouate de cellulose avec ces coefficients d'absorption dans la bibliothèque du logiciel de simulation RAP-ONE II.

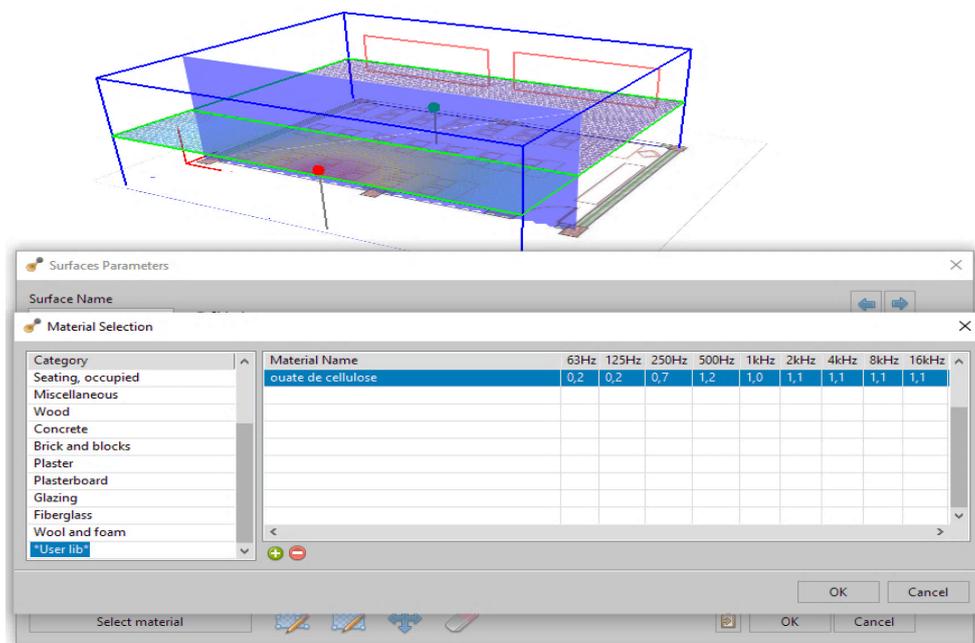


Figure IV.12 : Insertion d'un espace sonore extérieure et la ouate de cellulose dans la composition de la paroi du modèle témoin (Source : Auteur, 2022)

Pour la simulation de ce nouveau modèle avec isolation, le même processus que pour le modèle de référence est appliqué, mais avec l'ajout d'un espace sonore extérieur tout en modifiant les propriétés acoustiques des composants du mur.

IV.2.2.2. Résultats et interprétation de simulation de modèle avec un isolant (ouate de cellulose)

Les niveaux sonores simulés à l'intérieur de la salle de classe après le placement d'une source sonore externe sont illustrés à la figure IV.13.

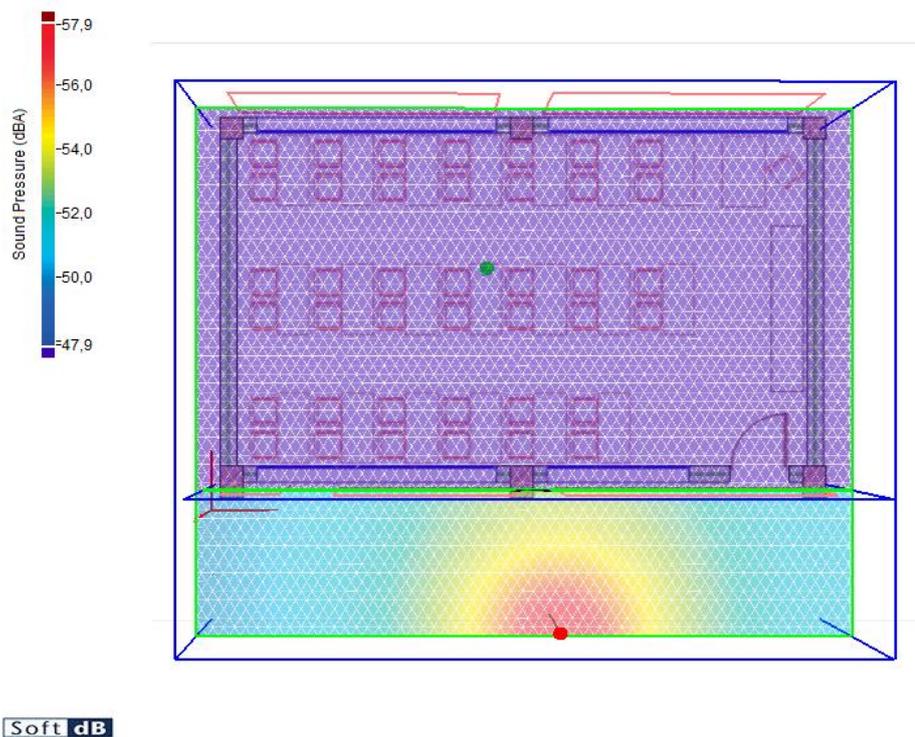


Figure IV.13 : La carte de bruit obtenus pour le modèle isolé avec la ouate de cellulose

(Source : Auteur, 2022)

D'après la figure ci-dessus, nous pouvons voir une discontinuité dans la diminution du niveau sonore enregistré entre l'espace extérieur exposé à la source sonore et l'espace intérieur de la salle de classe du fait de la réduction et de la limitation de la quantité d'énergie acoustique transmise vers l'intérieur grâce à l'intégration d'un matériau isolant (ouate de cellulose) dans le mur. Dans l'espace extérieur, les valeurs du niveau de pression acoustique se situent entre un minimum de 51 dB et un maximum de 58 dB sur une petite distance, tandis que dans l'espace intérieur, les valeurs enregistrées sont presque les mêmes entre un minimum de 47,9 dB et un maximum de 49 dB sur une grande surface de 62 m².

Les deux figures suivantes illustrent la variation du niveau sonore dans le modèle isolé grâce à la ouate de cellulose et son influence sur le phénomène de réverbération sonore intérieur de la salle de classe.

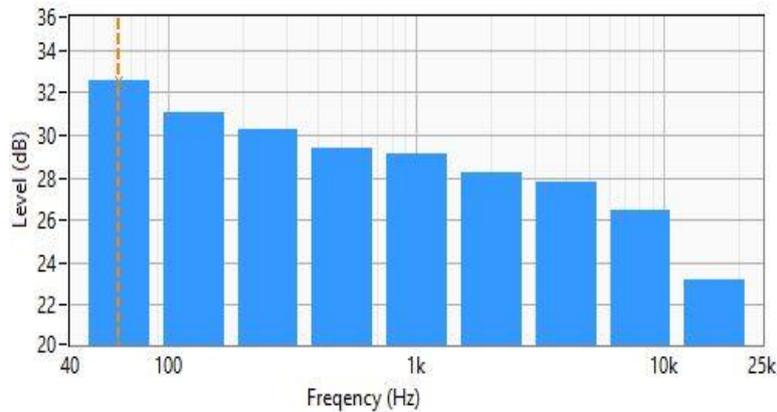


Figure IV.14 : Le niveau sonore relative au modèle isolé en ouate de cellulose
(Source : Auteur, 2022)

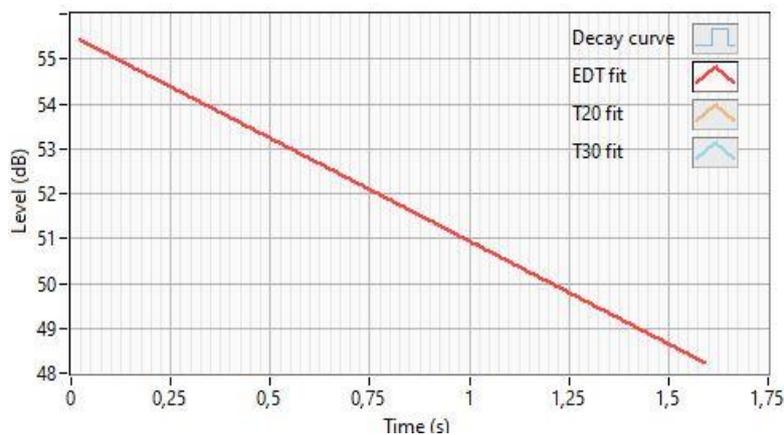


Figure IV.15 : Le temps de décroissance initiale relative au modèle isolé en ouate de cellulose (Source : Auteur, 2022)

Dans ce modèle, le niveau de pression acoustique diminue avec l'augmentation de la distance entre la source de bruit et le récepteur dans l'espace extérieur, et il est stable à l'intérieur de la pièce (48dB), ce qui signifie que cette pièce se situe dans la plage de confort acoustique, mais le temps de décroissance initial est très remarquable avec une diminution de 55dB à 48dB en 1,5s ce qui signifie que le temps de réverbération est énorme de 12s.

Globalement, le comportement acoustique de la salle de classe isolée au niveau de ses murs par le matériau ouate de cellulose montre que cette salle est confortable car les valeurs obtenues à l'intérieur se situent dans la gamme de confort acoustique, mais en même temps elles génèrent

une inintelligibilité de la parole due à la présence du phénomène d'écho qui se présente dans ce local en raison de la longue durée de réverbération ($T_r = 12$ s), ce qui affecte négativement sur la performance des élèves et leurs compréhensions. Par conséquent, cette situation qui apparaît dans la salle de classe nécessite un traitement acoustique intérieur afin de garantir un bon fonctionnement de cette pièce.

IV.2.3. Etude de l'impact des panneaux absorbants

Suite aux deux analyses précédentes, nous avons conclu que la salle de classe est très réverbérante avec un temps de réverbération de 3,4 s dans son état de référence et de 12 s dans le cas de l'insertion d'un isolant dans ses parois, alors que le temps de réverbération qui assure le confort acoustique dans une salle de classe varie entre 0,4 s et 0,8 s (Gamba, 2017). Par conséquent, il est essentiel de réduire les surfaces réverbérantes afin de garantir un temps de réverbération idéal selon le fonctionnement de la pièce et de répondre au besoin de confort sonore ses usagers. Pour ce faire, la stratégie de correction acoustique est adaptée dans la simulation suivante qui vise à améliorer la qualité de la diffusion des ondes sonores à l'intérieur de la pièce tout en réduisant les différents problèmes liés à la réverbération du son. Cette dernière présente un paramètre très important sur lequel se base l'évaluation de la qualité acoustique des locaux.

IV.2.3.1. Simulation de modèle traité par des panneaux absorbants

Pour évaluer et étudier l'impact de la correction acoustique sur le fonctionnement de la salle de classe en présence d'une source sonore interne stable, un traitement acoustique sur les murs et le plafond est appliqué par l'exploitation de panneaux acoustiques rigides. Ceux-ci ont pour fonction d'absorber une partie de l'énergie acoustique diffusée par l'émetteur avant qu'elle n'atteigne la paroi et de réduire la réflexion sonore interne tout en assurant la maîtrise de la direction des ondes réfléchies ainsi que la réduction de la transmission sonore vers l'extérieur (figure IV.16). Les panneaux d'absorption acoustique sont construits à base de laine minérale (laine de roche) et leur absorption de l'énergie sonore varie en fonction de leur épaisseur, de leur densité et de leur porosité. Ils jouent un rôle fonctionnel par la correction de la performance acoustique de la pièce et aussi un rôle esthétique par la décoration de la pièce.

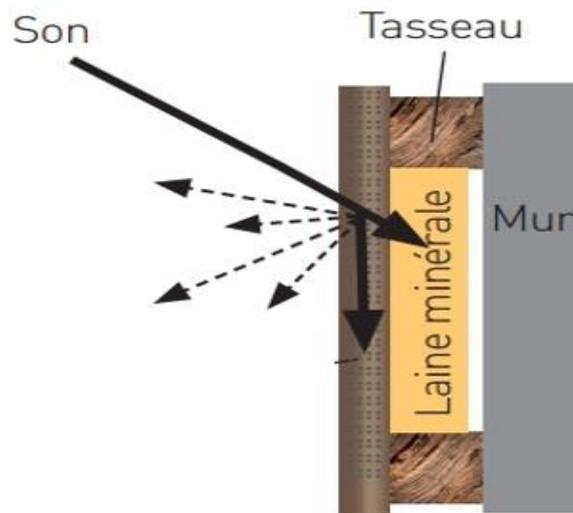


Figure IV.16 : Schéma sur le fonctionnement d'un panneau acoustique

(Source : <https://www.rexwall.fr/>)

Le tableau ci-dessous présente le coefficient d'absorption acoustique de panneau acoustique rigide en fonction de la bande d'octave.

Tableau IV.2 : Coefficient d'absorption acoustique de panneau acoustique rigide

(Source : Neufert, 2010)

Coefficient d'absorption des matériaux (α)	Fréquence en hertz (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Panneau acoustique rigide :	0,2	0,4	0,7	0,8	0,8	0,4

La simulation de ce modèle est effectuée sur la base du même procédé appliqué au modèle de référence mais avec l'insertion de panneaux acoustiques sur les parois et le plafond de la salle de classe (figure IV.17), à travers la création de ce matériel dans la bibliothèque du logiciel de simulation acoustique RAP-ONE II et le réglage de son coefficient d'absorption sonore selon les normes d'Alpha Sabine (tableau IV.2).

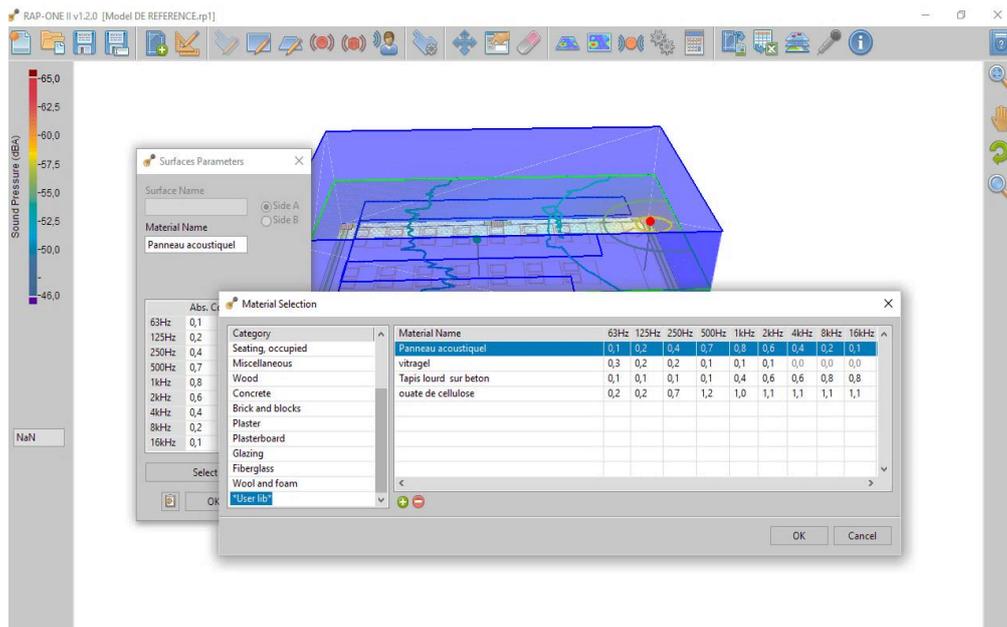


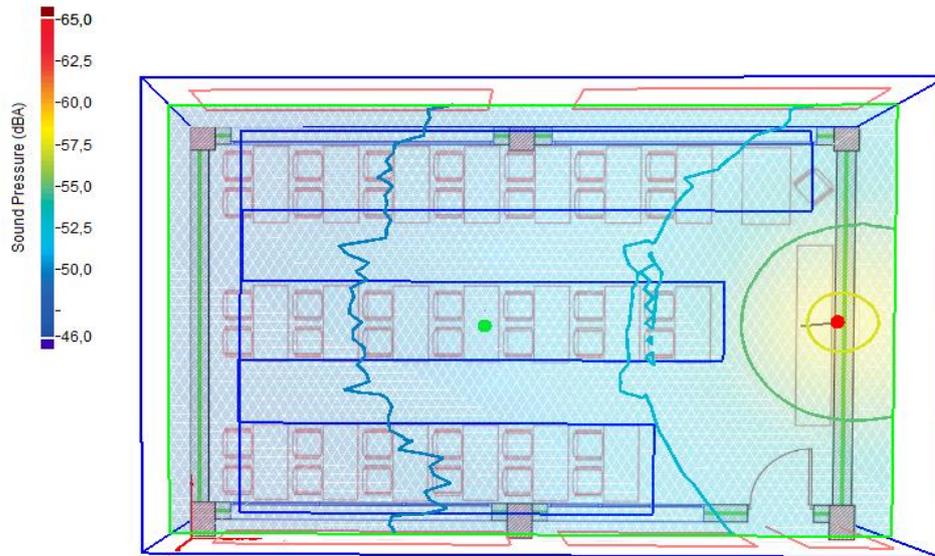
Figure IV.17 : Insertion des panneaux acoustique dans les parois du modèle témoin
(Source : Auteur, 2022)

La mise en place de ces matériaux poraux améliore le confort thermique de la pièce car tous les absorbeurs de son sont des isolants thermiques, mais le contraire n'est pas valable : les matériaux isolants à cellules fermées ne permettent pas d'absorber le son.

IV.2.3.2. Résultats et interprétation de simulation de modèle traité par des panneaux absorbants

La simulation de l'impact des panneaux absorbants perforés sur le comportement sonore de la salle de classe est illustrée par la carte de bruit présentée sur la Figure ci-dessous.

D'après la figure IV.18, on peut remarquer que le niveau de pression acoustique enregistré dans la salle de classe après la disposition des panneaux acoustiques sur les murs et le plafond représente une régularité notable dans laquelle le niveau sonore évalué dans la première rangée est presque le même que celui de la dernière rangée.



Soft dB

Figure IV.18 : La carte de bruit obtenus pour le modèle traité par des panneaux acoustiques
(Source : Auteur, 2022)

Les niveaux sonores diminuent à mesure que la distance entre la source sonore et le récepteur augmente, mais cette décroissance se fait avec des valeurs faibles qui se situent entre un minimum de 54 dB et un maximum de 57 dB à proximité de l'émetteur et entre un minimum de 52 dB et un maximum de 54 dB dans le reste de la salle de classe. Cela signifie que la qualité du son dans cette salle est corrigée.

Les deux figures suivantes montrent le changement du niveau sonore et le temps de décroissance initial après la correction acoustique de la salle de classe.

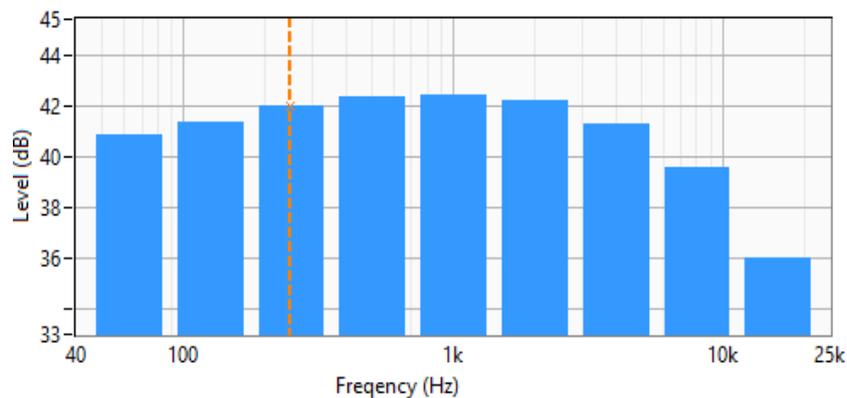


Figure IV.19 : Le niveau sonore relative au modèle traité par des panneaux acoustiques
(Source : Auteur, 2022)

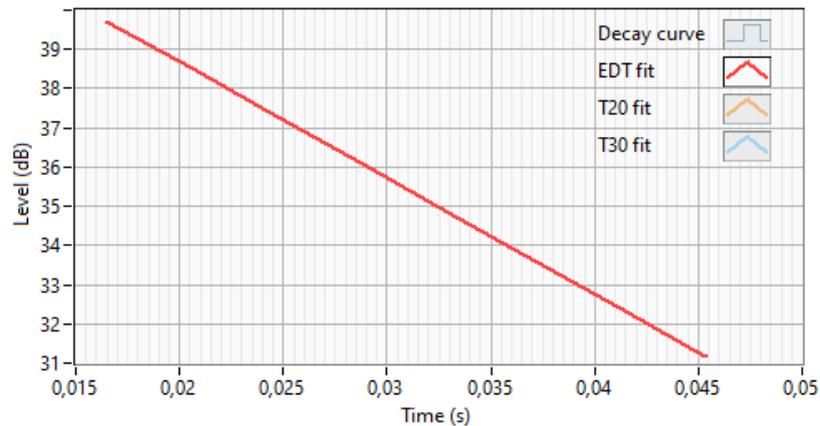


Figure IV.20 : Le temps de décroissance initiale relative au modèle traité par des panneaux acoustiques (Source : Auteur, 2022)

D'après les deux graphiques, on observe que le niveau de pression acoustique augmente en fonction de la fréquence sonore et que le temps de décroissance initial est très faible par rapport à celui obtenu dans les deux simulations précédentes où la réduction de 39 dB à 31 dB se fait en 0,045 s, ce qui montre que le temps de réverbération est de 0,4 s et qu'il est donc bien maîtrisé dans ce modèle.

Ces résultats obtenus dans le modèle traité par des panneaux acoustiques à l'intérieur de la salle de classe affirment que le comportement sonore est très confortable par rapport au bruit intérieur parce que les valeurs sont dans la plage de confort acoustique. Ces dispositifs ont un grand impact sur la qualité d'écoute et l'intelligibilité de la parole dont le phénomène de réverbération est absent dans cette salle grâce à l'absorption et à la réflexion du son par ces éléments perforés. Donc, ils représentent un choix approprié pour la résolution des problèmes relatifs à la pollution sonore interne, ce qui permet le bon fonctionnement de la salle et l'assurance du confort à ses usagers.

En conclusion, l'étude numérique effectuée sur la salle de classe du lycée Assad Ahmed O Bachir permet de ressortir d'une manière précise les éléments et les dispositifs qui affectent le comportement acoustique de la salle de classe et celui des usagers.

Les résultats obtenus affirment que les matériaux exploités dans la construction des espaces jouent un rôle prépondérant sur l'aspect acoustique. Par conséquent, l'obtention d'un cas optimal pour la future construction des salles de classe est basée sur le bon choix des matériaux en fonction de leur coefficient d'absorption acoustique qui assurera un temps de réverbération interne conforme aux normes requises et une bonne isolation acoustique aux bruits extérieurs tout en utilisant des isolants dans les composants des murs ainsi que l'insertion d'éléments et de

dispositifs dans l'espace intérieur. La forme est également un paramètre qui affecte le confort acoustique, mais dans notre cas, la forme optimale d'une salle de classe est le rectangle parce qu'avec la même forme, dans la simulation, nous sommes arrivés à un espace conforme en termes d'acoustique qui assure l'intelligibilité de la parole et le confort sonore des élèves juste avec le changement de matériaux.

Conclusion

Les caractéristiques physiques des matériaux de construction représentent un paramètre très important qui affecte le fonctionnement d'un bâtiment à travers le contrôle de ses nombreux comportements tels que acoustiques, visuels, thermiques, énergétiques, Le choix approprié des matériaux doit faire partie du confort du bâtiment ainsi que de sa durabilité à travers l'évaluation de divers éléments et dispositifs par la simulation numérique qui a été effectué dans ce présent chapitre.

L'étude numérique développée sur le comportement acoustique de la salle de classe et ses matériaux de construction permet de bien appréhender le phénomène sonore qui se produit dans cette salle et sa propagation, ainsi que de voir les nombreux impacts des matériaux utilisés dans sa construction sur le comportement sonore d'un espace d'enseignement et celui des usagers. Les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche indiquent que la pertinence du choix des matériaux exploités dans la construction des parois a des répercussions directes sur le confort acoustique offert par les bâtiments. Les nuisances sonores qui se produisent dans une salle d'enseignement sont le résultat d'un choix aléatoire de matériaux sans prise en considération de leurs coefficients d'absorption acoustique, ce qui génère divers problèmes liés à la réverbération et à l'écho spatial. Par conséquent, l'amélioration et l'assurance du confort acoustique dans une salle de classe reposent sur la disposition des éléments (panneaux acoustique) à l'intérieur de la pièce afin d'obtenir une bonne intelligibilité du message vocal, et sur l'isolation des murs, du plafond et du sol pour garantir que le bruit extérieur ne soit pas transmis à l'intérieur de local.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'acoustique est la science du son qui englobe tout ce que nous entendons. Notre environnement de vie est toujours plus bruyant. Les sources de bruit les plus fréquentes sont engendrées très souvent par les activités humaines et les moyens de transport. Elles sont ressenties comme des nuisances sonores et font l'objet de réclamations. Les émissions sonores influent sur le bien-être des usagers à travers la diminution de leur concentration ainsi que, dans des pires des cas, la production des différentes maladies. Par conséquent, l'aspect acoustique est un élément qui n'est pas moins important que les autres aspects (visuel, thermique, ...) lors de la conception d'un projet architectural parce qu'il définit les caractéristiques ambiantes de l'espace. A cet effet, les autorités algériennes ont porté l'attention à l'acoustique intérieure des bâtiments dans les années 80 du dernier siècle grâce à quelques lois visant la maîtrise d'une architecture acoustique adéquate, mais malheureusement ces lois sont négligées jusqu'à nos jours dans la conception.

Le confort acoustique dans le bâtiment dépend de la spécificité de chaque équipement, il est assuré à travers l'exploitation des stratégies conceptuelles et des techniques de construction nécessaires, mais généralement il se base, pour les nouvelles constructions, sur des principes simples comme celui de masse ou de la double paroi, et dans les anciennes construction, sur la géométrie de l'espace et l'insertion des divers éléments (tapis, panneaux perforé dans les murs et les plafonds, ...) qui jouent un rôle dans la régularisation du son ainsi qu'un rôle esthétique. Le contrôle du bruit dans l'environnement d'enseignement est un enjeu prépondérant dans la bonne marche des études scolaires, mais il est rarement tenu en considération, alors que les impacts des nuisance sonores sur le développement intellectuel des écoliers et la lassitude des professeurs sont considérables. La salle de classe est un espace clé qui structure la conception des établissements scolaires. Elle est le milieu d'apprentissage où le maître (le principal intervenant) transfère ses connaissances en se basant majoritairement sur le message vocal, tandis que les élèves (à la fois intervenants et écoutants) écoutent, interviennent en classe et discutent entre eux. Ils doivent donc bénéficier d'un milieu calme favorisant l'apprentissage et la concentration. Pour cela, plusieurs méthodes de recherche ont été adaptées dans le but de mieux appréhender les phénomènes sonores existants dans cet espace éducatif afin d'assurer la sensation de bien-être et la satisfaction des usagers en termes d'acoustique architecturale ainsi que d'améliorer leurs performances académiques.

Pour faire évaluer l'état de comportement acoustique dans les établissements scolaire, une étude empirique a été effectuée au sein de lycée Issad Ahmed O Bachir à Bejaia, qui est inclus dans un contexte sonore moyens, à travers la prise des mesures du niveau de fond sonore à l'intérieur des salles de classe et des mesures du niveau de bruit ambiant à l'aide de l'application sonomètre. En complétant cette étude quantitative par une étude qualitative qui a été faite par la distribution des questionnaires aux élèves de lycée afin d'évaluer leurs sensation et satisfaction au phénomène du bruit dans la salle de classe. Une autre étude, réalisée sur les salles de classe, est celle de la simulation numérique avec le logiciel de simulation acoustique RAP-ONE II. Elle est élaborée sur les matériaux de construction de la salle de classe afin d'étudier et d'optimiser leurs effets sur le comportement sonore de la salle à travers l'élaboration d'une étude paramétrique en insérant un isolant (ouate de cellulose) dans la composition des murs et en traitant l'intérieur de la pièce par des dispositifs acoustiques (panneau acoustique perforé).

Les résultats des mesurages sur terrain montrent que les salles de classe sont marquées par un bruit de fond supérieur aux seuils recommandés par l'OMS (50dB), ce qui témoigne de l'absence de confort acoustique dans ces salles, notamment lorsque les fenêtres sont ouvertes en raison de la ventilation de l'espace. De plus, le manque d'isolation des matériaux de construction employés favorise la transmission des nuisances sonores extérieures (couloir, cour de récréation, voisins extérieurs, ...). En outre, l'ignorance du traitement acoustique intérieur affecte l'intelligibilité de la parole en raison de la synchronisation des ondes sonores directes et réfléchies qui s'accumulent entre elles, provoquant une situation sonore inconfortable. Les résultats de l'étude numérique affirment que le comportement acoustique de la salle de classe dans son état actuel est inconfortable à cause des caractéristiques physiques des matériaux de construction de l'espace car leurs coefficients d'absorption acoustique ne répondent pas aux normes requises pour le fonctionnement acoustique correct de milieu d'apprentissage. Par conséquent, les salles requièrent la mise en œuvre de matériaux appropriés à l'acoustique via l'insertion d'un isolant qui permet de limiter les transmissions des bruits extérieurs à l'intérieur, sans oublier de traiter également les intérieurs par la correction acoustique afin d'assurer l'intelligibilité du message vocal grâce au contrôle du phénomène de réverbération et d'écho.

Les résultats obtenus durant cette recherche confirment que la maîtrise des matériaux de construction influe sur le comportement sonore des pièces où la performance provient de plusieurs éléments, dispositifs et techniques d'isolation. Le choix adéquat de ces éléments tout en prenant en considération les spécificités sonores l'environnement immédiat du projet et la

durabilité des matériaux a une grande contribution sur l'amélioration des conditions acoustiques internes qui influent directement de leur part la satisfaction et la sensation du bien-être des usagers de l'espace.

Recommandations

Sur la base de cette recherche qui a été faite sur le confort acoustique dans les établissements scolaires, on recommande les opérations suivantes :

- Le choix de la localité et de l'orientation du milieu d'enseignement devrait prendre en considération les contraintes du site et les espaces fragiles tels que les salles de classe devraient être dirigés vers le calme, loin des zones de bruit.
- L'isolation sonore peut être assurée par un plan de masse adéquat, des matériaux appropriés et un placement judicieux des salles de classe.
- Renforcé l'isolation acoustique des différents constituants des espaces sensibles au bruit par des matériaux insonorisant durables (ouate de cellulose, laine de roche, etc.).
- Traitement acoustique des locaux d'enseignement par des dispositifs qui combattent le phénomène de réverbération et d'écho.
- Traitement des espaces de circulation par des éléments qui absorbent et réfléchissent les ondes sonores afin d'empêcher l'entrée des bruits vers les espaces sensibles.
- Utilisation d'un type de vitrage approprié qui permet une bonne performance acoustique.
- Assurer la maintenance des joints, des équipements scolaires, de fenêtres et de portes.
- Utilisation des tables et de chaises à pointes souples pour limiter les bruits solidiens.
- Conception d'une salle de classe qui contient une taille et un volume suffisants pour éviter les longues durées de réverbération.

Les limites de la recherche

Le manque de temps est une limite qui nous a empêchés de mener plusieurs études quantitatives dans différents espaces du lycée et même de prendre des mesures dans de nombreux cas d'études. En outre, l'absence de licence pour les logiciels de simulation acoustique qui traitent des caractéristiques sonores des matériaux de construction où la majorité sont des logiciels payants nous limite sur une simulation de la salle sans la prise en considération de l'aménagement existant. L'instrument de mesure présente de sa part une limite de recherche parce qu'il ne peut pas nous offrir la possibilité d'étudier de manière assez approfondie la qualité

du confort acoustique dans l'établissement étudié. L'étude qualitative de la recherche a eu aussi une limitation due à la récupération de 28 questionnaires au lieu de 30 questionnaires.

Perspectives de recherche

Pour assurer le développement des futures recherches, les résultats obtenus permettent de proposer quelques nouveaux axes d'étude, notamment :

- Étude de l'effet des résultats obtenus par cette recherche sur d'autres aspects (thermiques, hygrothermiques) dans le même cas d'étude (établissement scolaire) ;
- Étude paramétrique sur différents isolants acoustiques ou dispositifs de réflexion afin d'obtenir un meilleur isolant ou dispositif de réflexion ayant une épaisseur idéale ;
- Étude de l'effet de la surface vitrée et du type de vitrage sur le fonctionnement des salles de classe ;
- Étude paramétrique des caractéristiques acoustiques des matériaux de construction dans divers contextes sonores afin de classer ces matériaux en fonction des zones sonores.
- Étude acoustique concernant les formes et les matériaux adéquats pour l'assurance d'une bonne qualité sonore dans les espaces architecturaux.

Bibliographie

Bibliographie

- Adnet, M.** (2018, Avril). Perception et propagation du bruit dans les logements en région de Bruxelles-Capitale. *Bruxelles Environnement*.
https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Bru_52
- Atienza, R. & Balez, S.** (s. d.). *Acoustique des salles*. École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble. <https://docplayer.fr/49679909-Acoustique-des-salles.html>
- Atienza, R., Balez, S. et Remy, N.** (2010). *L'isolation acoustique*. École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble. <https://docplayer.fr/4455682-L-isolation-acoustique.html>
- Attali, J.** (1977). *Bruits ; essai sur l'économie politique de la musique* (1^{ère} éd.). Fayard.
- Auffret, M.** (2015, 23 Juin). *Les notions essentielles de l'acoustique* [Conseil en Acoustique]. Conférence-débat organisée par la FIPS et le CIDB. <https://www.bruit.fr/images/stories/pdf/FIPS-juin-2015/maurice-auffret.pdf>
- Barles, P., Daliphard, J., Paul, M., Gaven, R., Guilbaud, R., Meisser, M. et Strauss, P.** (2017, Juin). *Rénovation énergétique, confort acoustique et qualité de l'air en habitat individuel*. ADEME.
- Bendjedid, C.** (1983, 5 Février). Loi n°83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement.
http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Algeria/DZ_Loi_Protection_Environnement.pdf
- Branchu, C.** (2012). *Isolation thermique et acoustique*. Eyrolles.
- Bui Van Tran.** (1996). *Acoustique architecturale*. Alger : Office des publications universitaires.
- Champilou, V. et Coutant, B.** (2012). *Correction acoustique des salles de TD 3N21 et 3N22 Vers une solution "Tout bois"*. Nancy-Université. <http://docplayer.fr/20379644>
- Chelkof, G.** (2015). *Du confort acoustique au confort sonore : évolutions des pratiques et de l'architecture du logement*. HAL. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01168071>
- Cherpillod, S.** (2010). Une approche sensible des lieux de représentations et de leurs impacts sur la ville. *Espace sonore*.
https://books.google.dz/books/about/Espace_sonore_une_approche_sensible_des.html

Clotuche, G. (2014, 19 Février). Combattre le bruit dans les écoles, pourquoi et comment ?. *Vademecum du bruit dans les écoles*. Bruxelles environnement.

Cloud, C. (s. d.). *Acoustique du bâtiment et de l'environnement*. Licence Professionnelle Environnement & Construction IUT GC, Université de La Rochelle. https://www.general-acoustics.fr/data/_uploaded/file/coursCloud.pdf

Decamps, D. (2016, 25 Septembre). *Quand la musique menace notre audition*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/quand-la-musique-menace-notre-audition-delphine-decamps>

Delarue, F. (2005, 17-18 Mars). Construire avec les sons. *Le plan urbanisme construction architecture PUCA*, 100 p.

Delcros, F. (2016). *Les ondes sonores et leurs impacts sur la santé* [thèse de doctorat, Université de Lorraine]. HAL. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01732071>

Delétré, J.J. (2004, 02 Février). *Isolement acoustique*. École d'architecture de Grenoble. <http://www.idverre.net/veille/dostec/isolation-acoustique/isolation-acoustique.pdf>

Duhamel, D. (2022, 4 Mars). *Acoustique*. Département de rattachement : Génie Civil et Construction, Ecole des Ponts Paristech. https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/15553/mod_resource/content/2/poly_acoustique_2022.

Durpaire, F. & Mabilon-Bonfils, B. (2017). L'école, le collège ou le lycée sont des villes en miniature : entretien avec 6 architectes qui imaginent l'école du futur. *Éducation et socialisation*. En ligne : <http://edso.revues.org/1993>.

El-Hajj Hamam, Z. (2020). Simulation numérique et analyse de l'émission acoustique due à la rupture de fibre et à la décohérence à l'interface fibre/matrice dans un micro composite [thèse de doctorat, Université de LYON]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel03208857/document>

Flandrin, P. (2007, Janvier). *Une brève histoire des sons, entre théories et instruments de mesure*. Département de physique, Université Ouverte Lyon 1. <https://slideplayer.fr/slide/11784893>

France Robardet, C. (2010). *Le livre blanc de l'acoustique en France en 2010*. SFA.

Gamba, R. (2017). Réglementations acoustiques des bâtiments. Conseil National du Bruit(n°6). <https://www.bruit.fr/images/stories/pdf/guide-cnb-6-reglementations-acoustiques-batiments-novembre%202017.pdf>

- Gauthier, Y.** (2022). *Acoustical Consulting Services*. Soft dB. <https://www.softdb.com/products/rapone2/>
- Glé, P.** (2013, 15 Février). *Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation* [thèse de doctorat, Université de Lyon]. Numéro d'ordre : 2013-ENTP-0001. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00923665>
- Gramez, A.** (2010, 12-16 Avril). *Introduction à la réglementation acoustique Algérienne et la réhabilitation acoustique des façades* [communication par affiche]. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon. "<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00533159/document>".
- Guigou Carter, C., Bailhache, S. et Harnois, S.** (2016). *Comparaison des réglementations acoustiques pour les locaux d'enseignements en Europe*. LE MANS. https://www.researchgate.net/publication/303783956_Comparaison_des_reglementations_acoustiques_pour_les_locaux_d_enseignements_en_Europe
- Hamayon, L.** (2006). *Réussir l'acoustique d'un bâtiment* (2^e éd.). Le Moniteur.
- Hamayon, L.** (2008). *Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments*. Le Moniteur.
- Hamayon, L.** (2010). *Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments* (2^e éd.). Le Moniteur.
- Hamayon, L.** (2014). *Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments* (3^e éd.). Le Moniteur.
- Horsin Molinaro, H. & De Sa, C.** (2017, 24 Mars). *Conception acoustique d'une salle – Intérêt du prototypage et principe de conception de maquette*. Ecole normal supérieure Paris-Saclay. <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>
- Hoyet, J.M.** (2010). *Neufert : les éléments des projets de construction* (10^e éd.). DUNOD.
- Jedidi, M.** (2017). *Mise en œuvre de l'isolation acoustique* (1^{ère} éd.). Le Moniteur.
- Journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire.** (2003, 20 Juillet). Conventions Et Accords Internationaux - Lois Et Décrets Arrêtés, Décisions, Avis, communications et annonces (publication n° 43). <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2003/F2003043.pdf>

- Kouzeleas, S.** (2002). *Développement d'un outil d'aide en simulation acoustique architecturale adaptable a un système de modélisation C.A.O.* [thèse de doctorat, Université BORDEAUX 1]. http://papers.cumincad.org/data/works/att/diss_kouzeleas.content.06653.pdf
- Lavandier, C., Raimbault, M., Martel, C., Ignazi, G., DUBOIS, D., Cheminee, P., Guyot, F. et Chevalier, Y.** (s. d.). *Qualité des ambiances sonores liées aux usages des établissements d'enseignement.*
- Lecointre, C.** (2012). *Exposition au bruit dans les écoles. Bruxelles Environnement.* https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/Bru_34.PDF?langtype=2060
- Liébard, A. & De Herde, A.** (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* (1^{ère} éd.). Observ'ER.
- Matthieu, E.** (2016, 12 Mai). *Confort acoustique des bâtiments : Les grandes notions.* Cerema. https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/01_PresentationCEREMA_notionsacoustiques_cle75d7b3.pdf
- Meisser, M.** (2005). *L'acoustique du bâtiment.* Saint-Gobain Isover. <https://www.isover.fr>
- Mezerdi, T.** (2019). *Propagation sonore en espace libre (1).* Département d'Architecture, Université Mohamed Khider-Biskra. http://elearning.univbiskra.dz/moodle2019/pluginfile.php/23034/mod_resource/content
- Noureddine, L.** (2012). *Une acoustique contrôlée dans des bâtiments sains* [présentation d'un conférencier invité]. ACOVIB GROUP. https://www.agpi.org/documents/file/colloques/2012/g6-noureddine_larbi-colloque-agpi-2012.pdf
- Rapin, J.** (2017). *L'acoustique du bâtiment.* Eyrolles.
- Saint-Gobain.** (2016). *Introduction à l'acoustique du bâtiment.* Repéré à <http://www.seformeravecsaint-gobain.com/>
- Saint-Gobain Isover.** (s. d.). *Acoustique du bâtiment Les Fondamentaux.* Repéré à <https://www.isover.fr>
- Schrivier-Mazzuoli, L.** (2007, Mai). *Nuisances sonores : Prévention, protection, réglementation.* Dunod.
- Vincent, B.** (2016, Juillet). *Les effets du bruit sur la santé* [synthèse documentaire]. Acoucité.

Vuylsteke, X. (2012). *Cours d'acoustique et mécanique ondulatoire*. I.U.P. GDP Option GET.
<http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/~yo.fujiso/acoustique/cours.pdf>

Zannin, P.H.T. & Marcon, C.R. (2006). Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms. *Applied Ergonomics*, 38 (2007), 675–680.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.10.001>

Annexes

Annexes

Annexe A : Environnement sonore immédiat de lycée Issad Ahmed O Bachir :

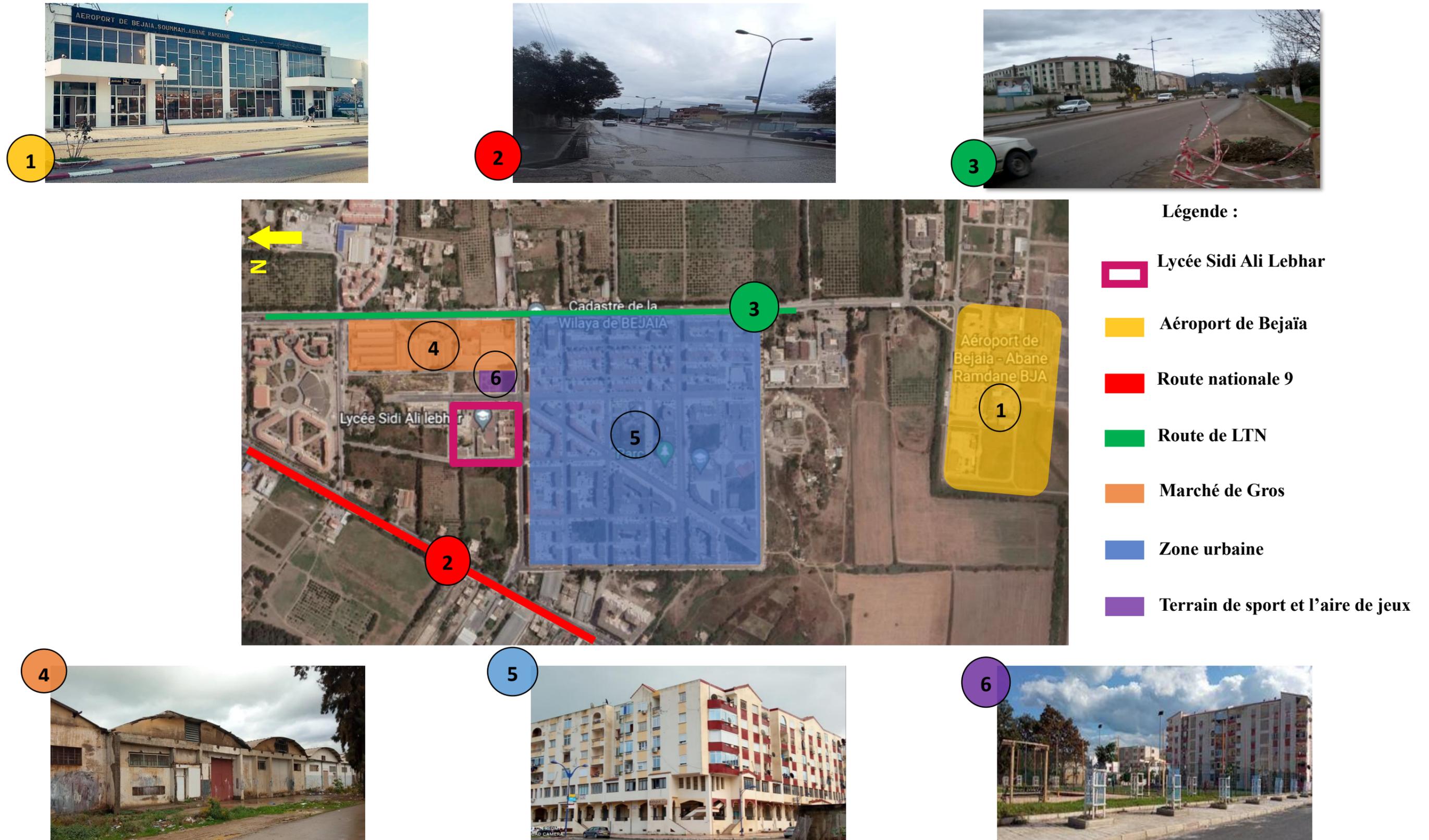


Figure A.1 : Les nuisances sonores influant sur le fonctionnement de lycée

Annexe B : Questionnaire

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira, Bejaia

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Architecture

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عبد الرحمان ميرة بجاية

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

Questionnaire

استبيان

Cas d'étude : Lycée Asaad Ahmed O Bachir, Sidi Ali Lebhar

حالة الدراسة: ثانوية الشهداء أسعد، أحمد وبشير، سيدي علي لبحر

Ce travail est réalisé dans le cadre de préparation d'un mémoire de master en architecture consacré à « l'étude et l'optimisation du confort acoustique dans les établissements scolaires ». Ce questionnaire s'adresse aux élèves de ce lycée afin d'évaluer la satisfaction en termes de la qualité d'écoute au sein des salles de classe.

Nous avons besoins de votre collaboration pour accomplir et réussir notre travail. Vos réponses contribuent à l'étude et l'évaluation des salles de classe ainsi que l'amélioration de la conception future de ses espaces.

Cette opération ne prendra que quelques minutes de votre temps.

Nous vous remercions vivement.

تم انجاز هذا العمل في إطار التحضير لمذكرة الماستر في الهندسة المعمارية الخاصة بـ "دراسة وتحسين الراحة الصوتية في المدارس". يستهدف هذا الاستبيان تلاميذ هذه الثانوية من أجل تقييم رضاهم (راحتهم) فيما يتعلق بجودة الاستماع في الأقسام الدراسية.

نحن بحاجة إلى تعاونكم لإنجاز عملنا والنجاح فيه. فإجاباتكم ستساهم في دراسة وتقييم الأقسام الدراسية وكذلك في تحسين التصميم المستقبلي لمساحاتها.

هذه العملية ستستغرق بضع دقائق فقط من وقتكم.

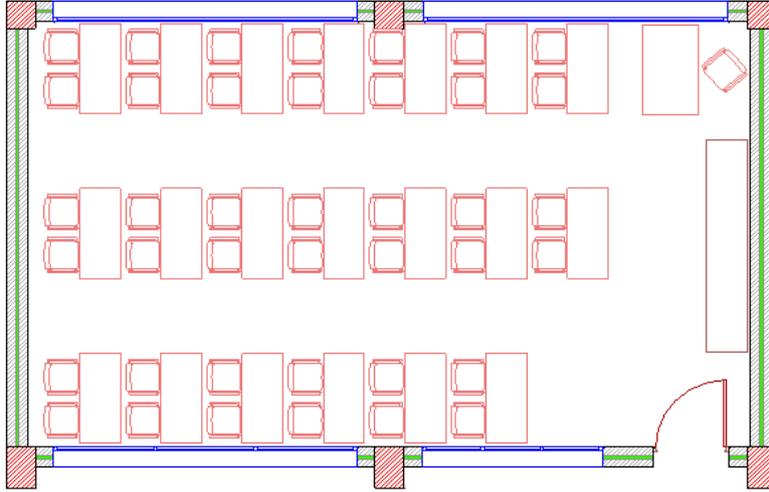
نشكركم جزيل الشكر.

Pour chaque question, veuillez ; s'il vous plaît ; cochez (X) la case vis-à-vis de votre réponse

ضع من فضلك علامة (X) في الخانة المجاورة لإجابتك

- Quel est votre sexe ? Féminin Masculin
ما هو جنسك؟ أنثى ذكر

1. Quelle place occupez-vous dans la classe ? Indiquez-la sur le plan par un cercle :
في أي مكان تجلس في القسم؟ أشر إليه على المخطط بدائرة



2. Comment vous évaluez votre sensation d'écoute dans votre classe (pendant les cours) ?

كيف تقيم شعورك السمعي في القسم (أثناء الدروس)؟

- Très insuffisante Insuffisante Suffisante Très suffisante
غير كافية جدا غير كافية كافية جد كافية

3. Quelle sont les différentes source de bruit à l'intérieur de lycée ?

ما هي أهم مصادر الضوضاء داخل المدرسة؟

- Travaux extérieurs Travaux intérieurs
أعمال خارجية أعمال داخلية
- Déplacement dans le couloir La cour de récréation
الحركة في الممر ساحة المدرسة
- Les classes adjacentes Mobilier (tables, chaises)
الأقسام المجاورة الأثاث (طاولات، كراسي)
- Les voies extérieures Autre :
الطرق الخارجية آخر

4. Les horaires sensibles au bruit ?

الساعات الحساسة للضوضاء؟

- 8h - 10h 10h - 12h 12h - 14h
 14h - 16h 16h - 18h Intercours

بين الحصص

5. Est-ce que la salle résonne le son (renvoie le son avec un retard) ?

هل القسم له صدى الصوت (إعادة الصوت مع التأخير)؟

Oui

Non

نعم

لا

6. Est-ce que la répétition du son (écho) vous dérange ?

هل يزعجك تكرار الصوت (صدى)؟

Oui

Non

نعم

لا

7. Quel est le niveau de gêne produite par cette répétition sonore pendant le cours ?

ما هو مستوى الانزعاج الناتج عن هذا التكرار الصوتي أثناء الدرس؟

Très gênant

Gênant

Moyen

Faible

Très faible

مزعج جدا

مزعج

متوسط

ضعيف

ضعيف جدا

8. Est-ce ses bruits influent sur votre rendu ?

هل يؤثر هذا الضجيج على وتيرة الدراسة؟

Oui

Non

نعم

لا

9. L'influence négative du bruit est sur :

التأثير السلبي للضوضاء يكون على:

La concentration

La fatigue

L'humeur

Irritabilité

التركيز

التعب

المزاج

التهيج

10. Comment vous évaluez le niveau de bruit prévenant de l'extérieur ?

كيف تقيم مستوى الضجيج القادم من الخارج؟

• Lorsque les ouvertures sont fermées :

عند إغلاق الفتحات :

Très gênant

Gênant

Moyen

Faible

Très faible

مزعج جدا

مزعج

متوسط

ضعيف

ضعيف جدا

• Lorsque les ouvertures sont ouvertes: : عند فتح الفتحات :

Très gênant

Gênant

Moyen

Faible

Très faible

مزعج جدا

مزعج

متوسط

ضعيف

ضعيف جدا

11. Quelle est votre sensation et votre satisfaction vis-à-vis le problème de bruit dans votre établissement ?

ما هو شعورك ورضاك اتجاه مشكلة الضوضاء في مؤسستك؟

Très insatisfait

Insatisfait

Satisfait

Très satisfait

مستاء جدا

غير راض

راض

جد راض

Merci pour votre réponse

شكرا على اجابتم

Annexe C : Les valeurs de l'étude quantitative

Les valeurs de décibel obtenues par rapport à chaque scénario lors de l'étude quantitative dans la salle de classe grâce à l'application sonomètre sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau C.1 : Résultats de l'application sonomètre lors du scénario de calme dans la salle de classe (Source : Auteur, 2022)

Point	Mesure								
P 1	51	P 13	55	P 25	49	P 37	49	P 49	51
P 2	52	P 14	55	P 26	51	P 38	52	P 50	50
P 3	53	P 15	55	P 27	54	P 39	50	P 51	52
P 4	54	P 16	56	P 28	54	P 40	49	P 52	50
P 5	56	P 17	57	P 29	55	P 41	50	P 53	52
P 6	56	P 18	59	P 30	55	P 42	51	P 54	50
P 7	51	P 19	50	P 31	50	P 43	52	P 55	54
P 8	53	P 20	52	P 32	49	P 44	51	P 56	52
P 9	54	P 21	53	P 33	50	P 45	49	P 57	48
P 10	54	P 22	50	P 34	51	P 46	49	P 58	49
P 11	54	P 23	57	P 35	52	P 47	50	P 59	50
P 12	55	P 24	58	P 36	53	P 48	51	P 60	52

Tableau C.2 : Résultats de l'application sonomètre dans une salle de classe avec une source sonore interne : au niveau de bureau (Source : Auteur, 2022)

Point	Mesure								
P 1	72	P 13	70	P 25	70	P 37	68	P 49	68
P 2	71	P 14	69	P 26	68	P 38	65	P 50	67
P 3	68	P 15	68	P 27	67	P 39	67	P 51	68
P 4	68	P 16	68	P 28	66	P 40	66	P 52	69
P 5	65	P 17	70	P 29	64	P 41	67	P 53	69
P 6	65	P 18	71	P 30	68	P 42	69	P 54	70
P 7	74	P 19	71	P 31	70	P 43	69	P 55	65
P 8	73	P 20	67	P 32	68	P 44	67	P 56	67
P 9	71	P 21	69	P 33	67	P 45	66	P 57	69
P 10	67	P 22	69	P 34	70	P 46	63	P 58	70
P 11	67	P 23	67	P 35	70	P 47	64	P 59	67
P 12	66	P 24	67	P 36	68	P 48	66	P 60	69

Tableau C.3 : Résultats de l'application sonomètre dans une salle de classe avec une source sonore externe : au niveau de couloir (Source : Auteur, 2022)

Point	Mesure								
P 1	60	P 13	60	P 25	58	P 37	57	P 49	60
P 2	61	P 14	61	P 26	62	P 38	60	P 50	60
P 3	63	P 15	63	P 27	64	P 39	61	P 51	62
P 4	64	P 16	65	P 28	63	P 40	61	P 52	64
P 5	66	P 17	65	P 29	61	P 41	60	P 53	63
P 6	68	P 18	67	P 30	64	P 42	62	P 54	61
P 7	59	P 19	59	P 31	58	P 43	59	P 55	64
P 8	61	P 20	60	P 32	62	P 44	59	P 56	62
P 9	64	P 21	63	P 33	62	P 45	60	P 57	62
P 10	66	P 22	63	P 34	61	P 46	61	P 58	63
P 11	64	P 23	62	P 35	63	P 47	60	P 59	64
P 12	67	P 24	65	P 36	65	P 48	62	P 60	63

Annexe D : Processus de l'étude numérique

L'étude numérique de cette recherche se focalise sur l'importation de fichier sous format qu'il faut (figure D.1) pour modéliser la géométrie du local et évaluer le comportement acoustique de la salle de classe à travers la simulation paramétrique selon le processus suivant :

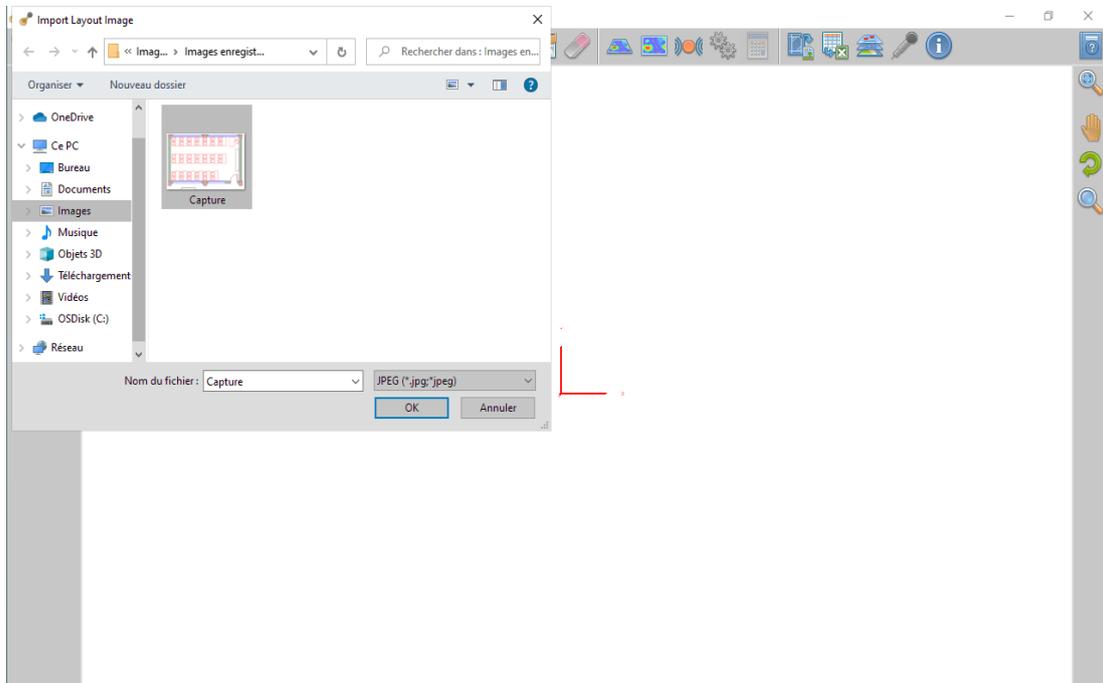


Figure D.1 : Importation de fichier sous format JPEG (Source : Auteur, 2022)

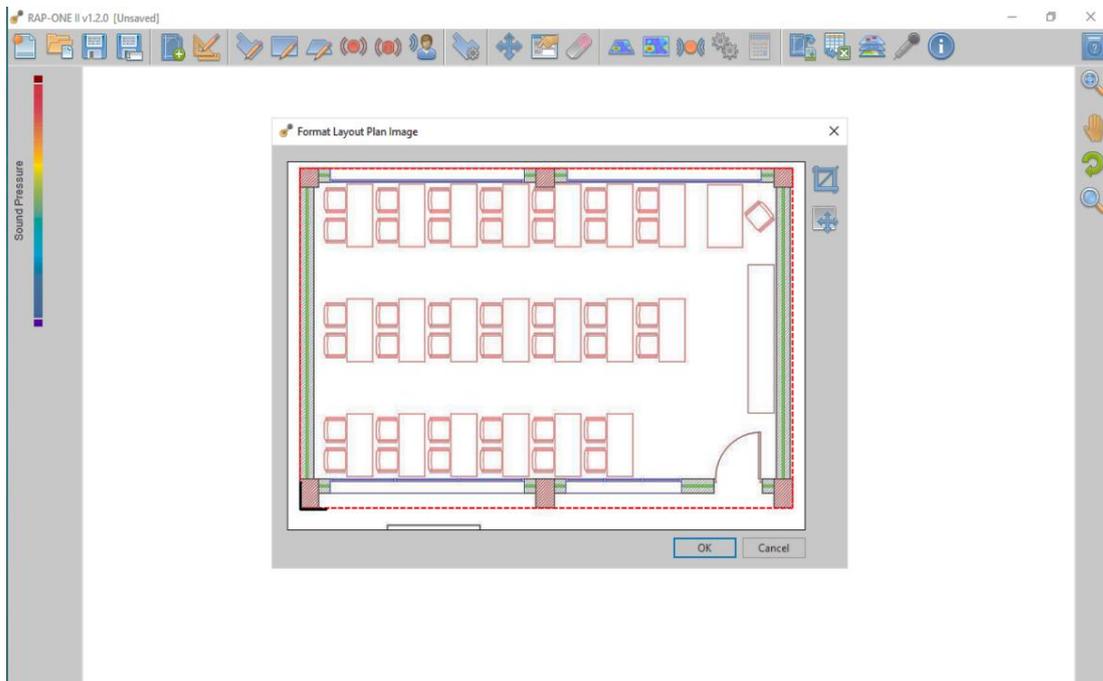


Figure D.2 : Identification des limites de plan du local (Source : Auteur, 2022)

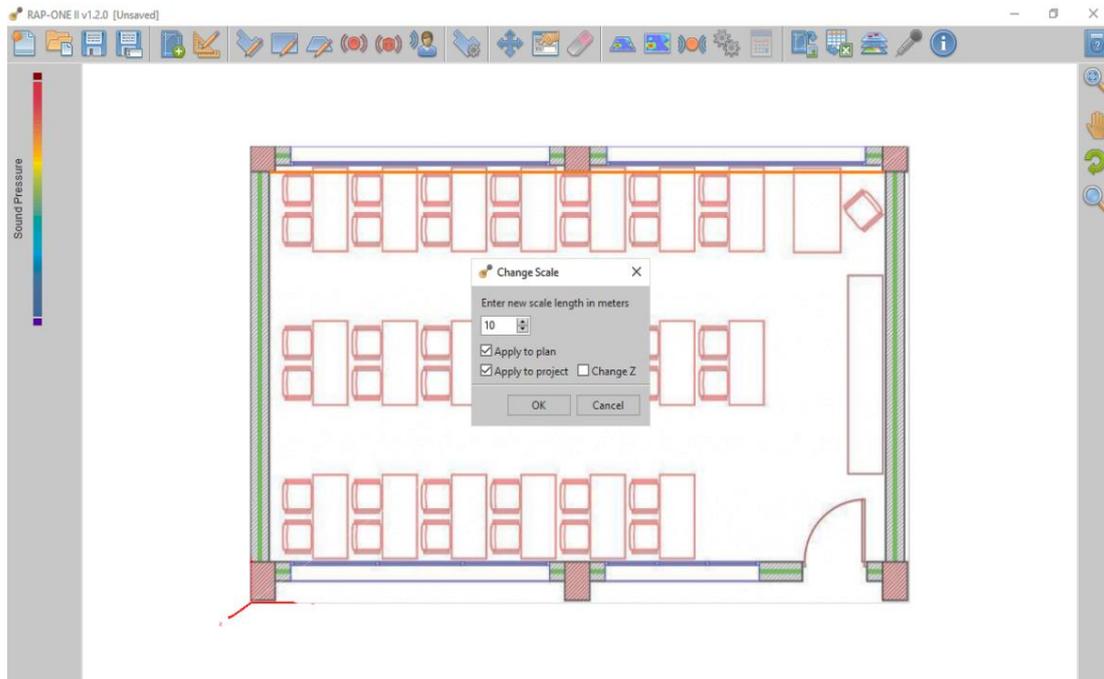


Figure D.3 : Redimensionnement de plan du local (Source : Auteur, 2022)

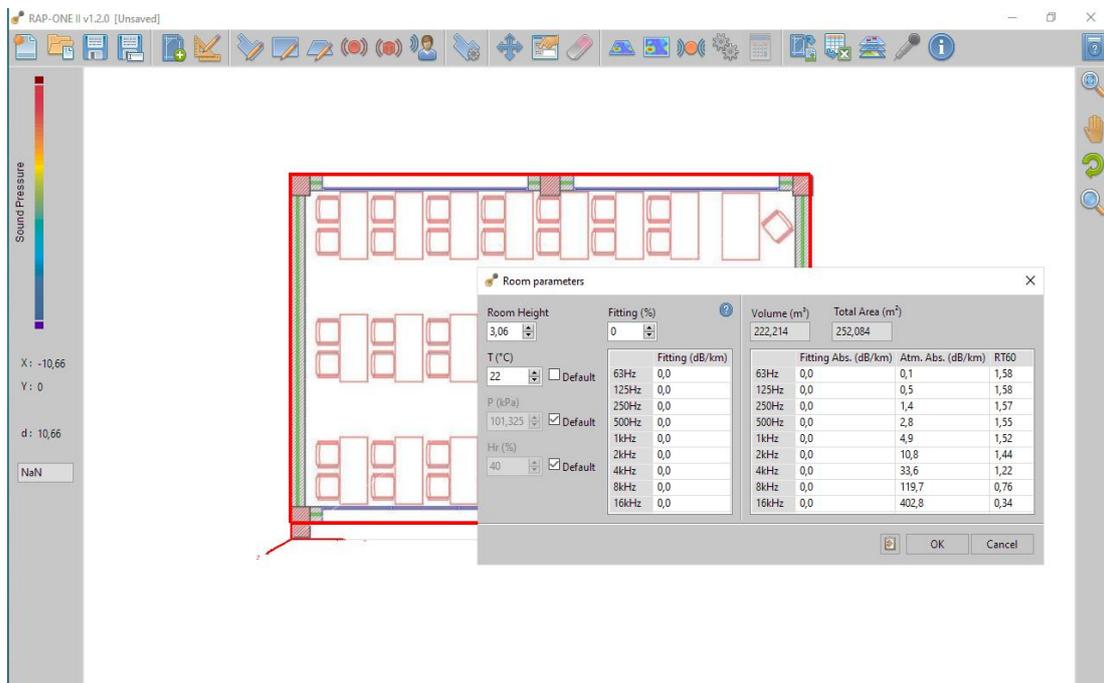


Figure D.4 : Dessin des murs de local et l'identification de leurs hauteurs

(Source : Auteur, 2022)

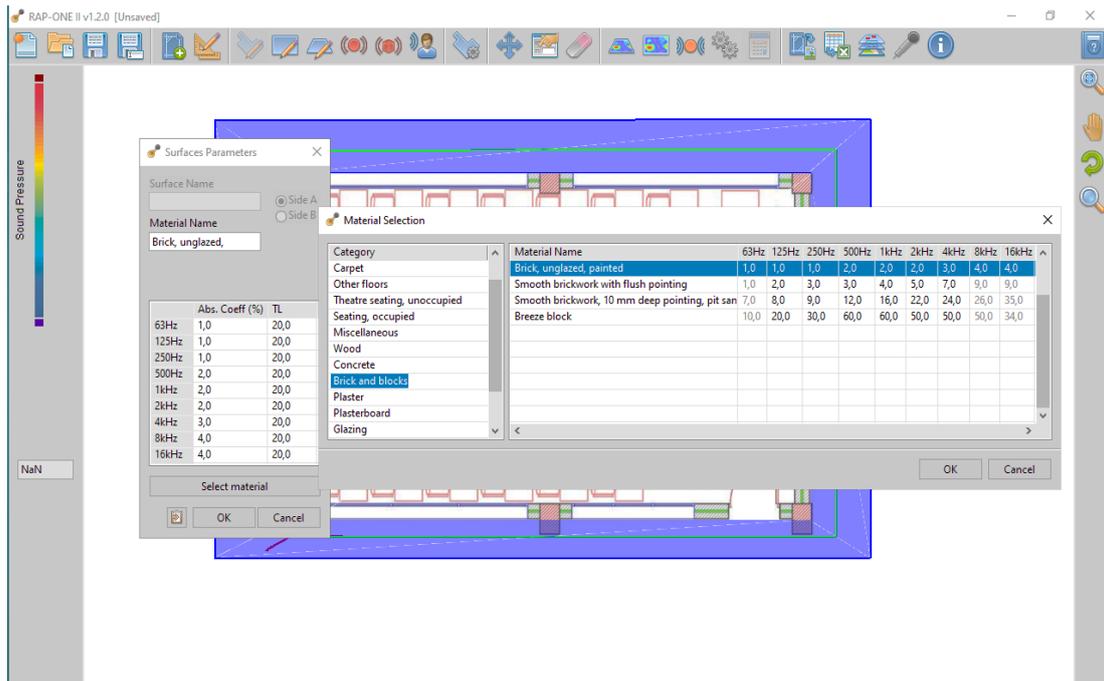


Figure D.5 : Choix des matériaux des parois de local et insertion de leurs coefficients d'absorption (Source : Auteur, 2022)

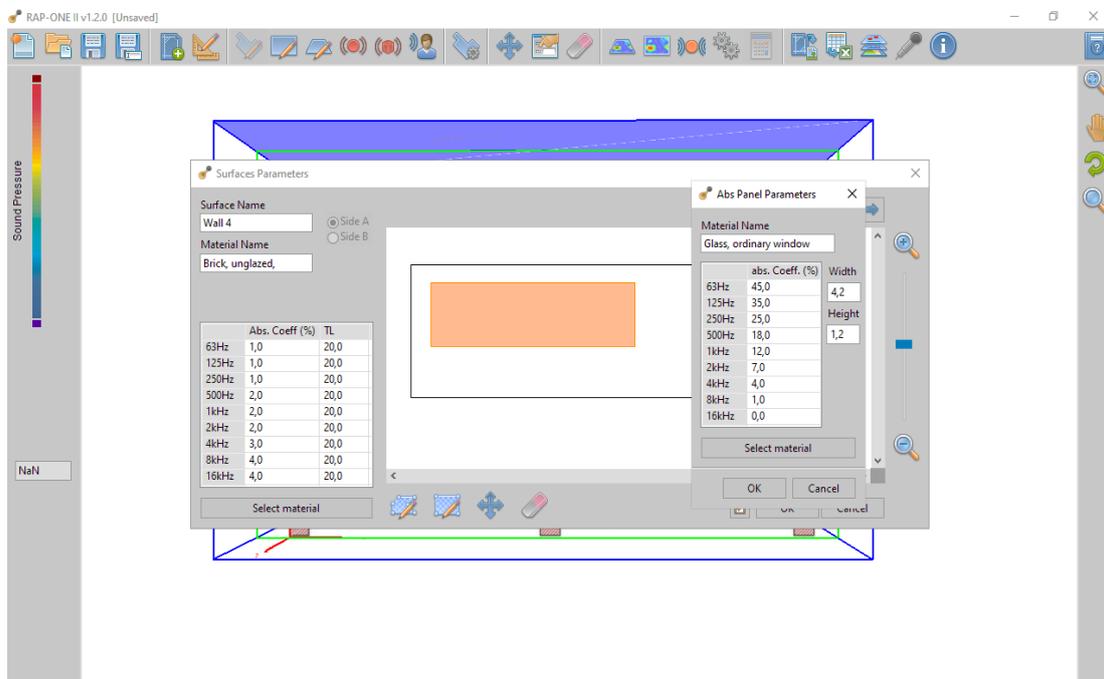


Figure D.6 : Modalisation des fenêtres de local et leurs coefficients d'absorption

(Source : Auteur, 2022)

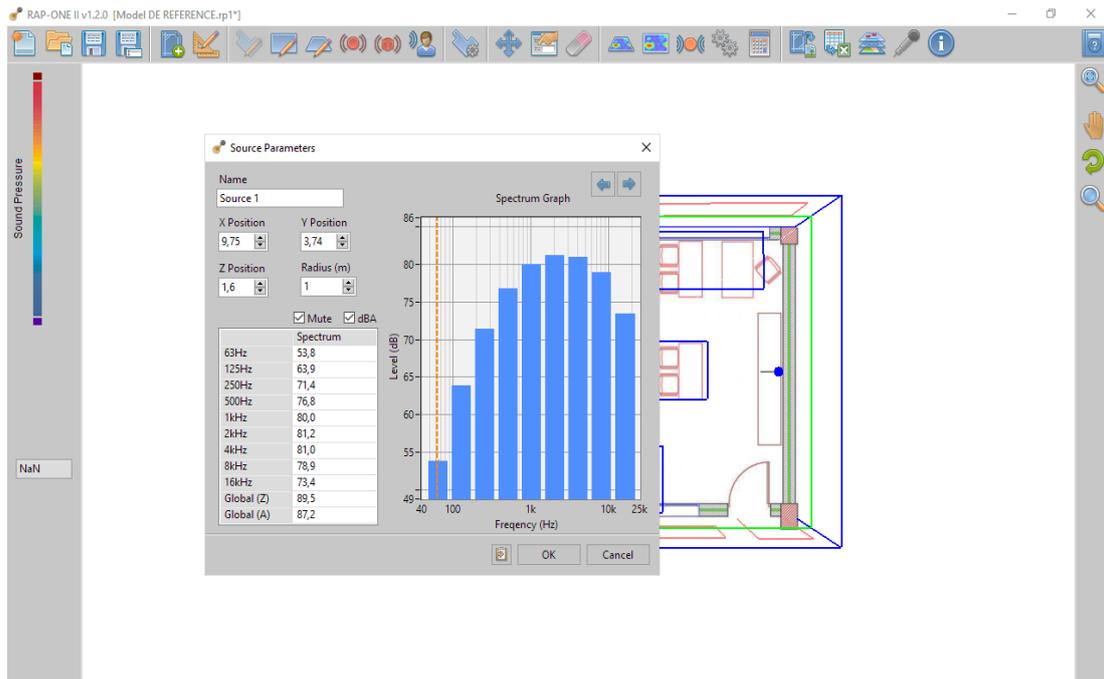


Figure D.7 : Insertion de la source sonore et le récepteurs et le réglage de ses paramètres

(Source : Auteur, 2022)

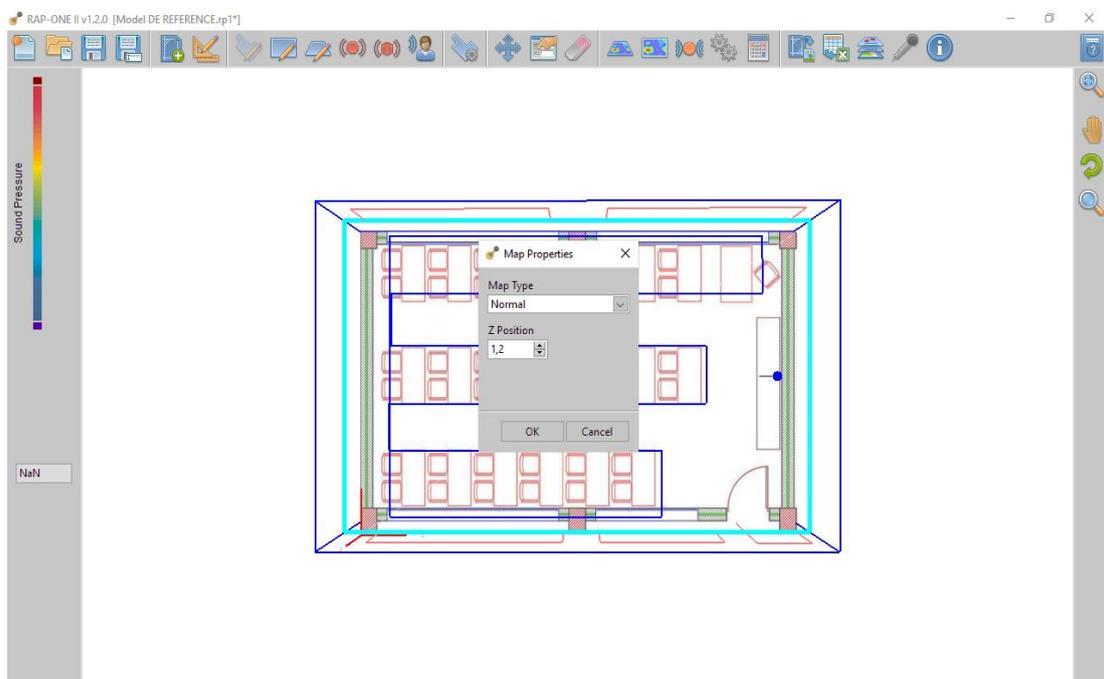


Figure D.8 : Insertion de la carte sonore et le réglage de sa hauteur (Source : Auteur, 2022)

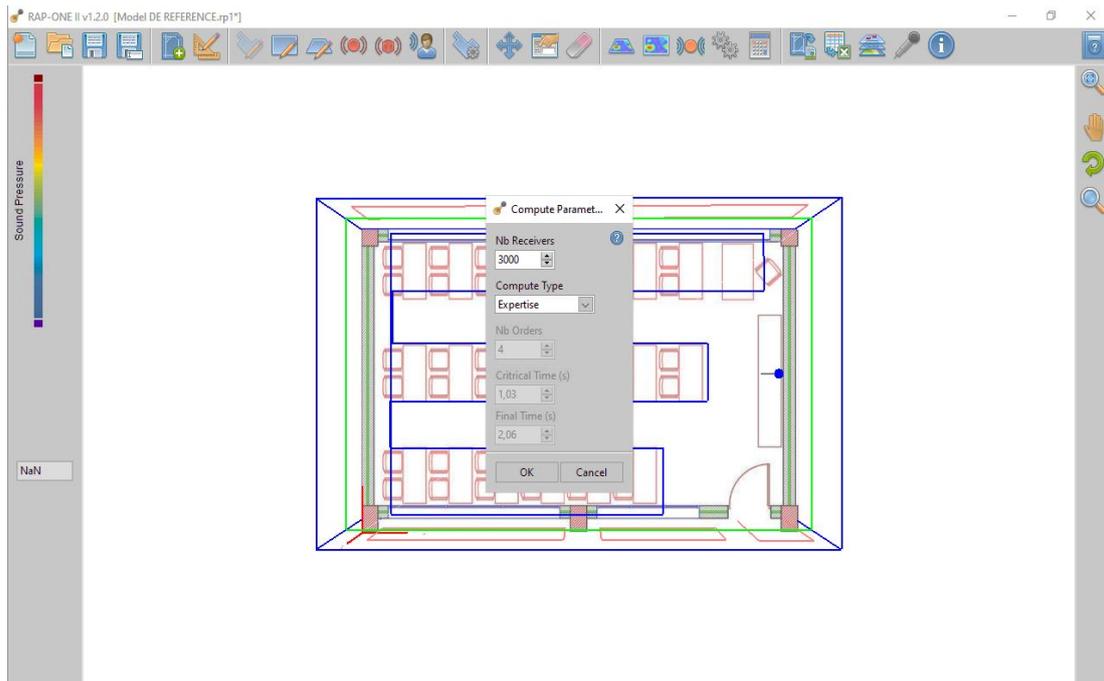


Figure D.9 : Configuration des paramètres de simulation (Source : Auteur, 2022)

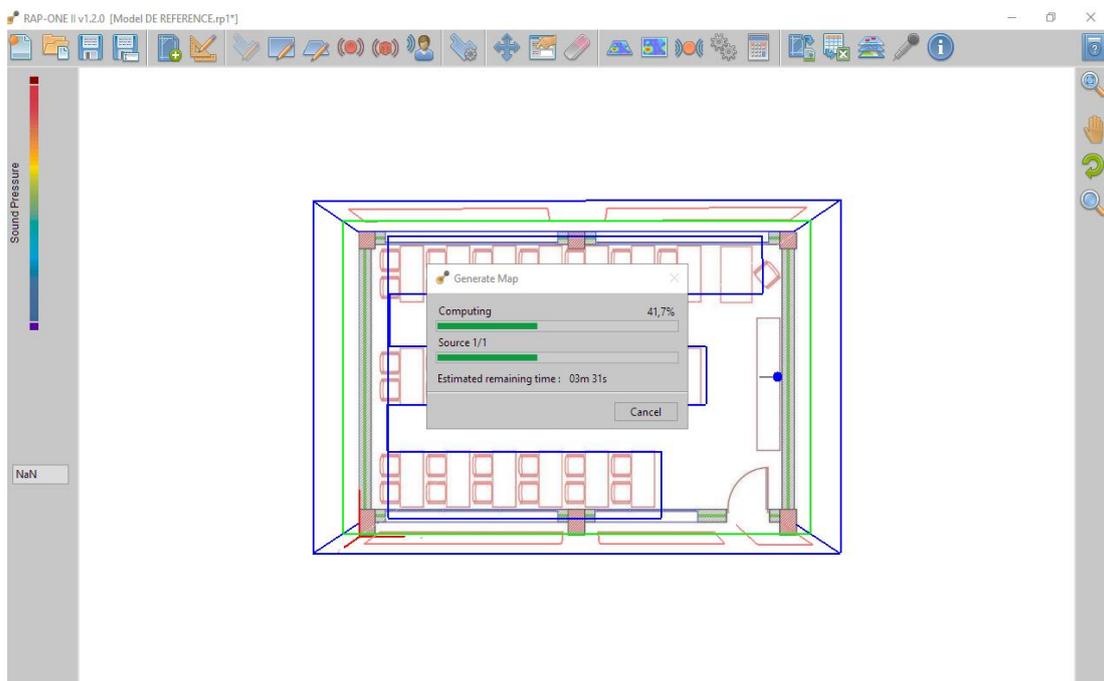


Figure D.10 : Lancement de la simulation (Source : Auteur, 2022)