



Faculté de Technologie
Département d'Architecture



Thème :

Étude du confort acoustique dans les auditoriums universitaires (cas de l'auditorium Djaafri Saadi – Bejaia)

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

Préparé par :

KRINE Samira

Mr. MERZEG Abdelkader	MAA	Département d'architecture de Bejaia	Président de jury
Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine	MCB	Département d'architecture de Bejaia	Rapporteur
Mme LABRECHE Samia	MAA	Département d'architecture de Bejaia	Examineur
Mme BENALLAOUA Siham	MAA	Département d'architecture de Bejaia	Invité

Dédicace

Je dédie cette goutte de sueur qui sillonne mon front pour aller remplir ce modeste travail :

À la source d'amour et de tendresse, à celle qui m'a tout donné :

À toi ma chère mère " SAIDA "

À mon symbole de sacrifice et d'affection, à celui que j'estime le plus:

À toi mon cher père " AMMAR "

À mes chères adorables sœurs : KARIMA et SABRINA ; à mes agréables frères : FERHAT, MOHAMMED, ISMAIL et LAMINE, Ainsi à ma chère cousine DOUNIA et ma tante WIDAD ; Pour vous, je vous souhaite le bonheur et la réussite.

À mon mari LARBI AMINE pour l'amour et l'affection qui nous unissent. Je ne saurais exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien continu dont tu as toujours fait preuve. Tu m'as toujours encouragé, incité à faire de mon mieux. Je te dédie ce travail avec mes vœux de réussite, de prospérité et de bonheur. Je prie Dieu le tout puissant de préserver notre attachement mutuel, et d'exaucer tous nos rêves.

À ma petite princesse adorable RAZANE puisse dieu te protéger, te procurer santé et longue vie.

À tous les autres membres de ma grande famille et notamment ma belle-mère REBIHA et mon beau père MOHAMED et belle-sœur Nesrine Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et de mon attachement indéfectible. Que Dieu vous accorde santé, succès, le bonheur et la réussite.

À tous les étudiants de l'architecture et particulièrement la promotion 2022 et ma meilleure amie ABLA.

À toute personne dont j'ai une place dans son cœur, que je connais, que j'estime et que j'aime.

À l'ensemble du personnel de département d'architecture de l'université de Mira-Bejaia.

Aux personnels de cas d'étude pour leurs accueils et leurs contributions.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier notre encadreur, le docteur KHADAoui MOHAMED AMINE, et Madame BAouCHE OuARDA pour avoir dirigé ce travail, pour leur assistance et leurs conseils qui ont étayé notre conduite dans la réalisation de ce projet.

Mon témoignage le plus ardent et mes sincères remerciements vont également au nombre de juré pour leur disponibilité ; ainsi qu'à tous les enseignants qui nous ont suivis durant cette année d'étude : Mr DJERMouNE HOCINE, Mr SOFIANE BOUNOUNI, Mr BOUFASSA SAMI, Mr SERIKMA MOURAD, Mme SARAoui SELMA EPSE ATTAR .

Mon grand hommage revient précisément à nos familles, tout simplement de nous avoir donné jour après jour autant d'amour, de soutien et d'encouragement.

Enfin, je tiens à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Résumé

La conception architecturale est un processus complexe, les architectes sont amenés à répondre à un grand nombre de paramètres qui se combinent et qui s'interfèrent, la démarche commence d'abord en phase d'esquisse, implique que ces concepteurs privilégient généralement certains indices de conception en détriment des autres, et donc le confort acoustique dans les auditoriums et les spécificités liées à ce concept ne sont pas souvent prises en compte de façon détaillée dans la phase d'esquisse, ce qui aboutit à des conceptions généralement dépourvues de qualité sonore et de confort acoustique à l'intérieur de l'espace. L'objectif de cette recherche est la réalisation d'un auditorium qui contient toutes les conditions qui assurent la haute qualité acoustique aux auditeurs. Cette conception est conditionnée par l'interaction de trois éléments principaux; la forme géométrique, les matériaux appropriés et la propagation harmonieuse des ondes sonores. Cette recherche s'appuie sur trois méthodes; une étude quantitative effectuée par la prise de mesures acoustiques in situ afin d'évaluer le confort acoustique de l'auditorium, puis une étude qualitative par questionnaire afin d'évaluer le degré d'appréciation de l'ambiance sonore et enfin une simulation numérique avec le logiciel Ecotect pour mieux comprendre le phénomène sonore, ces études ont été menées sur l'auditorium universitaire Djaafri Saadi au campus de Terga Ouzemmour à Bejaia. Finalement, les résultats obtenus ont montré une propagation du son acceptable à l'auditorium mais avec quelques problèmes de réflexion excessive des ondes sonores qui engendrent une perturbation de l'intelligibilité du son et le problème de la réverbération.

Mots clés

Auditorium, acoustique architectural, confort acoustique, correction acoustique, isolation acoustique.

Abstract

Architectural conception is a complex process, architects are required to respond to a large number of combined and interfering parameters, the process starts first in the design phase, which implies that these designers generally favor some design cues to the neglect of others, and therefore the acoustic comfort in auditoriums and the particularities related to this concept are often not taken into account in detail in the design phase, which results in designs that are usually lacking in sound quality and acoustic comfort inside the space. The objective of this research is to develop an auditorium that contains all the conditions that ensure high acoustic quality to the listeners. This design is conditioned by the interaction of three main elements; the geometrical shape, the appropriate materials and the harmonious propagation of sound waves. This research is structured around three methods; a quantitative study carried out by taking acoustic measurements in situ in order to evaluate the acoustic comfort of the auditorium, then a qualitative study by the survey in order to evaluate the degree of appreciation of the sound environment and finally a numerical simulation with the Ecotect software for a better understanding of the sound phenomenon, these studies were conducted on the university auditorium Djaafri Saadi at the campus of Terga Ouzemmour in Bejaia. The results obtained showed an acceptable sound propagation in the auditorium, but with some problems of excessive reflection of the sound waves which causes a disturbance of the intelligibility of the sound and the problem of the reverberation.

Key words

Auditorium, Architectural acoustic, acoustic comfort, sound correction, sound insulation.

ملخص

يعد التصميم المعماري عملية معقدة، حيث يتعين على المهندسين المعماريين الاستجابة لعدد كبير من المعلومات التي تتحد وتتداخل، وتبدأ عملية التصميم أولاً بمرحلة الرسم المبدئي، اين يفضل المصممين مؤشرات معينة للتصميم على حساب اخرى، وبالتالي فالراحة الصوتية في صالة العرض والخصائص المتعلقة بهذا المفهوم غالباً لا تؤخذ بعين الاعتبار في مرحلة الرسم المبدئي، مما يؤدي إلى تصميمات خالية بشكل عام من جودة الصوت والراحة الصوتية داخل الفضاء. الهدف من هذا البحث هو تجسيد صالة تحتوي على جميع الخصائص التي تضمن جودة صوت عالية للمستمعين. هذا المفهوم مشروط بتفاعل ثلاثة عناصر رئيسية؛ أولاً الشكل الهندسي ثم مواد البناء المناسبة وأخيراً الانتشار المتناسق للموجات الصوتية. يعتمد هذا البحث على ثلاث طرق؛ دراسة كمية تم إجراؤها من خلال أخذ قياسات صوتية في الموقع من أجل تقييم الراحة الصوتية للصالة، ثم دراسة نوعية عن طريق الاستبيان من أجل تقييم درجة تقدير بيئة الصوت وأخيراً محاكاة صوتية باستخدام برنامج Ecotect لفهم أفضل لظاهرة الصوت، وقد أجريت هذه الدراسات في صالة العرض الجامعي " الجعفري السعدي " التابعة لجامعة ميرا ببجاية. وأخيراً أظهرت النتائج المتحصل عليها انتشاراً مقبولاً للصوت في الصالة لكن مع بعض المشاكل منها الانعكاس المفرط للموجات الصوتية مما يسبب اضطراب في وضوح الصوت ومشكلة الصدى.

الكلمات المفتاحية

صالة العرض، الصوتيات المعمارية، الراحة الصوتية، التصحيح الصوتي، عزل الصوتي.

Table des matières

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

CHAPITRE INTRODUCTIF

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

PREMIÈRE PARTIE : PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I : L'ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE

Introduction	6
I.1. L'acoustique architecturale.....	6
I.2. Le son.....	7
I.2.1. Définition du son	7
I.2.2. Les caractéristiques d'un son.....	7
a) La fréquence du son.....	7
b) Le niveau sonore.....	9
c) La durée du son.....	9
I.2.3. La longueur d'onde	10

I.2.4. La perception du bruit et la sensibilité de l'oreille	10
I.2.5. Mesure du son.....	11
I.2.6. Types du son	12
a) Son pur.....	12
b) Son complexe.....	13
c) Son confus	13
I.2.7. Propagation du son dans un espace libre	14
I.2.8. Propagation du son dans un espace clos	15
I.3. Le bruit	16
I.3.1. Sources et types de bruit	17
a) Les bruits aériens	17
b) Bruit solidiens ou bruit d'impact.....	18
c) Bruit des équipements.....	18
I.3.2. La propagation des bruits.....	19
a) Par diffusion.....	19
b) Par réflexion et absorption sur un obstacle.....	19
c) Par transmission de la vibration aux matériaux	19
I.3.3. Les chemins de transmissions.....	19
I.3.4. Types de bruits en présence dans le bâtiment.....	20
a) Bruit continu	20
b) Bruit intermittent	20
c) Bruit à caractère impulsionnel	21
d) Bruit à tonalité marquée.....	21
Conclusion.....	21

CHAPITRE II : LE CONFORT ACOUSTIQUE ET L'ACOUSTIQUE DES AUDITORIUMS

Introduction	23
II.1. Le Confort Acoustique	23
II.1.1. La notion du confort acoustique.....	24
II.1.2. L'isolement acoustique	24
a) Isolement brut entre locaux.....	24
b) Isolement brut pondéré entre locaux.....	25
c) Isolement standardisé pondéré entre locaux	25

II.1.3.	Principe de L'isolation acoustique	26
a)	L'étanchéité.....	28
b)	La masse.....	29
c)	La désolidarisation	29
II.1.4.	La correction acoustique	30
a)	Les matériaux absorbants.....	31
b)	Autres matériaux	33
c)	Les matériaux d'origine agricole « BIOSOURCES »	34
II.2.	Le confort acoustique des auditoriums.....	35
II.2.1.	Durée de réverbération	35
II.2.2.	Absorption.....	36
II.2.3.	Le facteur d'absorption	37
II.2.4.	La surface d'absorption.....	39
II.2.5.	Écho.....	39
II.3.	Application aux auditoriums	39
II.3.1.	Durée de réverbération	39
II.3.2.	Netteté phonique	40
II.3.3.	Perception de l'espace.....	41
II.3.4.	Réflexions diffuses.....	14
II.4.	Forme et géométrie	44
II.4.1.	Géométrie des salles.....	44
II.4.2.	Forme de la salle	44
II.4.3.	Disposition de la scène.....	46
Conclusion.....		49

DEUXIÈME PARTIE : PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III : ETUDE EMPIRIQUE DU CONFORT ACOUSTIQUE DANS L'AUDITORIUM UNIVERSITAIRE DJAAFRI SAADI

Introduction	50	
III.1	Présentation du Campus Universitaire Targa Ouzemmour	51
III.2	Étude quantitative de l'auditorium Djaafri Saadi	51
III.2.1	Présentation des cas d'étude.....	51

III.2.2	Contexte Immédiat	52
a)	Bruit aérien extérieur	52
b)	Bruit de choc	53
c)	Bruit d'équipement	53
III.2.3	L'enveloppe de la construction	53
a)	La forme.....	53
b)	La taille	54
c)	Les matériaux.....	54
III.2.4	Protocole de la prise de mesures	54
III.2.5	Instrument de la prise de mesures	55
III.2.6	Résultats et interprétations	57
III.3	Étude qualitative de l'auditorium Djaafri Saadi	59
III.3.1	Les méthodes et les techniques de recherche utilisées.....	59
III.3.2	Structure du formulaire des questions.....	59
III.3.3	Le traitement statistique	60
III.3.4	Résultats et interprétations	60
Conclusion	66

CHAPITRE IV : ETUDE ET OPTIMISATION NUMERIQUE DE L'ACOUSTIQUE DES AUDITORIUMS

Introduction	67
IV.1	La technique de simulation.....	67
IV.2	Le choix d'outil de simulation.....	68
IV.3	Les étapes de simulation via le logiciel ECOTECT	69
IV.3.1.	Réalisation du modèle simulé	69
IV.3.2.	Importation du modèle dans l'Ecotect	70
IV.3.3.	Insertion des matériaux	70
IV.3.4.	Définition de la source	71
IV.3.5.	Analyse acoustique.....	71
IV.4	Étude paramétrique de l'auditorium.....	72
IV.4.1.	Modèle de référence	72
IV.4.2.	Étude de l'impact de la forme	72
a)	Forme des parois rectangulaires.....	73
b)	Forme du plafond incliné	73

IV.4.3. Étude de l'impact des matériaux	74
a) Parois avec isolant en cellulose.....	74
b) Plafonds avec panneaux acoustique.....	74
IV.5 Résultats et discussion	75
IV.5.1. Résultat et interprétation de modèle de référence	75
IV.5.2. Résultat et interprétation de modèle simulé avec parois rectangulaire	78
IV.5.3. Résultat et interprétation de modèle simulé avec plafond incliné.....	79
IV.5.4. Résultat et interprétation de modèle simulé avec isolant en cellulose	80
IV.5.5. Résultat et interprétation de modèle simulé avec panneaux acoustique	81
Conclusion.....	82
Conclusion générale	83
Recommandations	84
Les limites de la recherche	85
Perspectives de recherche.....	85
Bibliographie.....	87
Annexes	98
Annexe A.....	89
Annexe B.....	92
Annexe C.....	95
Annexe D.....	97
Annexe E	101
Annexe F	106

Liste des figures

Figure 1: Schéma de l'analyse conceptuelle	3
Figure 2: Structure du mémoire	5
Figure I-1 : Propagation du son.....	7
Figure I-2 : Cinq oscillations en dix millisecondes, la fréquence est de 500 Hz	8
Figure I-3 : Fréquences du son.....	8
Figure I-4 : Échelle du son	9
Figure I-5 : Le son en fonction de la période T et son niveau.....	9
Figure I-6 : Echelle de niveau du bruit.....	10
Figure I-7 : La zone d'émission de la parole.....	11
Figure I-8 : Sonomètre	12
Figure I-9 : Son pur	12
Figure I-10 : Son complexe.....	13
Figure I-11 : Son confus.....	14
Figure I-12 : Différence entre vitesse de propagation et vitesse vibratoire	14
Figure I-13 : Réflexion en espace clos	15
Figure I-14 : Propagation du son dans un espace clos	15
Figure I-15 : Échelle de niveau de bruit.....	16
Figure I-16 : Source de bruit	17
Figure I-17 : Les bruits aériens	17
Figure I-18 : Le bruit solidiens.....	18
Figure I-19 : Le bruit des équipements	18
Figure I-20 : Les modes de propagation du bruit	19
Figure I-21 : Bruit continu	20
Figure I-22: Bruit intermittent.....	21
Figure I-23 : Bruit à caractère impulsionnel	21
Figure II-1 : Mesure de l'isolement entre deux locaux.....	25
Figure II-2 : Correction du niveau de pression acoustique dans le local de réception en fonction de la durée de réverbération.....	26
Figure II-3 : Absorption acoustique et l'isolation acoustique	27
Figure II-4 : Les trois acteurs de l'isolation acoustique	28

Figure II-5 : Logements séparés par un joint de dilatation	29
Figure II-6 : La boîte dans la boîte » pour une forte isolation	30
Figure II-7 : Distance minimale souhaitée entre la paroi et la surface de l'absorbant pour une bonne efficacité aux différentes fréquences	31
Figure II-8: Système absorbant résonateur fente : a) coupe ; b) vue perspective	32
Figure II-9 : La laine	32
Figure II- 10 : Mousse à cellules ouvertes	32
Figure II-11 : Deux cloisons liées par des poteaux élastiques	33
Figure II-12 : Deux cloisons liées par une mousse	33
Figure II-13 : Les rayons sonores se réfléchissent à l'infini sur les murs de la salle.....	35
Figure II-14 : Décroissance du niveau sonore dans une salle après arrêt de la source	36
Figure II-15 : Absorption, transmission et réflexion de l'énergie acoustique	37
Figure II-16 : Durée de la réverbération optimale, tolérance $\pm 20\%$	40
Figure II-17 : Réflexions diffuses par alternance de matériaux. b) Surface provoquant des réflexions diffuses	41
Figure II-18 : Réflexions diffuses par alternance de matériaux. b) Surface provoquant des réflexions diffuses	42
Figure II-19 : Absorption de fréquences basses par surface de co-vibrante	43
Figure II-20 : Comportement de l'absorption par cavités.....	43
Figure II-21 : Absorption par matériaux poreux	43
Figure II-22 : Forme de plafond inadaptée.....	44
Figure II-23 : Forme incliné du plafond.....	45
Figure II-24 : Plan peu favorable	45
Figure II-25 : Philharmonie de Berlin - Echelonnement des rangs.....	46
Figure II-26 : Scène de la petite salle de musique de chambre de la Beethovenarchiv de Bonn.....	46
Figure II-27 : Chute du niveau sonore au-dessus de surfaces absorbantes	47
Figure II-28 : Surélévation des rangs en spirale log.....	47
Figure II-29 : Pliage de la surface murale	47
Figure II-30 : Voiles de reproduction acoustique.....	48
Figure II-31 : Effet de foyer par surfaces courbes	48
Figure II-32 : Bonne propagation du son par courbe adaptée	49
Figure III-1 : Campus Targa Ouzemmour.....	51
Figure III-2 : Constitution de l'auditorium Djaafri Saadi	52
Figure III-3 : Bruit aérien extérieur.....	53

Figure III-4 : Auditorium Djaafri Saadi	54
Figure III-5 : Plan auditorium Djaafri Saadi avec grille	55
Figure III-6 : Instrument utilisé pour la prise de mesure.....	56
Figure III-7 : Comparaison entre sonomètre et application Android « sonomètre »	56
Figure III-8 : Graphique représentant Scenario 01 pour les calculs acoustiques	57
Figure III-9: Graphique représentants Scenario 02 pour les calculs acoustiques	58
Figure III-10 : Graphique représentant Scenario 03 pour les calculs acoustiques	58
Figure III-11 : Pourcentage de fréquentation de l'auditorium.....	61
Figure III-12 : Le plan de l’auditorium avec zones.....	61
Figure III-13 : les zones préféré a occupées.....	62
Figure III-14 : Existence des nuisances sonores au sein de l’auditorium	62
Figure III-15 : La source bruit extérieur.....	62
Figure III-16 : Qualification de la qualité du son.....	63
Figure III-17 : Qualification de l’ambiance sonore.....	63
Figure III-18 :Schéma radar	64
Figure III-19 : Le retour de son dans l’auditorium.....	64
Figure III-20 : La satisfaction via le retour de son dans l’auditorium.....	64
Figure III-21: La résonance du son	65
Figure III-22 : L’écoute de la voix de l’interlocuteur	65
Figure III-23 : Le besoin de développer une étude acoustique	65
Figure IV-1: Résultat de simulation avec Ecotect, acoustique (a), ombres et dégradés (b) Radiation solaire (c)	68
Figure IV-2: Modélisation de modèle à simulé sur SketchUp	68
Figure IV-3: La composition des parois de l’auditorium.....	69
Figure IV-4: Importation du modèle dans l'Ecotect.....	70
Figure IV-5: Insertion des matériaux	70
Figure IV-6: Définition de la source	71
Figure IV-7: La durée de réverbération.....	71
Figure IV-8: Analyse acoustique.....	71
Figure IV-9: La propagation du son représenté par particules animées.....	72
Figure IV-10: Modèle de référence	72
Figure IV-11: Forme rectangulaire de l’auditorium.....	73
Figure IV-12: Forme incliné du plafond de l’auditorium	73

Figure IV-13: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 20ms	75
Figure IV-14: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 20ms	75
Figure IV-15: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 60ms	76
Figure IV-16: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 60ms	76
Figure IV-17: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms	76
Figure IV-18: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms	77
Figure VI-19: Variation des ondes sonore en fonction du temps.....	77
Figure IV-20: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de la forme des parois rectangulaire après 100ms	78
Figure IV-21: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de la forme des parois rectangulaire après 100ms	78
Figure IV-22: Variation des ondes sonore en fonction du temps.....	79
Figure IV-23: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms	79
Figure IV-24: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de la forme incliné de plafond après 100ms.....	80
Figure IV-25: Variation des ondes sonore en fonction du temps.....	80
Figure IV-26: Vue latérale de la propagation du son suite à l'ajout des panneaux acoustiques après 100ms.....	81
Figure IV-27: Vue latérale de la propagation du son par surface incidente suite à l'ajout des panneaux acoustiques après 100ms.....	81
Figure IV-28: Variation des ondes sonore en fonction du temps.....	81

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Le coefficient d'absorption α de quelques matériaux	38
Tableau II-2 : Durée de la réverbération optimale dans les salles	40
Tableau II-3 : Volume spécifique $V=f(\text{art})$	41
Tableau IV-1 : Résultat après déduction de la mesure du bruit ambiant constant	74
Tableau IV-2 : Performance acoustique de cellulose	74
Tableau IV -3 :Performance acoustique panneaux acoustique	75

Nomenclature

Abréviation

C : célérité du son (m/s).

λ : longueur d'onde (m).

dB : décibel.

E_A : énergie absorbée (W/m^2).

E_I : énergie incidente (W/m^2).

E_R : énergie réfléchie (W/m^2).

E_T : énergie transmise (W/m^2).

F : fréquence (Hz).

I : l'intensité (W/m^2).

P : pression (Pa).

Pa : pascals.

P_0 : pression statique.

TD : transmission directe.

TP : transmission parasite.

TL : transmission latérale.

$L_p(e)$: pression acoustique dans le local d'émission.

$L_p(r)$: pression acoustique dans le local de réception.

D : l'isolement brut entre locaux.

T : temps de réverbération.

M : la masse de l'unité de surface de la paroi.

A : aire d'absorption

v : vitesse

α : coefficient d'absorption

as : degré d'absorption acoustique en fonction de la taille de la pièce,

S: surface primitive de référence

Indices

λ Conductivité thermique ($W/m.k$).

CHAPITRE INTRODUCTIF

Chapitre introductif

1. Introduction

Le son a une influence importante sur la qualité de vie au quotidien, une source de plaisir et de douleur dans nos vies, de nos jours l'importance du son a diminué avec l'avènement d'un abri sûr mais il affecte toujours notre vie ; les progrès scientifiques nous ont permis de comprendre pourquoi le son nous affecte dans tant de différentes façons et ont permis l'exploration du mécanisme de l'audition, L'acoustique est la science du son, qui nous a permis de contrôler le son à la fois pour notre avantage et à notre détriment, au cours des siècles l'ouïe a été la base de nos évaluations malgré qu'il ne soit pas un élément essentiel de l'acoustique (Cowan, 2016), L'acoustique du bâtiment traite la propagation du son à l'intérieur du bâtiment, une bonne conception acoustique par la disposition des différentes fonctions permet d'éviter la propagation des bruits gênants (Eckard & Muller, 2009).

En Algérie, des réglementations ont été introduites depuis les années 1983 pour les problèmes et les nuisances dues à l'exposition au bruit, mais l'acoustique des bâtiments en phase conception n'a pas été pris en considération, la réglementation acoustique algérienne actuelle est constitué de deux lois, un décret et un document technique réglementaire (Gramez, 2010A).

Notre objectif de recherche est de déterminer les différents paramètres qui permettent la propagation harmonique du son dans l'espace pour fournir aux occupants un confort acoustique optimale et prennent en considération ces paramètres dès la phase de conception du projet.

2. Problématique

Le problème de la qualité acoustique des salles notamment des auditoriums est multidimensionnel, il touche trois domaines : le domaine géométrique (la conception, dimensionnement des équipements, l'étude des planchers...), le domaine objectif (les champs acoustiques) et le domaine subjectif (les auditeurs et leur perception du degré de confort acoustique). Alors nous devrions simplifier les problèmes par une bonne définition des concepts et un bon choix des paramètres significatifs dans chacun des trois domaines (Gramez, 2010B), une bonne conception architectural acoustique et un bon design sont les clés qui permettent d'éviter les problèmes acoustiques des salles notamment le problème de réverbération et l'écho (Eckard & Muller, 2009).

À travers ce constat, notre étude portera sur la question principale suivante :

Quelle sont les solutions conceptuelles architecturales à prendre en considération pour la conception d'un auditorium ayant une qualité acoustique ?

3. Hypothèses

Afin de répondre à la problématique mise en perspective ; nous essayerons de tester les hypothèses suivantes :

- ◆ L'utilisation de la forme géométrique adéquat peut influencer le comportement acoustique des auditoriums.
- ◆ Une bonne conception acoustique avec l'utilisation des matériaux adaptés peut offrir une meilleure qualité acoustique.
- ◆ Une propagation harmonieuse des ondes sonores dans notre espace en intégrant les solutions techniques (relecteurs, amplificateurs...) peut permet un confort acoustique aux auditeurs.

4. Contexte et objectifs de la recherche

La présente recherche porte sur le confort acoustique dans les auditoriums, notamment l'influence de la géométrie et des matériaux de construction sur le confort acoustique à l'intérieur de l'auditorium et nous avons pris l'auditorium Universitaire Djaafri Saadi au campus de Terga Ouzemour à Bejaia comme cas d'étude.

L'objectif principal de cette recherche consiste à connaître comment réaliser un auditorium qui contient toutes les conditions qui assurent la haute qualité acoustique aux auditeurs à travers :

- ◆ La conception d'un auditorium avec une forme géométrique qui assure propagation harmonieuse du son.
- ◆ L'utilisation des matériaux adaptés pour assurer un confort acoustique aux auditeurs.
- ◆ L'application des solutions technique adéquat (relecteurs, amplificateurs...) dans la conception du projet.

5. Analyse conceptuelle

L'analyse conceptuelle de la recherche a pour but la concrétisation des notions contenues dans les hypothèses en vue de les convertir en phénomènes mesurables. De plus, les variables indépendantes et dépendantes ont été dégagées (Figure 1) :

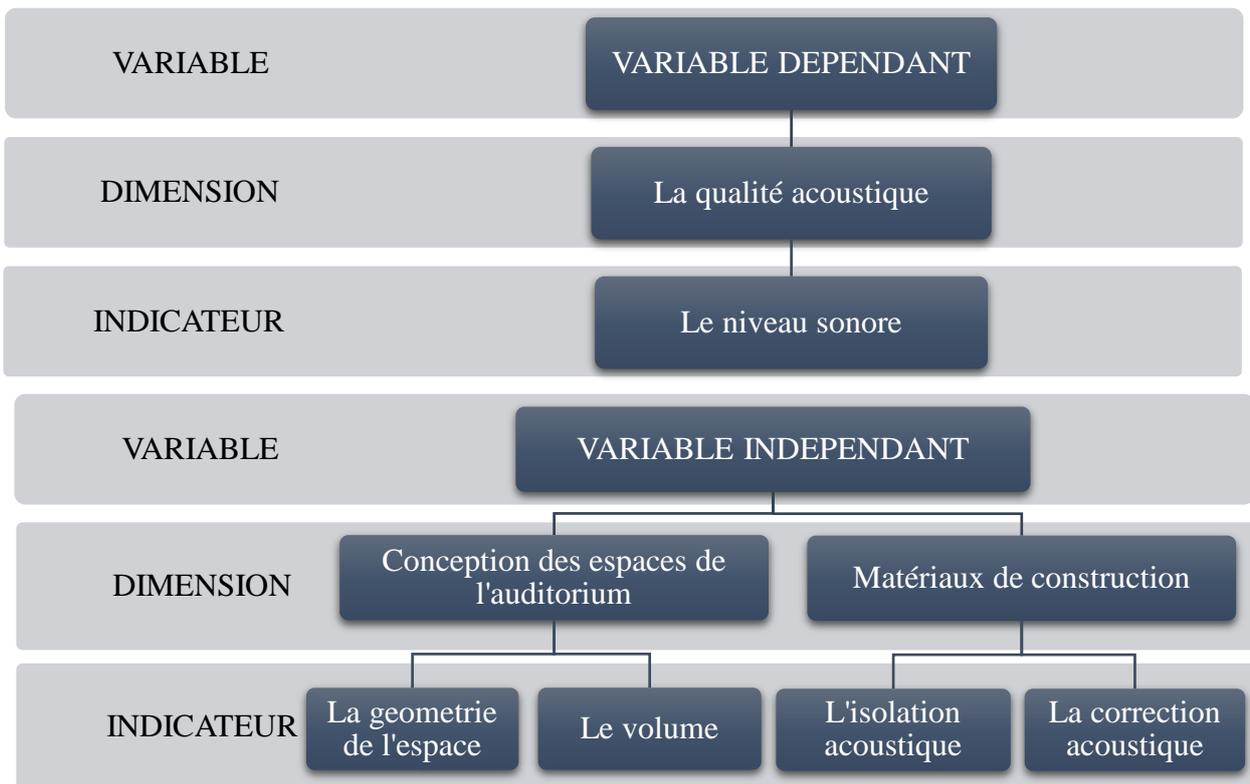


Figure 1: Schéma de l'analyse conceptuelle (Source: Auteur, 2022)

6. Méthodologie

Afin de fournir des réponses objectives aux questions posées dans notre problématique et pour une meilleure maîtrise du sujet nous avons décidé de deviser le travail en trois phases:

- ◆ Méthode théorique: une approche thématique basée sur une étude bibliographique afin de cerner le sujet à étudier (la collecte des différents ouvrages livres, revues, articles, thèses ...)
- ◆ Méthode empirique : (mesures prises in situ) accompagnée d'une étude qualitative à travers une enquête (questionnaire) qui permet d'étudier la sensation et la satisfaction des utilisateurs vis-à-vis du confort acoustique.
- ◆ Méthode numérique: Cette étape s'appuiera sur une simulation numérique par le logiciel (Ecotect) qui permet une analyse acoustique afin de nous aider à la prise de décision. La simulation donne une lecture globale et une bonne compréhension du confort acoustique.

7. Structure du mémoire

Cette recherche est divisée en trois Chapitres :

1. Le chapitre introductif :

Destiné à la présentation de l'introduction générale, la problématique dans laquelle nous exposons la question de recherche, les hypothèses à vérifier, les objectifs à atteindre ainsi que la démarche méthodologique qu'elle suit finalement une structure de mémoire.

2. Partie théorique :

Destiné à étudier l'acoustique architecturale en n'abordant les notions du son, et du bruit, ainsi que le confort acoustique et l'acoustique dans les auditoriums. Elle comporte deux chapitres :

Le premier chapitre se base sur les généralités sur l'acoustique architecturale, les notions du son, et du bruit. Elle aborde les notions concernant le son et sa propagation dans les espaces.

Le deuxième chapitre présente le champ théorique et les diverses notions de confort acoustique et l'acoustique dans les auditoriums.

3. Partie pratique : Comprend une étude empirique et une simulation acoustique de l'auditorium universitaire (le choix des outils, les étapes de travail, les résultats, ...), il se compose de deux chapitre :

Le troisième chapitre basé sur une étude empirique comparative entre l'évaluation quantitative et qualitative de confort acoustique dans l'auditorium universitaire Djaafri Saadi de l'université « Terga Ouzemour » à Bejaia.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'étude et optimisation numérique de l'acoustique des auditoriums par l'impact des matériaux de construction et de la forme sur le confort acoustique à l'aide de logiciel de simulation numérique « Ecotect ».

4. À la fin de ces chapitres, la recherche se conclut par une conclusion générale qui témoigne de l'importance du thème afin de construire un projet qui réponde aux questions posées. et une bibliographie qui indique les références qui ont été utilisées au cours de ce travail.

La figure 2 illustre un schéma qui synthétise la structure du mémoire.

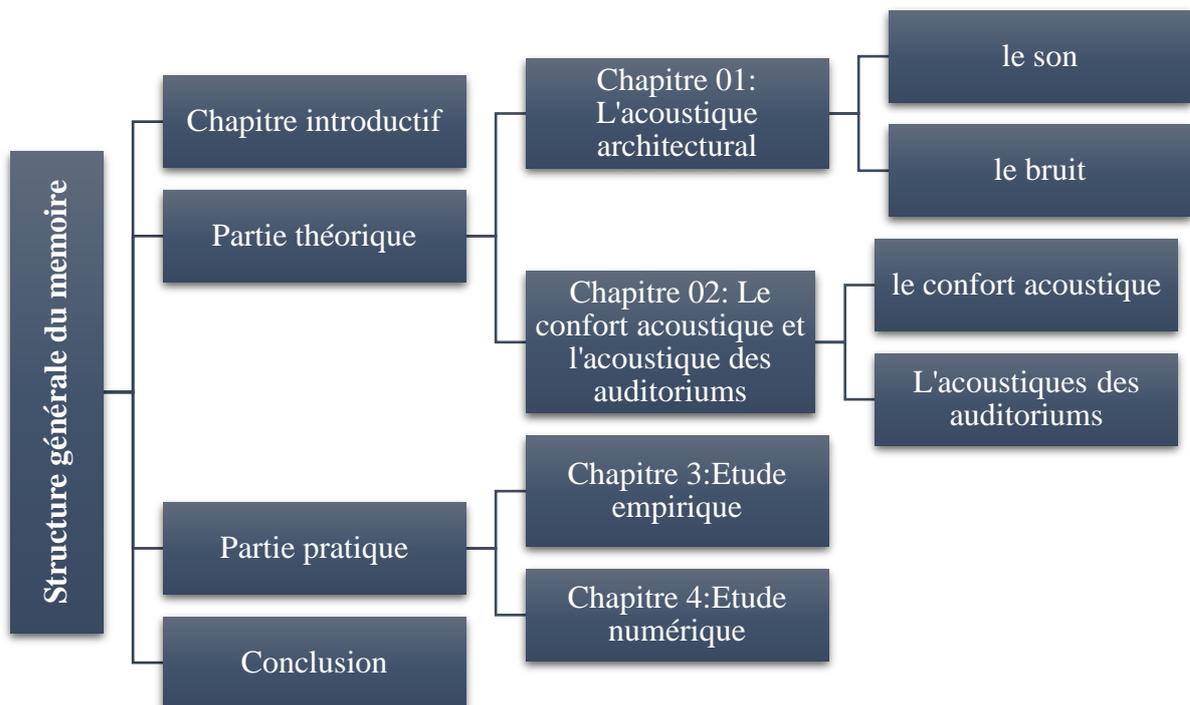


Figure 2: Structure du mémoire (Source : Auteur, 2022)

PREMIÈRE PARTIE : PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I :

L'ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE

CHAPITRE I : L'ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE

Introduction

L'acoustique architecturale doit apporter une protection contre le bruit quand celui-ci est gênant ou, inversement favoriser l'écoute. Dans tous les cas, il est important de comprendre comment le son se propage dans l'espace afin de pouvoir contrôler sa trajectoire et sa réception. La propagation du son et le confort acoustique font l'objet de recherches depuis très longtemps.

Ce chapitre vise à expliquer les notions de base du son, du bruit et l'acoustique architectural afin d'intégrer les aspects acoustiques dès la conception du projet en analysant l'environnement sonore et en identifiant les sources potentielles de bruits pour privilégier des solutions passives pour limiter l'émission et la transmission des bruits par des choix architecturaux et techniques adéquats.

I.1. L'acoustique architecturale

L'acoustique est la branche de la science et de la technologie qui se consacre à l'étude des vibrations acoustiques et qui traite leur origine, leur propagation et leurs effets. Le son est issu de la vibration d'un corps dans un milieu élastique et dans un certain intervalle de fréquences sensibles à l'oreille. Par la suite, cette vibration est diffusée dans l'air ou tout autre milieu matériel sous forme d'ondes de compression et de dépression. À chaque mouvement de vibration de la source, une surpression se forme suivie d'une dépression.

Dans un milieu homogène, en prenant l'exemple de l'air ambiant, les ondes de pression et de dépression se propagent à une vitesse uniforme, nommée vitesse du son ou célérité du son (Jedidi & Soussi, 2013).

I.2. Le son

I.2.1. Définition du son

Un son est une sensation auditive qui est propagée dans tous les milieux ambiants, il est produit par une variation de la pression de l'air, et qui provoque une pression acoustique. Cette sensation est perçue par l'être humain (Rapin, 2017).

La figure I-1 présente la propagation du son dans l'air.

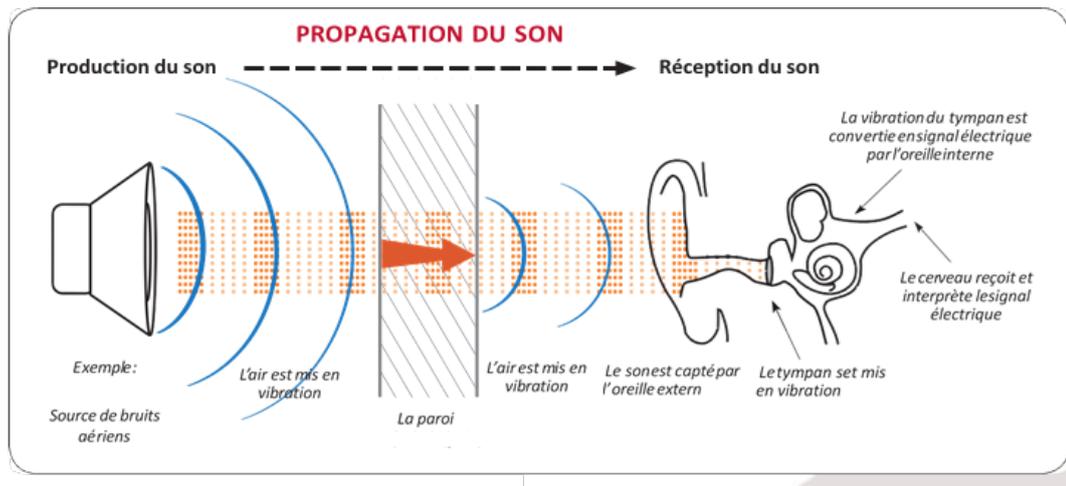


Figure I-1 : Propagation du son (Source : Lahaye et al., 2021)

Le son est produit par une source sonore dont les vibrations sont transmises à l'air ambiant (voix, musique, etc.). Il se propage d'un espace à l'autre, en passant principalement par la paroi séparant les deux (mur, plancher, vitrage, etc.).

I.2.2. Les caractéristiques d'un son

Un son est caractérisé par : sa fréquence, son niveau sonore et sa durée.

a) La fréquence du son

La fréquence d'un son est le nombre de fluctuations de la pression de l'air par seconde et s'exprime en hertz (Hz), elle est représentée dans la figure I-2 (Rapin, 2017).

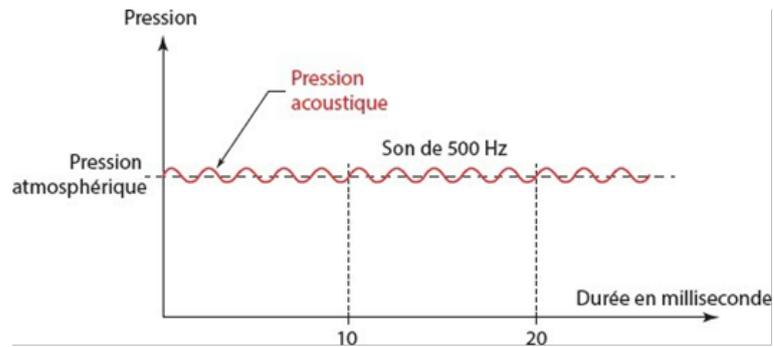


Figure I-2 : Cinq oscillations en dix millisecondes, la fréquence est de 500 Hz
(Source : Rapin, 2017)

Physiquement, le bruit est un ensemble de sons de base, avec des fréquences différentes et des niveaux variables de pression acoustique (Rapin, 2017).

Le temps entre deux fluctuations est La période T, exprimée en secondes (s).

À travers la fréquence, nous pouvons classer les sons en 3 catégories qui sont représenté dans la figure I-3 :

- ◆ Les sons graves (basse fréquence=fréquence inférieure à 100Hz) ;
- ◆ Les sons moyens (fréquence moyenne=fréquence comprise entre 100 Hz et 2 kHz) ;
- ◆ Les sons aigus (haute fréquence=fréquence supérieure à 2 kH (Recommandation pratique css05, 2008).

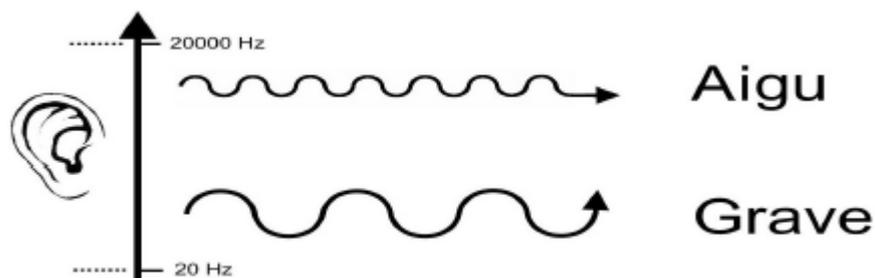


Figure I-3 : Fréquences du son (Source : Matthieu, 2016)

En acoustique du bâtiment, on considère traditionnellement un intervalle de fréquences comprises entre 100 Hz et 5 kHz.

La sensibilité de l'oreille humaine moyenne va de 20 Hz à 20kHz.

b) Le niveau sonore

Le niveau sonore ou niveau de pression acoustique (SPL : Sound Pressure Level) désigne l'amplitude du son. Il est exprimé en Pascal (Pa). L'échelle de perception de l'oreille humaine est très large, en général on utilise une échelle logarithmique pour caractériser l'amplitude du son. Cette échelle réduite est exprimée en décibels (dB), la figure I-4 représente une échelle du son en décibels (Cloud, 2015).

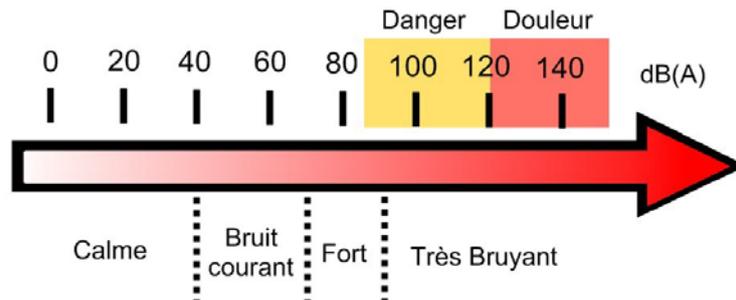


Figure I-4 : Échelle du son (Source : Matthieu, 2016)

Le niveau sonore définit l'intensité d'un son (Cloud, 2015).

c) La durée du son

Un phénomène qui se répète est qualifié de périodique à l'identique au bout d'un certain temps. La période T est exprimée en secondes (s), représenté dans la figure I-5 (Jedidi & Soussi, 2013) , elle est définie par l'expression suivante :

$$T = \frac{1}{f} (s)$$

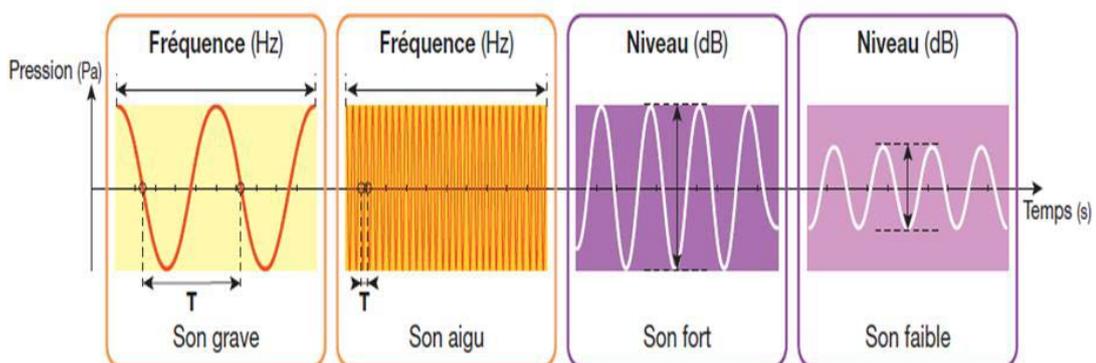


Figure I-5 : Le son en fonction de la période T et son niveau (Source : Isover, 2005)

- ◆ Quand la période est longue, le son est faible et la fréquence est basse.
- ◆ Quand la période est moyenne, le son est moyen. et la fréquence est moyenne

- ◆ Quand la période est courte, le son est aigu et la fréquence est élevée (Jedidi & Soussi, 2013).

I.2.3. La longueur d'onde

La période d'un son est déterminée à partir de sa représentation temporelle, la distance que le son a parcourue pendant cette période s'appelle par définition la longueur d'onde notée λ s'exprime en mètres. Par définition, la vitesse d'un son est la distance parcourue par unité de temps ; La distance alors parcourue par un son est donnée par la formule: vitesse x temps (Jedidi & Soussi, 2013).

$$D=V.T$$

La longueur d'onde λ d'un son est donnée par la formule suivante:

$$\lambda = C \cdot T(m)$$

λ : longueur d'onde en (m)

C : célérité du mouvement vibratoire en (m/s)

T : période du mouvement vibratoire en (s).

I.2.4. La perception du bruit et la sensibilité de l'oreille

Le seuil d'audibilité de l'oreille humaine permet de percevoir que les sons dont la fréquence est située entre 20 et 20 000 Hz. Les fréquences abordées dans le cadre de l'acoustique du bâtiment sont situées entre 100 et 5 000 Hz, la figure I-6 représente l'échelle de niveau de bruit perçu par l'oreille humaine et la figure I-7 représente la zone d'émission de la parole (Cloud, 2015).

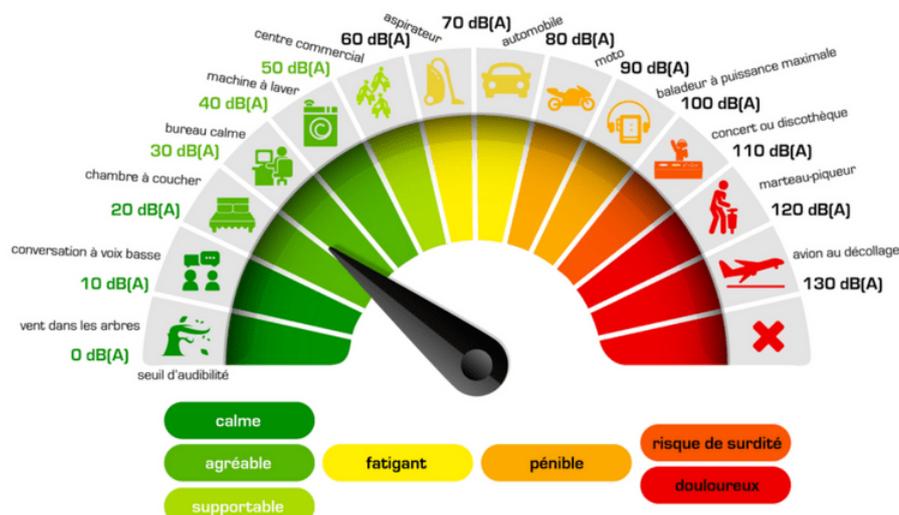


Figure I-6 : Echelle de niveau du bruit (Source : www.audilo.com)

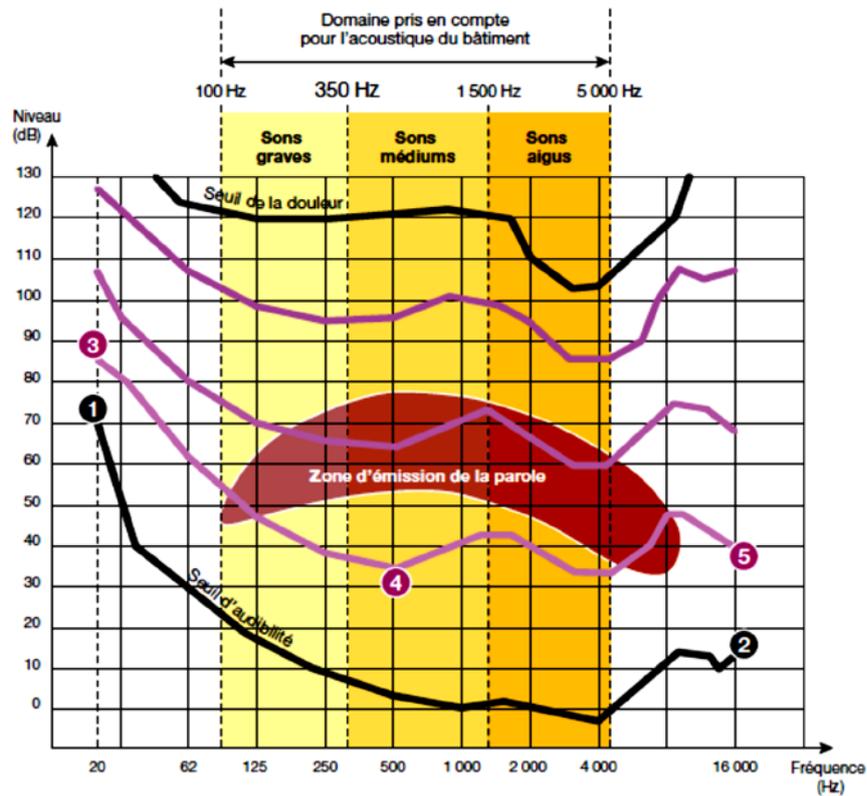


Figure I-7 : La zone d'émission de la parole (Source : Cloud, 2015)

La zone d'émission vocale est liée à un spectre acoustique réduit. Ce spectre permet d'évaluer les enjeux techniques d'une paroi à isoler, notamment la réduction des émissions sonores.

I.2.5. Mesure du son

En moins de deux décennies, les instruments acoustiques ont subi une transformation majeure et une progression sans précédent. Elle est ainsi passée d'une instrumentation analogique, électrique et mécanique spécifique à une instrumentation numérique multitâches qui utilise des circuits électroniques aux dimensions de plus en plus miniaturisées. Toutefois, tous les instruments servant aux mesures acoustiques dans l'environnement, qui sont spécifiques ou qui utilisent un micro-ordinateur, sont qualifiés de sonomètres par les normes internationales (voir figure I-8). Un sonomètre est un outil de mesure acoustique. Le mot "acoustique" désigne un "son qui se propage dans l'air". Ce terme se distingue du mot "audio", qui est très utilisé dans le domaine des mesures du son. Le terme "audio" se réfère au son qui se propage électroniquement à travers les câbles et les dispositifs audio. (Luquet & Aflato, 2005).



Figure I-8 : Sonomètre (Source: Rapin, 2017)

Le bruit est capté et mesuré à partir d'un microphone à membrane qui vibre comme un tympan et envoie un courant électrique alternatif qui varie en volts tout comme la pression acoustique. Des filtres intégrés au sonomètre lui permettent de supprimer les fréquences non entendues par l'oreille. Le filtre se rapproche du fonctionnement de l'oreille pour des niveaux sonores habituels. La mesure est alors faite en dB. Il y a des sonomètres qui sont capables de "faire la moyenne" du niveau sonore sur des périodes de temps longues (d'une heure à une journée), on parle alors de sonomètres intégrateurs (Rapin, 2017).

I.2.6. Types du son

a) Son pur

Un son pur, comme celui d'un diapason, est modélisé par une fonction appelée sinusoïde. Il est caractérisé par sa fréquence et son intensité. Le son pur est très désagréable et il n'existe pas dans notre environnement naturel, La figure suivante représente le graphique d'un son pur (Hamayon, 2014)

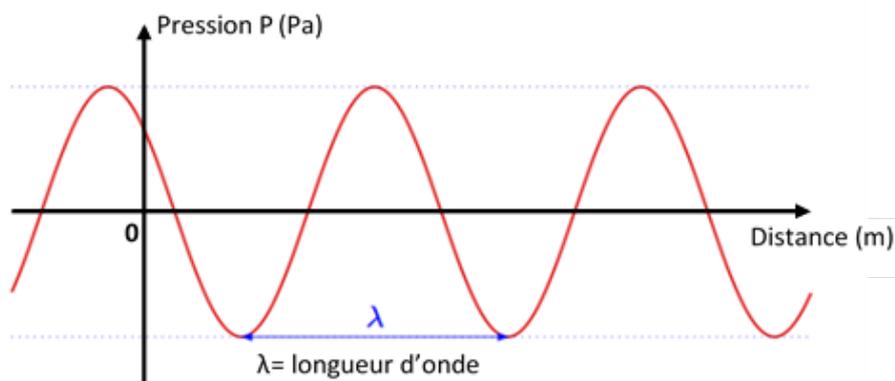


Figure I-9 : Son pur (Source : Hamayon, 2014)

La longueur d'onde λ est la distance qui sépare les états identiques de deux ondes contiguës.

La fréquence d'un son f (exprimée en Hz), la célérité du son c (en m/s) et la longueur d'onde λ (en m) sont liées par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Ainsi, la célérité du son dans l'air étant de l'ordre de 340 m/s à 15°C et la plage des fréquences audibles étant comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz, la longueur d'onde peut varier, dans cette plage de fréquences audibles, entre 17 m et 17 mm (Hamayon, 2014).

b) Son complexe

C'est un son périodique obtenu par superposition de plusieurs fréquences ou plusieurs sons purs qui est représenté dans le graphique suivant (Hamayon, 2014).

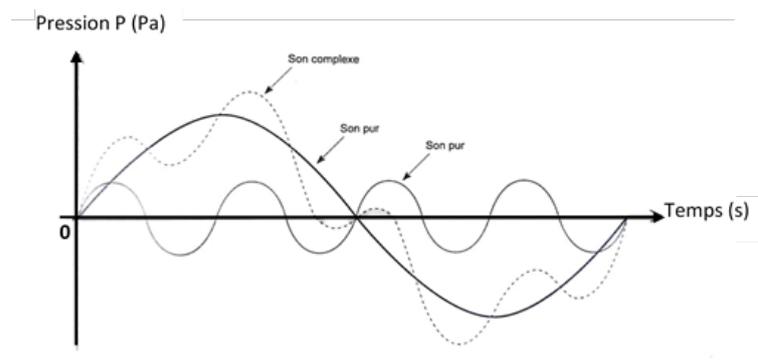


Figure I-10 : Son complexe (Source : Hamayon, 2014)

Ainsi les sons complexes sont des sons naturels, composant de plusieurs sons pouvant être séparés lors d'une analyse spectrale.

c) Son confus

C'est un son mixte sans périodicité précise, comme le bruissement des feuilles d'un arbre la figure suivant représente le graphique d'un son confus (Hamayon, 2014).

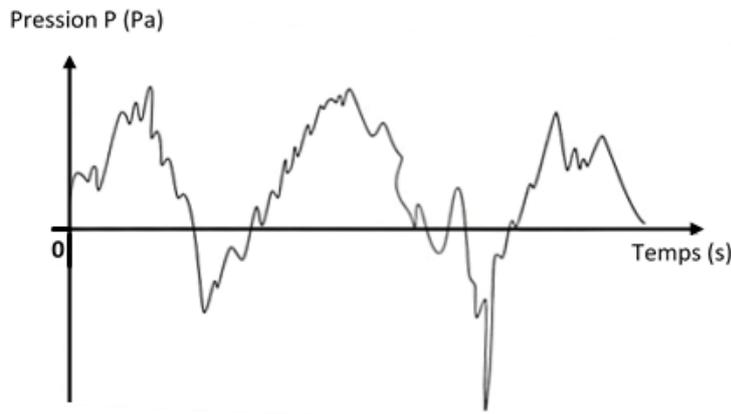


Figure I-11 : Son confus (Source : Hamayon, 2014)

I.2.7. Propagation du son dans un espace libre

Les vibrations acoustiques se propagent progressivement avec une vitesse « célérité du son » approximative à 340 m/s dans l'air (voir figure I-12), ce qui est bien supérieur à la vitesse de vibration. Elle augmente légèrement avec la température (Rapin, 2017).

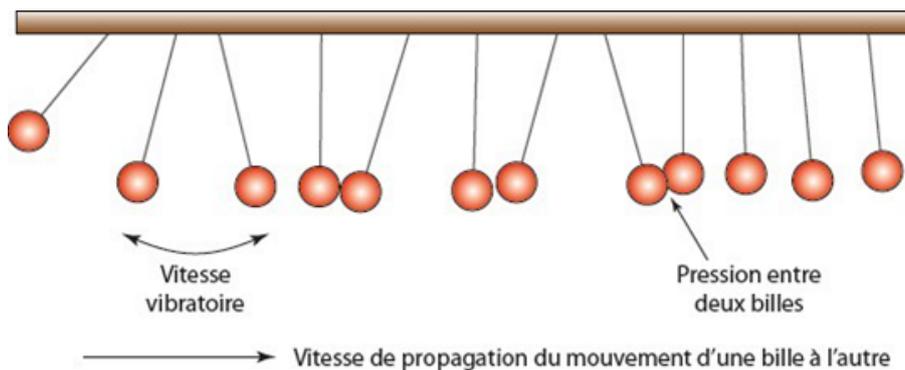


Figure I-12 : Différence entre vitesse de propagation et vitesse vibratoire
(Source : Rapin, 2017)

Lorsque le premier pendule est lancé, sa bille rencontre le deuxième pendule, qui commence à osciller et transmet son mouvement au pendule suivant. Lors de l'impact, l'énergie cinétique est transférée à la bille suivante. La vitesse à laquelle le mouvement se propage d'une bille à l'autre est différente de la vitesse que prend la bille lors de son oscillation. Il en va de même pour le son, qui peut être représenté comme le mouvement d'innombrables billes qui entrent en collision alors qu'elles tendent à revenir à leur position initiale (Rapin, 2017).

I.2.8. Propagation du son dans un espace clos

Le son peut être considéré comme une simple perturbation d'un milieu, fluide ou solide. Mais cette description ne renseigne pas sur les caractéristiques de cette perturbation et de sa propagation. Ainsi, en acoustique le concept de l'onde de pression acoustique est considéré comme le mieux adapté pour décrire les phénomènes liés à l'émission et la propagation du son. Par conséquent, l'acoustique d'une salle fait référence aux phénomènes liés à la propagation des ondes de pression acoustiques dans l'air, et de leurs interactions avec les limites de la pièce, donnant une distribution de pression acoustique spécifique, la figure I-13 et la figure I-14 représentent la propagation du son à l'intérieur d'un espace clos (Gramez.A, 2019).

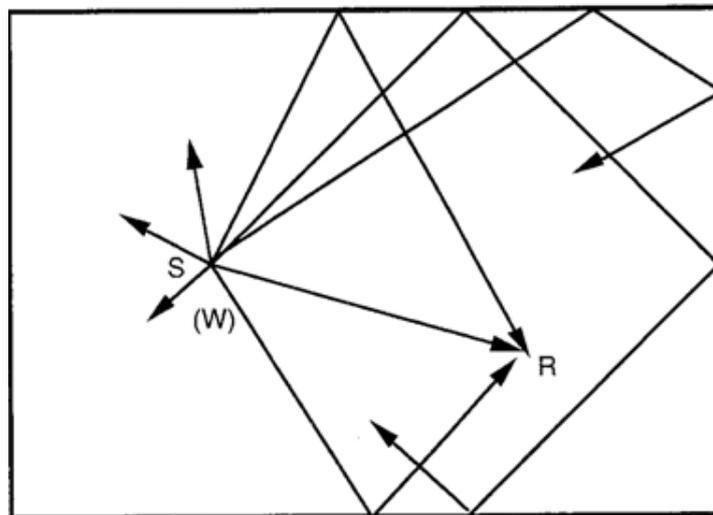


Figure I-13 : Réflexion en espace clos (Source : Jedidi & Soussi ,2013)

Lorsqu'une source sonore S de puissance W est disposée vers un point d'observation R à l'intérieur d'un espace clos en plus de l'énergie rayonnée directement, s'ajoute une énergie réfléchiée une ou plusieurs fois par les parois (Jedidi & Soussi, 2013).

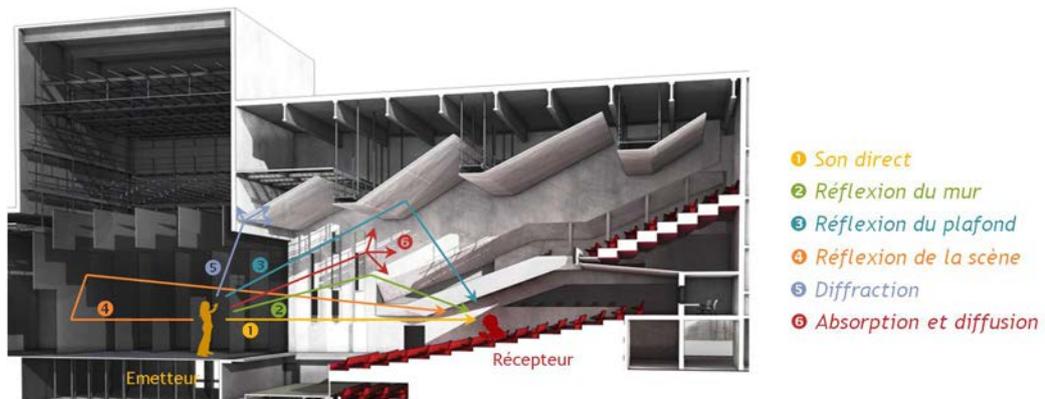


Figure I-14 : Propagation du son dans un espace clos

(Source : De Sa & Horsin Molinaro, 2017)

L'acoustique des salles est la discipline des phénomènes liés à la propagation des ondes sonores dans les espaces clos. L'ambiance acoustique ressentie dans ces lieux est liée aux conditions de propagation des ondes sonores et à leur interaction avec les différents éléments de l'espace clos (murs, revêtements, plafonds, sols, etc.). Pour l'acoustique d'un lieu donné dans un espace clos, les impressions produites sont également liées à d'autres effets psychologique et psycho acoustiques (Gramez.A, 2019).

I.3. Le bruit

Le bruit c'est une partie essentielle de notre vie quotidienne et de notre environnement. Si on est exposée à une faible quantité de bruit qui est considérée comme étant dans la norme, dans certaines situations, une exposition excessive ou prolongée au bruit peut avoir des conséquences néfastes sur la santé le figure suivant représente l'échelle sonore en décibels de l'exposition au bruit (Recommandation pratique css05, 2008).

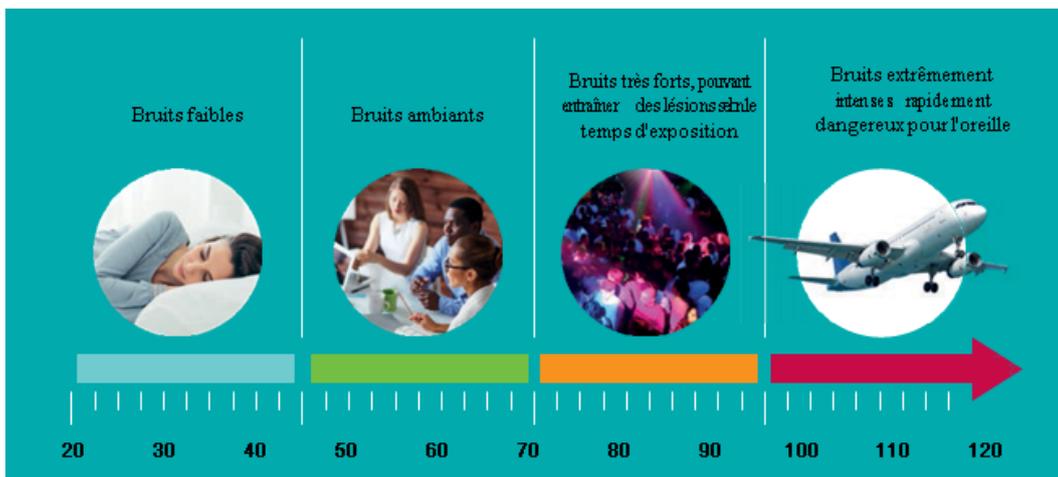


Figure I-15 : Échelle de niveau de bruit (Source: Association Qualitel, 2018)

En acoustique, le bruit est constitué par l'ensemble des sons qui surviennent en même temps. On parle de bruit lorsqu'il résulte d'une combinaison de sons complexes non harmoniques. On parle du bruit d'un moteur, du bruit de la route, la notion de bruit est souvent associée à une notion de gêne (toute sensation désagréable et gênante), il s'agit d'un "ensemble de sons sans harmonie". Et il comporte de multiples fréquences à des niveaux différents. en fonction de ces fréquence la sensibilité de l'oreille humaine varie (Lahaye, et al., 2021)

I.3.1. Sources et types de bruit

Dans le domaine de l'acoustique du bâtiment il a été identifié trois sources de bruit qui sont représentées dans la figure I-16:

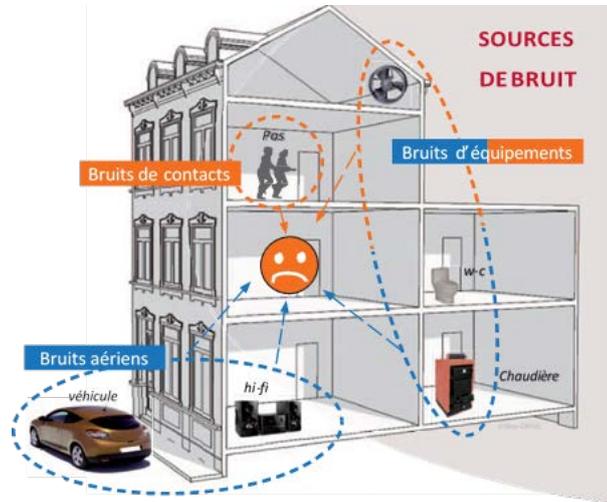


Figure I-16 : Source de bruit (Source : Lahaye et al., 2021)

a) Les bruits aériens

Les bruits aériens se propagent dans l'air ambiant. On en distingue deux catégories, la figure I-17 représente le bruit aérien et différentes méthodes de transmission :

- ◆ Les bruits aériens extérieurs ou bruit routier (trafic routier, ferroviaire ou aérien).
- ◆ Les bruits aériens intérieurs (conversation, télévision, musique, radio etc.) (Lahaye, et al., 2021).

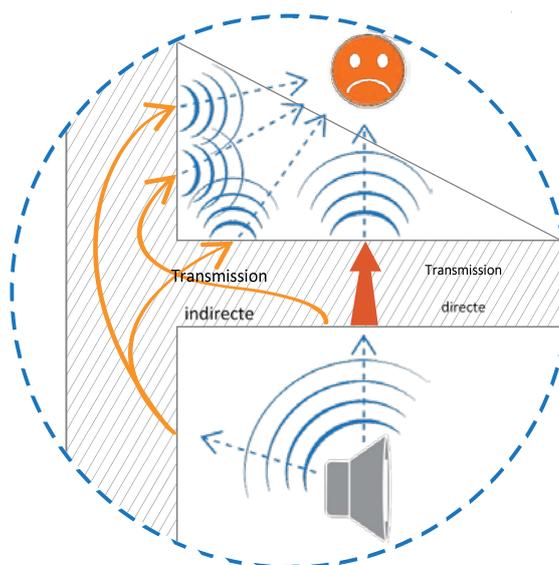


Figure I-17 : Les bruits aériens (Source : Lahaye et al., 2021)

b) Bruit solidiens ou bruit d'impact

Les bruits solidiens (bruits d'impact ou de choc) sont transmis par la vibration des parois et des structures. Ils correspondent aux bruits de pas, aux déplacements de meubles, aux chutes d'objets...etc., la figure I-18 représente le bruit solidiens avec les méthodes de transmission (Lahaye et al., 2021).

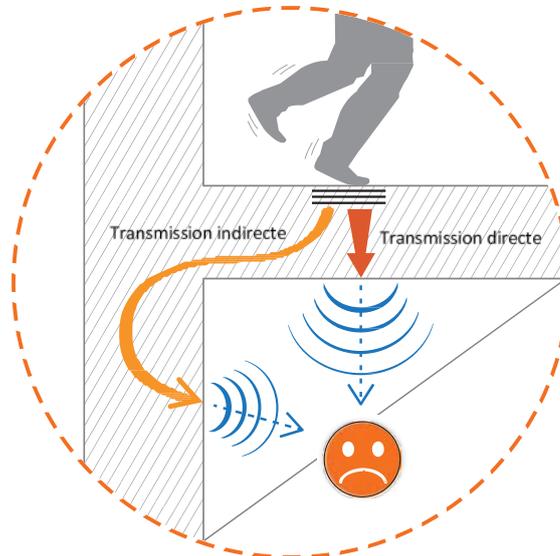


Figure I-18 : Le bruit solidiens (Source : Lahaye et al., 2021)

c) Bruit des équipements

Par l'air ambiant et par les vibrations (des parois, des équipements, etc.) à la fois les bruits d'équipements se propagent. ces bruits correspondent aux ascenseurs, aux gaines de ventilation, aux réseaux hydrauliques,...etc. , la figure I-18 représente le bruit des équipements présents dans le bâtiment (Lahaye et al., 2021).

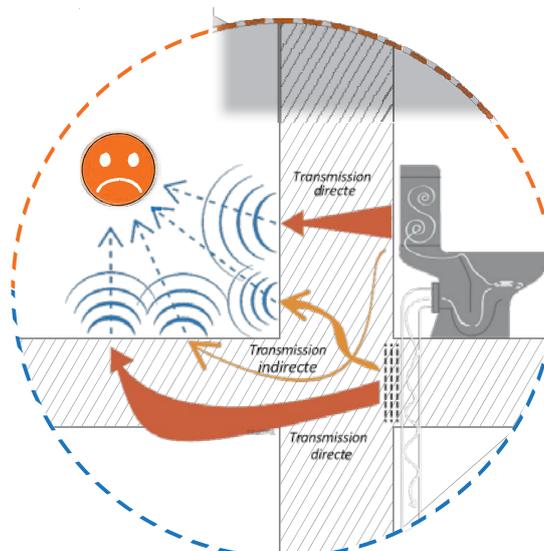


Figure I-19 : Le bruit des équipements (Source : Lahaye et al., 2021)

I.3.2. La propagation des bruits

La propagation du bruit se produit généralement suivant l'un ou plus des trois modes de propagation représenté dans la figure suivante et qu'ils sont :

a) Par diffusion

Dans un milieu libre, il y a une dispersion de l'énergie acoustique, le niveau de bruit se réduit avec la distance. La diminution spatiale du bruit aérien peut être évaluée en fonction de la source de bruit.

b) Par réflexion et absorption sur un obstacle

On constate dans ce cas un phénomène de réverbération d'une partie des vibrations sur les parois et sur les obstacles atteints.

c) Par transmission de la vibration aux matériaux

Le bruit se transmet par les éléments solides (parois, structures, etc.) (Recommandation pratique css05, 2008).

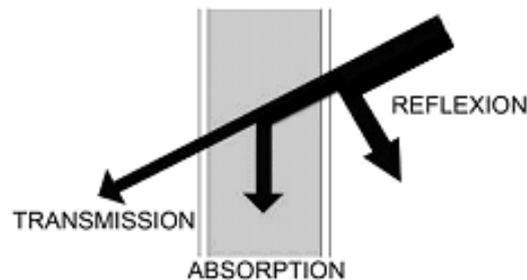


Figure I-20 : Les modes de propagation du bruit (Source : recommandation,2008)

Trois phénomènes peuvent se produire, la réflexion sur la paroi, l'absorption par la paroi et la transmission au travers de la paroi. Lorsqu'un son aérien atteint une paroi (verticale ou horizontale).

I.3.3. Les chemins de transmissions

Il y a 3 modes de transmissions :

- ◆ Transmissions directes: par des parois séparatives (mur, plancher, plafond, cloison, fenêtre).
- ◆ Transmissions latérales (indirecte): par les parois non séparatives.

- ◆ Transmissions parasites : par les imperfections localisées (boîtiers électriques...) et défauts d'étanchéité à l'air (Recommandation pratique css05, 2008).

I.3.4. Types de bruits en présence dans le bâtiment

C'est une variation de la pression acoustique. Le mot "bruit" peut avoir deux sens selon le contexte :

Une nuisance, son désagréable ou gênant, performance sonore indésirable. Ainsi, l'aboiement joyeux d'un chien, considéré comme un son agréable par son maître, peut être rejeté par certains voisins et considéré par eux comme du « bruit » ;

Toute prestation sonore, désagréable ou non. Étymologiquement, le mot "bruit" est apparu au XIIe siècle à partir du verbe « bruire » (du latin rugirer, « rugir », et bragerer, « braire »). Aussi, en langage clair, le terme ne signifie pas toujours gêne ou nuisance. Comme "La voix de la mer" ?

La plupart des bruits sont des sons chaotiques. On distingue différents types de bruit : le bruit continu, le bruit intermittent, le bruit à caractère impulsionnel et le bruit à tonalité marquée (Hamayon, 2014).

a) Bruit continu

Il s'agit d'un bruit qui est émis en continu, comme le bruit d'un VMC, d'un compresseur ou d'une pompe, le graphique suivant représente un bruit continu (Hamayon, 2014).

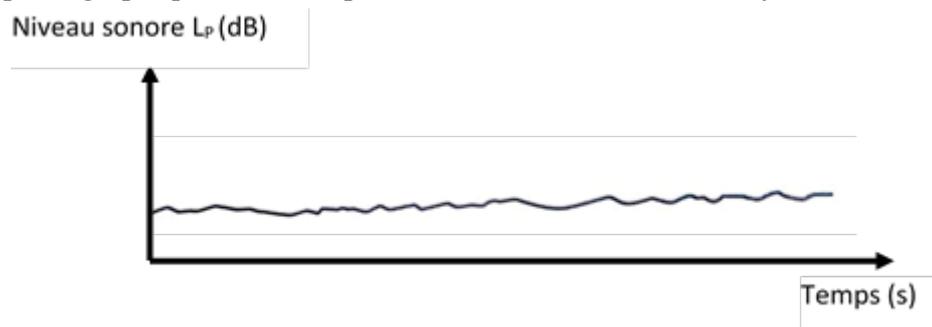


Figure I-21 : Bruit continu (Source: Hamayon, 2014)

b) Bruit intermittent

Il s'agit d'un bruit discret qui se produit moins de 50 % du temps. Dans les immeubles, ces bruits sont surtout des bruits de toilettes ou d'ascenseurs, le graphique suivant représente un bruit intermittent (Hamayon, 2014).



Figure I-22: Bruit intermittent (Source: Hamayon, 2014)

c) Bruit à caractère impulsionnel

Il s'agit d'un bruit constitué d'une ou plusieurs impulsions d'énergie acoustique, chaque impulsion d'une durée inférieure à environ une seconde, séparées par des intervalles de temps supérieurs à 0,2 seconde. Ainsi, la fermeture des portes, les coups de bélier, le martèlement du métal, les explosions, les pétards et les coups de feu de toutes sortes font tous partie du bruit impulsif, le graphique suivant représente un bruit à caractère impulsionnel (Hamayon, 2014).



Figure I-23 : Bruit à caractère impulsionnel (Source : Hamayon, 2014)

d) Bruit à tonalité marquée

Le contenu tonal de ce bruit peut être identifié directement à l'oreille (oiseaux, moustiques, sifflet de l'arbitre) ou par analyse fréquentielle (Hamayon, 2014).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de définir l'acoustique architecturale en clarifiant tout d'abord les notions de base du son pour savoir comment orienter ou ralentir ce mouvement d'énergie pour l'harmoniser avec l'objectif d'un espace sachant que les caractéristiques d'une pièce influencent la façon dont les vibrations sonores se propagent dans l'espace et affectent les personnes qui l'utilisent. Étant donné qu'il y a tellement de variables qui puissent affecter la façon dont le son se propage dans un espace, il y a plusieurs défis à considérer et à résoudre lors de la conception d'un projet. Ensuite, nous avons abordé les notions de base du bruit car il

est essentiel de ne pas négliger l'effet du bruit ambiant sur l'acoustique d'un bâtiment. Certains éléments tels que la circulation des véhicules, le trafic piétonnier et d'autres bruits à l'extérieur du bâtiment peuvent également influencer sur le niveau sonore et la qualité acoustique d'un bâtiment ; Dans les auditoriums, il est donc essentiel de prendre en compte le profil sonore de la salle de conférence et des pièces adjacentes. Il convient de garantir une confidentialité maximale dans la salle de conférence et de prendre des mesures supplémentaires pour éviter que les bruits extérieurs ne soient transmis aux autres pièces.

CHAPITRE II :
LE CONFORT ACOUSTIQUE ET L'ACOUSTIQUE DES
AUDITORIUMS

CHAPITRE II : LE CONFORT ACOUSTIQUE ET L'ACOUSTIQUE DES AUDITORIUMS

Introduction

De nos jours et avec l'évolution technologique ; malheureusement tous les maîtres d'ouvrages veulent que l'acoustique du futur bâtiment soit réussie mais très peu d'entre eux s'offrent réellement les moyens d'y parvenir, notamment en prenant cela en compte dès la conception du projet et à travers l'introduction de l'homme du métier, l'acousticien. Malheureusement c'est lui le dernier intervenant alors son intervention est réduite à l'isolation, la correction et la négation du bruit parasite alors qu'il peut offrir mieux. La qualité acoustique d'un espace peut qualifier ou disqualifier ce dernier.

L'équilibre psychologique et la performance au travail des occupants y sont intimement liés. Un bon confort acoustique a une influence directe sur la qualité de la vie quotidienne et sur les relations entre les occupants d'un bâtiment, les usagers peuvent profiter de la vie, étudier, travailler, dormir, jouer des instruments, écouter de la musique, communiquer, faire de l'exercice, sans être gênés par le bruit environnant et sans déranger le voisinage, cela est un formidable défi que les architectes doivent relever en prenant en considération la présence sonore et la dimension acoustique dès la conception de leur projet (Hamayon, 2014).

II.1. Le Confort Acoustique

Le confort acoustique est une sensation subjective qui relève de la perception de chaque utilisateur. Cette perception sera conditionnée par divers facteurs. Un même bruit peut être ressenti par un individu comme une gêne sonore en raison de sa durée d'exposition à ce dernier, de son occurrence pendant une période de sommeil ou de la mémoire attachée à ce bruit, Le confort acoustique est souvent négligé aux espaces intérieurs. Pourtant il influe sur l'équilibre psychologique et la performance au travail des occupants, Un bon confort acoustique a une influence directe sur la qualité de la vie quotidienne et sur les relations entre les occupants d'un bâtiment, à l'inverse, un mauvais confort acoustique a des conséquences négatives sur la santé (la nervosité, le stress, le sommeil perturbé, la fatigue) (Recommandation pratique css05, 2008).

II.1.1. La notion du confort acoustique

L'acoustique architecturale doit améliorer l'écoute ou au contraire prévenir le bruit lorsqu'il est source de gêne. Quoi qu'il en soit, comprendre comment le son se propage est nécessaire de dans l'espace afin de contrôler son cheminement et sa réception.

L'intérêt porté par l'homme a la propagation du son remonte à la nuit des temps, Les premières recherches relatives au phénomènes sonores remontent à l'Antiquité, lorsque l'école pythagoricienne s'est penchée sur le fonctionnement des cordes vibrantes et a construit une échelle musicale. Par la suite, des observations et des réflexions visant à découvrir la nature du phénomène sonore ont eu lieu pendant plusieurs siècles, des architecte, tel Vitruve, réfléchissaient au cheminement du son dans les théâtres, puis vient l'époque de l'enseignement scientifique de l'acoustique qui occupait une place importante c'est au moyen Age, elle faisait partie du quadrivium avec l'arithmétique, la géométrie et l'astronomie mais elle ne connaît pas d'avancées majeures. Au XVII siècle, les bases de l'acoustique ont été reprises par des chercheurs tel que Galilée, là ou Pythagore les avait laissées. Mais ce n'est que dans la seconde moitié du XIXe siècle que des progrès significatifs ont été réalisés grâce à lord Raleigh, prix Nobel de physique, auteur de Theory of Sound, et à Hermann von Helmholtz, le théoricien des résonateurs. Depuis cette époque, la maîtrise des sons et bruits s'est améliorée presque aussi vite qu'ont augmenté les nuisances dues au bruit (Hamayon, 2014).

II.1.2. L'isolement acoustique

a) Isolement brut entre locaux

Quand un bruit est émis par une source dans un local, appelé « local émission », les ondes acoustiques percutent les murs qui sont mis en vibration et deviennent une source de bruit dans le local voisin, appelé « local réception », représenté dans la figure II-1. La différence en dB entre le niveau de pression acoustique $Lp(e)$ délivré par le local d'émission et le niveau de pression acoustique $Lp(r)$ dans le local de réception est l'isolement brut entre locaux, noté D.

$$D = Lp(e) - Lp(r)$$

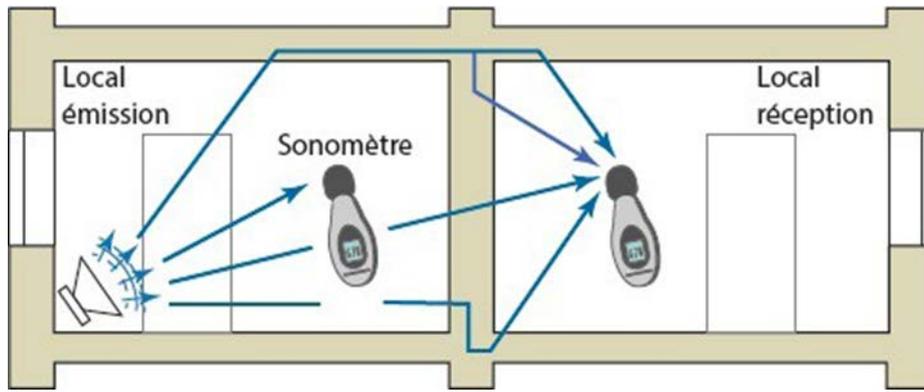


Figure II-1 : Mesure de l'isolement entre deux locaux (Source : Rapin, 2017)

Le contrôle de l'isolement acoustique est effectuée sur six octaves, de 125 à 4 000 Hz, pour vérifier le bruit rose émis. Par exemple, pour l'octave de 500 Hz : $D_{500} = L_{p500}(e) - L_{p500}(r)$ (Rapin, 2017).

b) Isolement brut pondéré entre locaux

L'isolement pondéré est représenté par une seule valeur dB, c'est la différence entre les niveaux dB(A) d'émission et de réception quand le niveau d'émission est un bruit rose. Le terme pondéré veut dire que le bruit d'émission et de réception est pondéré (A).

$$DA = L_{pA}(e) - L_{pA}(r)$$

En pratique il est difficile de produire un bruit rose parfait dans toutes les octaves simultanément ainsi le calculé ce fait à partir de mesures par octave (Rapin, 2017).

c) Isolement standardisé pondéré entre locaux

Les parois du local de réception transmettent la puissance acoustique. Ainsi, le niveau de pression acoustique dans la pièce dépend de sa durée de réverbération et de son volume. Les temps de réverbération varient selon les meubles et le contrôle acoustique se fait dans la plupart des cas dans des pièces vides. La réglementation acoustique présume que le temps de réverbération T du local de réception est égal à 0,5 seconde (durée normalisée) dans toutes les octaves. Il faut donc mesurer le temps de réverbération pour chaque octave et corriger les valeurs $L_{p}(r)$ pour les ramener à un temps de réverbération de 0,5 s.

$$D_{nT,A} = L_{pA}(e) - L_{pA}(r) + C(T/0,5)$$

L'isolement $D_{nT,A}$ est exprimé : dB et $C(T/0.5)$ est la correction de réverbération., Cette correction n'est effectuée que lorsque la valeur d'isolement brut pondérée met en doute la conformité, dans la pratique du contrôle d'isolement. Comme précédemment, $D_{nT,A}$ est

calculé à partir de l'isolement brut par octave, La correction $C(T/0,5)$ à apporter aux valeurs de $L_p(r)$ par octave, en fonction de la durée de réverbération, est donnée par le graphique suivant (Rapin, 2017).

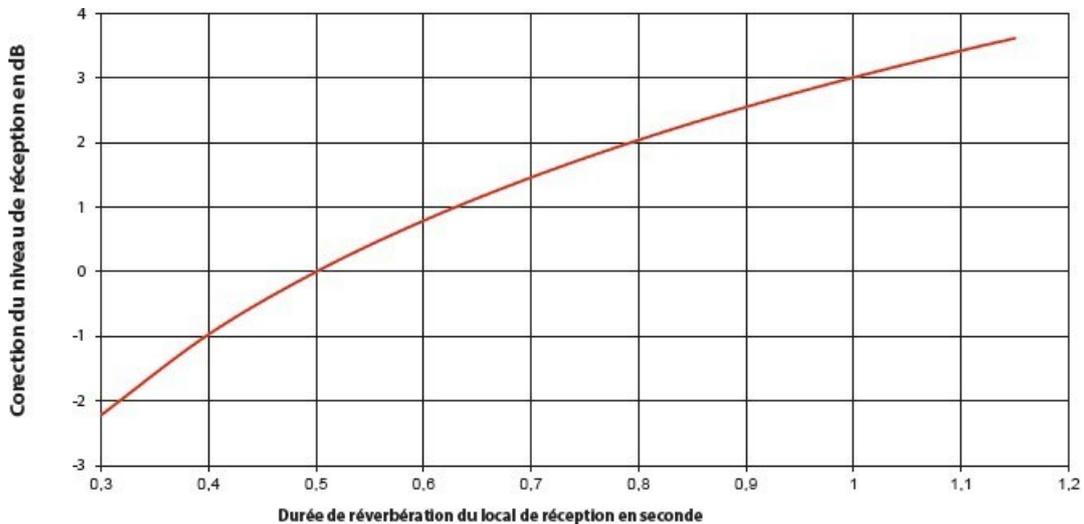


Figure II-2 : Correction du niveau de pression acoustique dans le local de réception en fonction de la durée de réverbération (Source : Rapin, 2017)

L'indicateur unique représenté par la valeur à 500 Hz, exprimée en décibels, de la courbe de référence, appliquée à l'isolement acoustique normalisé D_nT , est défini comme étant la différence entre les niveaux de pression acoustique générés par une source dans un des locaux affectés par la durée de réverbération T dans le local récepteur apportée à une durée de réverbération de référence T_0 .

II.1.3. Principe de L'isolation acoustique

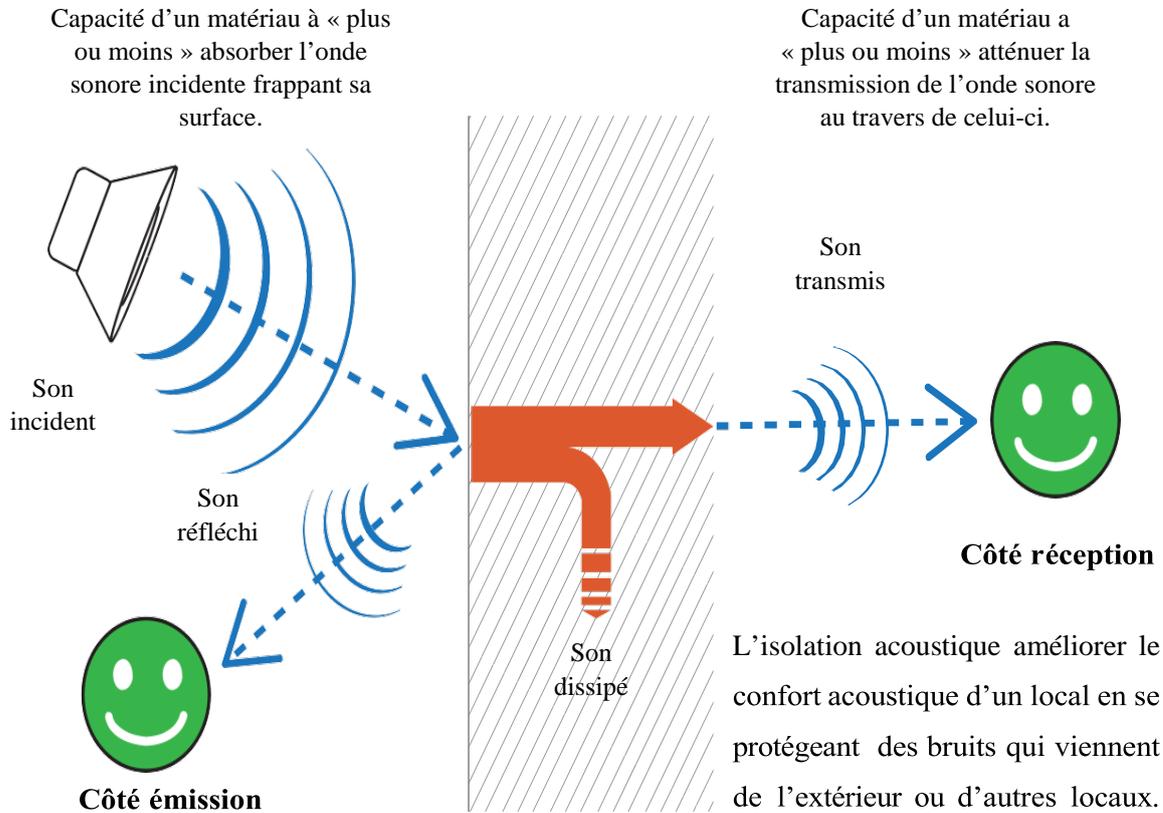
L'isolation acoustique a pour objectif de se protéger des bruits provenant de l'extérieur du bâtiment en question. Elle regroupe l'ensemble des techniques visant à réduire la transmission du bruit :

- ◆ De l'extérieur vers l'intérieur;
- ◆ De l'intérieur vers l'extérieur ;
- ◆ Entre deux ou plusieurs locaux d'un même bâtiment.

La source sonore est systématiquement extérieure au bâtiment à protéger. Lorsqu'on réalise des solutions pour limiter la transmission du bruit à travers les parois on évoque l'isolation acoustique, en intervenant sur la structure même de ces dernières mais il ne faut pas

mélanger entre l'isolation acoustique et absorption acoustique la figure suivant illustre la différences entre les deux (Lahaye et al., 2021).

ABSORPTION ACOUSTIQUE ... VERSUS ... ISOLATION ACOUSTIQUE



L'absorption (correction) acoustique améliorer le confort acoustique d'un local en évitant une réverbération excessive. Il existe des matériaux absorbants acoustiques, par exemples : les mousses synthétiques à cellules ouvertes et les laines de verre, de roche, de bois, de chanvre, de lin...

L'isolation acoustique améliorer le confort acoustique d'un local en se protégeant des bruits qui viennent de l'extérieur ou d'autres locaux. Il n'existe pas de matériau que l'on peut qualifier d'isolant acoustique. Il faut faire appel à des systèmes, c'est-à-dire des combinaisons de plusieurs matériaux.

Figure II-3 : Absorption acoustique et l'isolation acoustique (Source : Lahaye et al., 2021)

L'absorption (correction) acoustique améliore le confort acoustique d'un local en épargnant une réverbération excessive tandis que l'isolation acoustique améliore le confort acoustique d'un local en le protégeant des bruits extérieur ou d'autres locaux.

Le principe de l'isolation acoustique est constitué de trois acteurs principaux qui sont illustrés dans la figure suivante (Rapin, 2017).

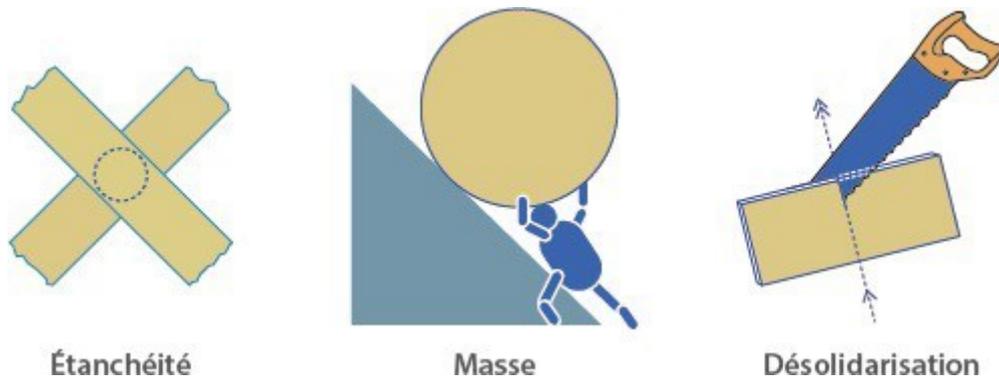


Figure II-4 : Les trois acteurs de l'isolation acoustique (Source : Rapin, 2017)

a) L'étanchéité

Les efforts d'isolation acoustique ne se cumulent pas : la performance d'isolation d'une paroi est déterminée par le point le plus faible de cette dernière. Une fissure, un trou, un passage de canalisation, un mauvais joint peuvent détruire les efforts d'isolation acoustiques de la paroi. Il faut donc assurer une étanchéité de la paroi pour diminuer les risques de fuites sonores. En effet là où passe l'air, passe le son. Une bonne isolation acoustique nécessite une bonne étanchéité (Recommandation pratique css05, 2008). L'étanchéité acoustique est destinée à prévenir l'air de transmettre le son de l'extérieur à travers une façade ou d'une pièce à l'autre.

- ◆ Murs de maçonnerie : Ce qui peut constituer le point faible est le mortier de jointoiement entre les blocs ou la porosité du béton de certains blocs creux. L'étanchéité est assurée par la pose d'un enduit assez épais (environ un centimètre) sur les deux côtés.

- ◆ Parois sèches : c'est le scellement entre panneaux qui doit être traité. La jonction avec les parois perpendiculaires est un point très sensible, car cet angle est un point de concentration de l'énergie acoustique.

- ◆ Menuiseries : C'est un point délicat ; les seuils de porte. Des joints périphériques sont indispensables pour avoir une bonne étanchéité des portes et des fenêtres.

- ◆ Ventilations et gaines : c'était le moyen de communication utilisé sur les bateaux, la transmission du son à travers les gaines est souvent nommée " effet téléphone". Les ouvertures de ventilation isolantes qui permettent de renouveler l'air sans pénétration

d'énergie acoustique sont indispensables et font l'objet des essais en laboratoire. La transmission par des courtes gaines électriques est déjà rencontrée (Rapin, 2017).

b) La masse

En appliquant la "loi de la masse", on peut dire que le matériau le plus lourd (dense et épais) est le plus isolant. Ce principe met en fait ressortir la pertinence des matériaux massifs en ce qui concerne l'acoustique architecturale. La masse est performante pour diminuer les bruits aériens, car les ondes de l'air pourront difficilement faire vibrer un matériau lourd (Recommandation pratique css05, 2008).

c) La désolidarisation

En fonction des masses des parois Cette transmission se fait: une cloison qui vibre transmet son mouvement à tous ceux qui y sont attachés de manière rigide. C'est ce qu'on appelle la "transmission latérale". Une paroi lourde peut difficilement être mise en mouvement par une paroi légère, alors que l'inverse se fait facilement. Plus la surface de la paroi qui vibre, plus le rayonnement de l'énergie acoustique est important, plus la pression acoustique transmise sera élevée. La désolidariser d'une paroi de l'autre peut se faire par une coupe, ce qui permet d'éviter tout contact rigide entre elles. Les parois légères et les parois lourdes doivent être séparées. Une coupure de scie peut être une solution pour régler un problème acoustique (Recommandation pratique css05, 2008).

La désolidarisation peut se faire en effectuant une coupe dans l'épaisseur de la paroi.; comme dans deux logements avoisinants séparés par un joint de dilatation vertical présenté dans la figure II-5 (Rapin, 2017).

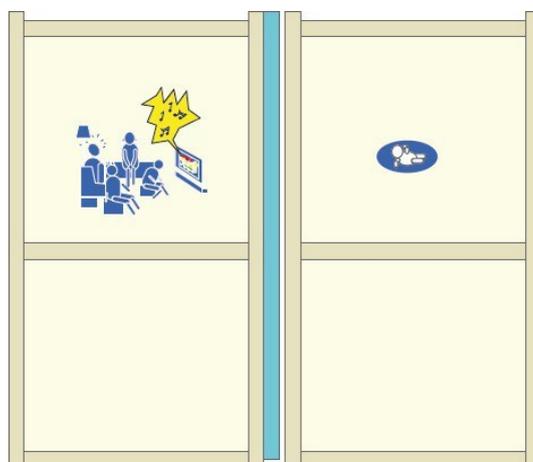


Figure II-5 : Logements séparés par un joint de dilatation (Source : Rapin, 2017)

Dans ce cas, on l'appelle un "double paroi". Cependant, attention au phénomène de résonance qui se produit dans les doubles parois et dont il faut tenir compte. La désolidarisation peut être réalisée en trois dimensions. C'est la technique de la boîte dans la boîte utilisée pour les studios, ou encore les immeubles à tiroirs où les appartements sont réalisés comme des tiroirs détachés de la structure par suspension, la figure II-6 représente la désolidarisation par la technique de la boîte dans la boîte (Rapin, 2017).



Figure II-6 : La boîte dans la boîte » pour une forte isolation

(Source : Rapin, 2017)

Le son ne se propage pas dans l'espace vide où il y a une absence totale d'air, cependant créer un vide entre deux éléments n'est pas un choix idéal pour les séparer. Car le vide parfait est inatteignable il existe dans tous les cas des forces moléculaires qui connectent les deux éléments. (Rapin, 2017).

II.1.4. La correction acoustique

La correction acoustique aborde la réponse d'un espace où se situent conjointement la source de bruit et les usagers. Elle est employée pour le traitement du confort acoustique à l'intérieur d'un espace. La correction acoustique est évoquée quand on change la capacité de réflexion et d'absorption d'une ou plusieurs parois en intervenant sur leur forme, leur relief, leur texture et les matériaux de revêtement (Recommandation pratique css05, 2008).

La correction acoustique est un outil qui permet d'assurer la qualité acoustique d'une pièce. Il peut par ailleurs être :

- ◆ Un lieu où l'écoute doit être favorisée, donc où le niveau sonore de la source doit être augmenté : auditorium, salle de spectacle, salle d'enseignement ; etc.

- ◆ Un lieu où le niveau sonore doit être réduit : les locaux industriels, ateliers, bureaux, cours, école, circulations communes ; etc.
- ◆ Un lieu acoustique spécifique, soit un lieu où le niveau sonore doit être réduit et où l'écoute à courte distance doit être favorisée : salle de sport, piscine, restaurants, etc.

Obtention d'une bonne correction acoustique est conditionnée, d'une part, par le volume et la forme du lieu et, d'autre part, par la qualité des parois qui le limitent, et notamment des matériaux qui le revêtent (Hamayon, 2013).

a) Les matériaux absorbants

Ils sont utilisés pour corriger le temps de réverbération. En tenant compte de la valeur de leur facteur α ils peuvent être choisis dans les différentes bandes de fréquences. L'indice d'absorption acoustique pondéré α_w favorise la comparaison entre les matériaux. Sa valeur est estimative « en comparant la variation de l' α en fonction de la fréquence avec une courbe modèle ». Le matériau sera sélectionné en fonction de ses performances selon le problème se situe aux hautes ou aux basses fréquences. Le constructeur impose, pour certains matériaux, une lame d'air entre le matériau et la paroi, qu'il est important de bien respecter. Lorsqu'on se renseigne sur la valeur de α d'un matériau, il est indispensable de savoir à quelle distance d'une paroi il a été testé, la figure suivante illustre Distance minimale souhaitée entre la paroi et la surface de l'absorbant pour une excellent efficacité aux différentes fréquences (Rapin, 2017).

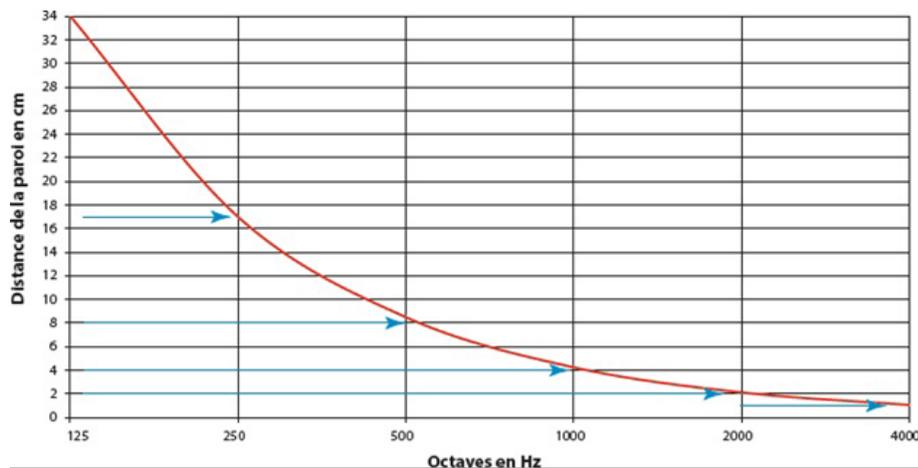


Figure II-7 :Distance minimale souhaitée entre la paroi et la surface de l'absorbant pour une bonne efficacité aux différentes fréquences (Source : Rapin, 2017)

Un élément perforé comme une feuille de métal si elle est posée devant un matériau absorbant peut améliorer son efficacité s'il a été conçu pour cela. Pour éviter le risque d'être condensé, un film étanche peut être utilisé pour protéger le matériau, mais il doit être extrêmement fin et léger et vibrer librement sans être accroché au matériau. Cependant, il y aura une faible perte d'efficacité à haute fréquence. Pour les graves fréquences, il y a des systèmes complexes absorbants qui permettent un fonctionnement sur le concept de résonateurs amortis et un gain d'épaisseur la figure suivante représente un système absorbant résonateur (Rapin, 2017).

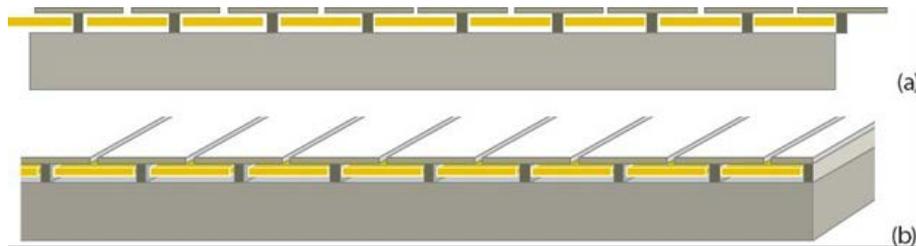


Figure II-8: Système absorbant résonateur fente : a) coupe ; b) vue perspective
(Source : Rapin, 2017)

Les principaux matériaux employés dans les dispositifs absorbants sont :

- ◆ La laine, y compris la laine minérale et certaines laine végétale ou animale, qui se différencient par leur densité, le type de fibres et leur organisation (ou cardage) et la présence d'un liant stabilisant, la figure suivante représente un exemple de la laine (Rapin, 2017).



Figure II-9 : La laine (Source : Rapin, 2017)

- ◆ Les mousses à cellules ouvertes qui se distinguent par leur densité et la taille moyenne des cellules (calibrées ou aléatoires), la figure suivante représente un exemple de la mousse à cellules ouvertes (Rapin, 2017).



Figure II- 10 : Mousse à cellules ouvertes (Source : Rapin, 2017)

- ◆ Fibres ou copeaux d'origine végétale liés par un ciment minéral ou organique ; agglomérés de grains ou agrégats d'origines diverses reliés par de la colle ou du ciment et formant une structure poreuse.

- ◆ Grains minéraux expansés en vrac (argile expansée, silice expansée, etc.).
- ◆ Des systèmes composites combinant des matériaux absorbants et des résonateurs.

Ces matériaux devront avoir une densité minimale de 20 kg/m³, pour être performants. Ces qui en une masse de l'ordre de 400 kg/m³ ou plus sont constatées dans les matériaux hautes performances. Dans la fabrication de dispositifs silencieux liés à des équipements, les matériaux absorbants sont employés. Ils sont important pour les bureaux, les ateliers, les cantines scolaires, les gymnases et les grandes salles publiques. Ils sont assujettis à des exigences de résistance au feu (Rapin, 2017).

b) Autres matériaux

❖ Les ressorts et matelas élastiques

En effet les ressorts traditionnels sont réservés à la suspension de machines en générale, mais il y a également des accessoires flexibles destinés à l'installation d'éléments tels que des poteaux flexibles conçus pour la construction de doubles cloisons et des contre-cloisons. Il convient de respecter les normes d'espacement entre les poteaux conseillés par le fabricant, la figure ci-dessous représente deux cloisons liées par des poteaux élastiques (Rapin, 2017).

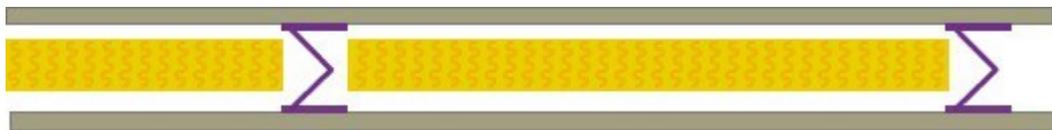


Figure II-11 : Deux cloisons liées par des poteaux élastiques (Source : Rapin, 2017)

Les fibres et les mousses peuvent créer un matelas élastique qui sert de lien entre les éléments. Mais il reste difficile de concilier la flexibilité nécessaire et la résistance mécanique, la figure suivant représente deux cloisons liées une mousse (Rapin, 2017).

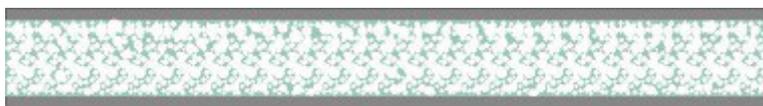


Figure II-12 : Deux cloisons liées par une mousse (Source : Rapin, 2017)

Il est souhaitable de faire recours à des mousses à cellules ouvertes, plus amortissantes, les mousses souples à cellules fermées ont des propriétés élastiques associées à des propriétés d'isolation thermique (Rapin, 2017).

❖ Les amortisseurs

Les matériaux absorbants comme les laines et les mousses à cellules ouvertes sont bien appropriés pour amortir les mouvements d'air. En utilisant des densités plus faibles que dans le cas d'une correction acoustique. Concernant les doublages et les doubles cloisons, une résistance à l'air de ces matériaux permet de diminuer la fréquence de résonance et réduit l'épaisseur totale de la paroi. (Rapin, 2017).

❖ Les fixations élastiques

IL existe de très nombreux dispositifs, même si la rondelle en caoutchouc reste l'accessoire traditionnel(Rapin, 2017).

❖ Les joints d'étanchéité

Ils sont censés être suffisamment denses pour ne pas être des points faibles en ce qui concerne l'isolation acoustique et suffisamment souples pour s'adapter aux mouvements et aux déformations de l'élément sans perte d'étanchéité (Rapin, 2017).

c) Les matériaux d'origine agricole « BIOSOURCES »

Il existe une nécessité relative à l'utilisation de matériaux issus de l'élevage et de l'agriculture en matière d'isolation acoustique, et nous débutons à obtenir des résultats d'essais pour ce type de matériaux, et le consommateur va désormais explorer des produits locaux. Des rapports d'essai acoustiques en était établi sur quelque matériaux comme la ouate de cellulose, la laine de chanvre, la laine de coton (métis), la plume de canard. Par contre, leurs caractéristiques en complexe de doublage ne sont pas toujours disponibles.

◆ Tout d'abord, des éléments d'ameublement tels que tapis, coussins, rideaux et tentures, qui peuvent être de très bons absorbeurs, la correction de la réverbération est tout à fait assurée s'ils satisfont les critères de perméabilité à l'air et s'ils sont épais.

◆ Le liège est le matériau élastique le plus ancien utilisé en tant que ressort pour les socles de machines ou autres fissure dans la structure les fixer sur un mur dans ce seul objectif est pratiquement inutile par ce qu'ils ne garantissent ni l'isolation, ni l'absorption du son.

◆ La paille, la laine animale et végétale constituent d'excellents absorbants à condition que ces produits aient subi une métamorphose qui leur confère la qualité physique souhaitée. Ces produits pourront être placés à l'intérieur d'une double paroi mais il est nécessaire d'être en mesure d'assurer leur pérennité « risque de tassement notamment » (Rapin, 2017).

II.2. Le confort acoustique des auditoriums

Une bonne qualité d'écoute est obtenue en tenant compte de l'acoustique lors de la conception de salles de conférences ou de concerts (Neufert, 2009).

L'acoustique est fondamentalement déterminée par :

- ◆ Le temps de réverbération,
- ◆ Les réflexions provenant de la structure de la salle et de ses équipements.

II.2.1. Durée de réverbération

Il indique le temps nécessaire pour que le son diminue de 60 dB après l'interruption des sources sonores, l'évaluation est faite pour la zone comprise entre moins 5 dB et moins 35 dB (mesure du temps de réverbération dans la salle d'audition) (Neufert, 2009).

Enfermés dans une pièce, les sons se lancent dans une "partie de billard" permanente, la figure suivante représente la réflexion des rayons sonores sur les parois. « Les parois sont des miroirs pour le son »

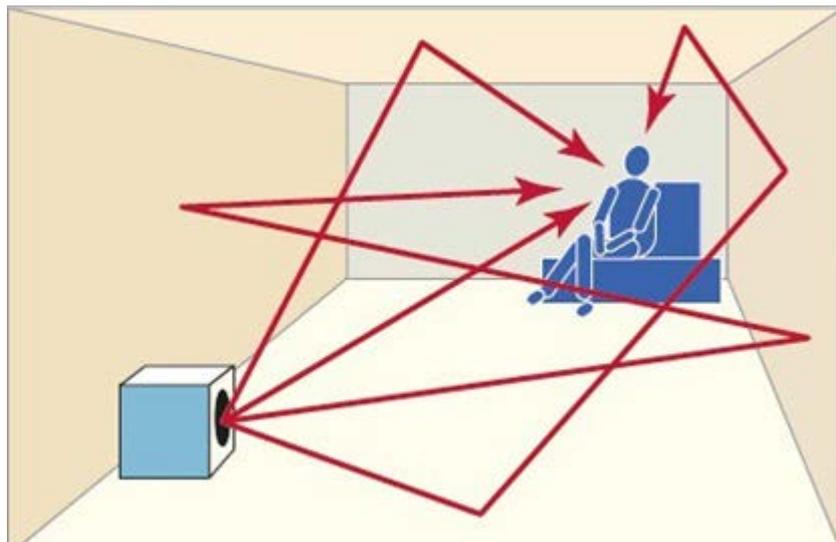


Figure II-13 : Les rayons sonores se réfléchissent à l'infini sur les murs de la salle (Source : Rapin, 2017)

En effet le son du haut-parleur nous parvient à partir des parois et du plancher, parce que notre oreille est faite pour repérer le trajet le plus court du bruit et sa source. Ainsi, les rayons du son qui ont effectué un long trajet après une centaine de réflexions parviennent tardivement et allongent la durée du bruit. Dans une salle non meublée et vous émettez un son

court après avoir fermé la porte ce dernier va prendre du temps pour s'arrêter. On appelle ça "temps de réverbération" le temps que prend un son pour diminuer de 60 dB (c'est-à-dire pour disparaître pour l'oreille), à partir du moment où son émission est arrêtée, la figure suivant la décroissance du niveau sonore après l'arrêt de la source « temps de réverbération » (Cloud, 2015).

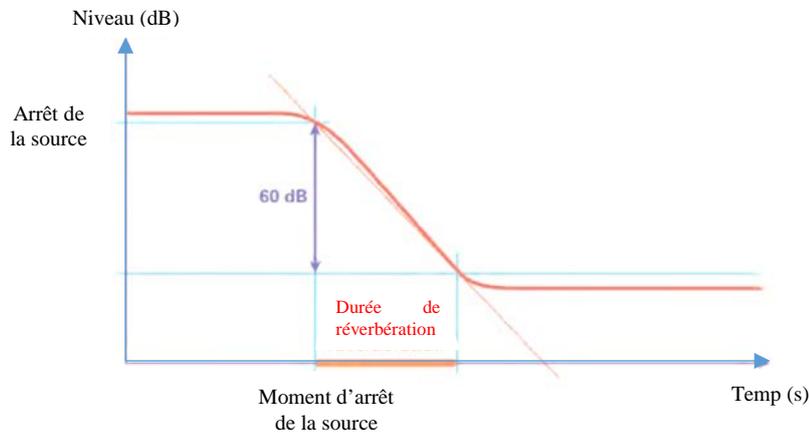


Figure II-14 :Décroissance du niveau sonore dans une salle après arrêt de la source (Source : Cloud, 2015)

Le temps de réverbération, noté T, est en fonction du V volume de la pièce et d'une surface appelée "aire d'absorption de la pièce", notée A et décrite comme suite.

Prenant pour exemple une salle vide, T de l'ordre d'une seconde, c'est-à-dire les rayons sonores auront le temps de parcourir 340 m avant de s'éteindre. T peut atteindre 2 à 3 s dans un grand volume (hall de gare, piscine couverte...ect). La formule de Sabine permet de calculer la durée de réverbération T :

$$T = 0,16 (V/A)$$

Avec : T en secondes, V en mètres cubes, A en mètres carrés.

L'aire d'absorption A est fonction du α « facteur d'absorption » des différentes surfaces présentes dans la salle (Veritas, 2015).

II.2.2. Absorption

Lorsqu'une onde sonore rencontre les murs d'une pièce :

- ◆ Une partie de l'énergie incidente est transmise de l'autre côté de la paroi, soit vers l'extérieur soit vers une pièce voisine ;
- ◆ Une autre partie est absorbée ;

- ◆ Une dernière partie est réfléchiée par la paroi.

Ce constat peut résumée par la formule :

$$E_I = E_T + E_A + E_R$$

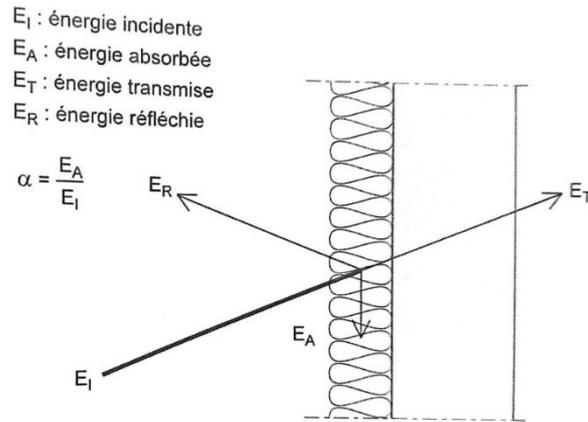


Figure II-15 : Absorption, transmission et réflexion de l'énergie acoustique (Source : Rapin, 2017)

L'énergie transmise à travers une paroi est faible, même extrêmement faible. À titre d'exemple, à des fréquences moyennes, moins de 1/1 000 000 à travers un mur en béton de 18 cm d'épaisseur et moins de 1/100 de l'énergie incidente est transmise à travers un simple vitrage (Hamayon, 2013).

II.2.3. Le facteur d'absorption

Le facteur d'absorption alpha, désigné par α , (souvent appelé "coefficient d'absorption") matérialise par la surface " absorbée " dans le matériau et la partie de l'énergie sonore qui n'est pas réfléchiée par la paroi. L'absorption de la paroi, et en notamment de son matériau de surface, est caractérisé par un facteur d'absorption (ou coefficient d'absorption) α . Il s'agit du rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie acoustique incidente, soit :

$$\alpha = \frac{E_A}{E_I}$$

Si, à une certaine fréquence, le matériau absorbe 60% de l'énergie incidente, on dit que $\alpha=0,6$. Le facteur d'absorption α est un compromis entre 0 (toute l'énergie incidente est réfléchiée) et 1 (toute l'énergie incidente est absorbée, soit le cas d'une fenêtre ouverte). En réalité, toute l'énergie incidente ne peut pas être réfléchiée, alors $0 < \alpha \leq 1$ (Hamayon, 2013).

Un matériau absorbant ne constitue pas un isolant acoustique, il est pratique pour la correction de la réverbération dans une pièce lorsque cela est indispensable (voir annexe A) (Veritas, 2015), pour être absorbant, un matériau doit être peu perméable à l'air (on en arrive à souffler dedans avec un petit effort). Pour un absorbant déterminé, le facteur d'absorption varie énormément en fonction de la fréquence (il est bien plus facile d'absorber les sons aigus que les sons graves), α se décrit le plus souvent par octave ou tiers d'octave, on peut cependant exprimer α par une valeur unique qui se rapporte à un bruit particulier : bruit rose, voix humaine, bruit de la route.

L'indice d'absorption acoustique pondéré α_w est la seule valeur moyenne défini par la normalisation européenne, dont la valeur est donnée par les fabricants (Cloud, 2015).

Le tableau suivant représente le coefficient d'absorption α de quelques matériaux:

Tableau II-1 : Le coefficient d'absorption α de quelques matériaux (Source : Wuyts, 2019)

Types de matériaux	Bandes d'octave(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Béton	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Brique	0.05	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05
Plâtre sur mur plein	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Enduit	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
Laine minérale 100kg/m³	0.27	0.62	0.88	0.93	0.81	0.76
Marbre	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Carrelage	0.01	0.05	0.09	0.01	0.01	0.01
Parquet	0.04	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07
Linoleum	0.04	0.06	0.08	0.12	0.04	0.04
Tapis plein	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37
Bois Laqué (ex porte)	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Fenêtre	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04

La réglementation de la construction ne prévoit la mise en place de matériaux absorbants dans les logements que dans les circulations courantes et estime que le temps de réverbération d'un espace " aménagé en principe " est égal à une demi-seconde (0,5 s), tapis, coussins et rideaux...etc. Jouant le rôle d'absorbants, Mais par contre, il est indispensable de corriger le temps de réverbération des locaux scolaires, bureaux, cantines, ateliers, gymnases

et salles de spectacles, a se calculé, pour une fréquence ou un bruit déterminé, par la somme des surfaces du local et leur facteur d'absorption α .

$$A = S1 \alpha1 + S2 \alpha2 + S3 \alpha3...$$

A : correspond à la surface qui permet au bruit de s'échapper, l'équivalent de la surface d'une fenêtre ouverte (Rapin, 2017).

II.2.4. La surface d'absorption

Elle détermine le temps de réverbération par la quantité de matériau absorbant exprimée comme la surface avec absorption totale (fenêtre ouverte) (Neufert, 2009).

$$A = a_s.S$$

a_s = degré d'absorption acoustique en fonction de la taille de la pièce,

S = surface primitive de référence.

Le temps de réverbération est déterminé par la relation suivante :

$$T = \frac{0.163 V}{\alpha_s \times S}$$

II.2.5. Écho

Quand la courbe du temps de réverbération indique une chute brutale, quelques pics subjectivement identifiables apparaissent, ils sont nommés échos. Pour le critère de l'écho, les valeurs de temps et d'intensité pour la musique ou pour les paroles ne sont pas identiques. Les salles prévues pour la musique requièrent un temps de réverbération plus long, ce qui réduit le risque d'écho (Neufert, 2009).

II.3. Application aux auditoriums

II.3.1. Durée de réverbération

La valeur optimale est à déterminer en fonction de l'usage de la salle et du son volume (tableau II-2). Elle est aussi en fonction de la fréquence ; elle est plus longue pour les basses fréquences, et plus courte pour les aigus. Pour $f = 500$ Hz, des études ont permis d'obtenir la valeur optimale indicative présentée à la figure II-16 (Neufert, 2009).

Tableau II-2 : Durée de la réverbération optimale dans les salles (Source : Neufert, 2009)

La fonction de la salle	Durée de la réverbération optimale	
Parole	Cabaret	0.8
	théâtre	1.0
	Exposé	1.2
Musique	Musique de chambre	1.0...1.5
	Opéra	1.3...1.6
	Concert	1.7...2.1
	orgue	2.5...3.0

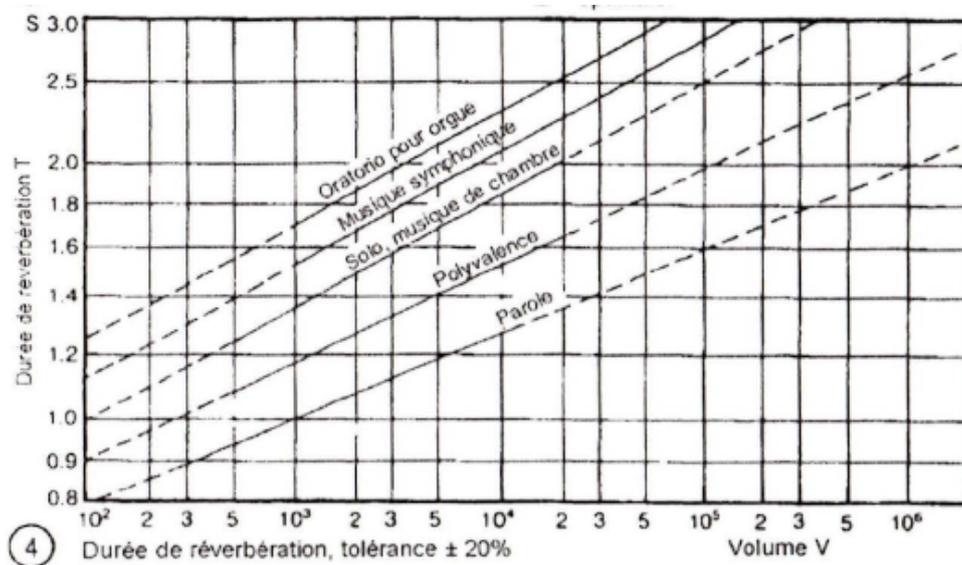


Figure II-16 : Durée de la réverbération optimale, tolérance $\pm 20\%$

(Source : Neufert, 2009)

II.3.2. Netteté phonique

Elle n'est pas normalisée, c'est pour cette raison que on emploie des termes différents tels que l'intelligibilité de la phrase, de la syllabe, l'évaluation par logatomes. Elle est destinée à déterminer l'intelligibilité de la parole. En utilisant les logatomes, la clarté phonique est qualifiée d'excellente dès 70%. Ce procédé permet d'analyser la correcte exécution par écrit de syllabes non signifiantes (logatomes) dictées à un groupe d'auditeurs. De plus récentes techniques simples (RASTI) donnent des résultats significatifs (Neufert, 2009).

II.3.3. Perception de l'espace

Sensation de réflexions de direction et de temps à partir d'un espace (volume) déterminé. Dans le cas de la musique, on préférera une réflexion diffuse propice à la musicalité, tandis que des réflexions précoces pouvant atteindre 80 ms de retard (correspondant à une différence de propagation de 27 m) par rapport au son direct améliorent la clarté (Tableau II-3). La parole requiert un retard plus faible, jusqu'à 50 ms, afin de ne pas affecter l'intelligibilité (Neufert, 2009).

Tableau II-3 : Volume spécifique $V=f(\text{art})$ (Source : Neufert, 2009)

La fonction d'utilisation	Coefficient volumique en m^3/place	Volume maximal en m^3
Salle de réunion théâtre parlé	3...5	5 000
Polyvalente parole et musique	4...7	8 000
Musique de théâtre (Opéra , Opérette)	5...8	15 000
Salle de musique de chambre	6...10	10 000
Salle de concert musique symphonique	8...12	25 000
Salle pour oratorios et musique d'orgue	10...14	30 000

II.3.4. Réflexions diffuses

Les surfaces sur lesquelles on entend des échos doivent réfléchir le son de façon diffuse, donc détruire le son incident (Figure II-17).

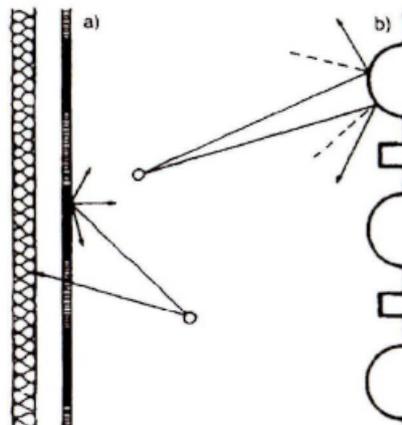


Figure II-17 : Réflexions diffuses par alternance de matériaux. b) Surface provoquant des réflexions diffuses

(Source : Neufert, 2009)

Les réflexions diffuses du son permettent, par une distribution uniforme du son, de régulariser les courbes du temps de réverbération. La structuration par plissement des surfaces requiert un angle supérieur à 5°. La structure de surface marquées, balustrade, niche, etc. sont aussi efficaces parce qu'elles fractionnent l'ondes sonores ou entraînent des réflexions différées (Figure II-18) (Neufert, 2009).

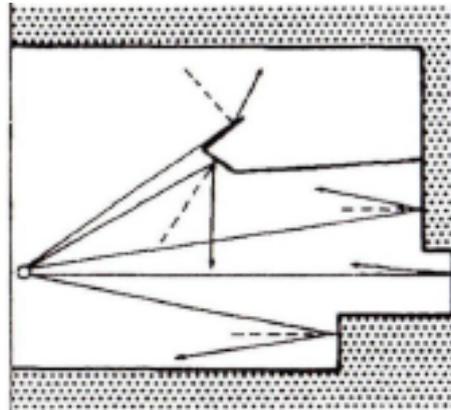


Figure II-18 : Réflexions diffuses par alternance de matériaux. b)

Surface provoquant des réflexions diffuses (Source: Neufert, 2009)

Le calcul du temps de réverbération acoustique se fait généralement à partir de la formule de Sabine :

$$T = \frac{0.163 V}{\alpha_s \times S}$$

Le coefficient d'absorption acoustique d'un matériau est calculé dans des conditions normaliser. Il est situé entre 0 et 1. Le temps de réverbération est calculé pour des fréquences de 125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz. Le temps de réverbération moyen est souvent de 500 Hz. On prend en compte dans le calcul les surfaces individuelles, individus, fauteuils, décors, avec leurs coefficients spécifiques. Très souvent, le temps de réverbération n'est atteint que par l'absorption des personnes et des fauteuils. Pour rendre le temps de réverbération indépendant de la présence des personnes, on utilise des fauteuils dont l'assise et le dos ont une très grande surface absorbante, qui sera occupée par les personnes assises. Des surfaces absorbantes additionnelles pour les hautes fréquences du son ne sont requises que si le volume spécifique est largement dépassé (Tableau II-3). Si le volume de la salle et des fauteuils est bien réglé, il suffit souvent de corriger le temps de réverbération pour les basses fréquences. Le temps de réverbération peut être corrigé par une association de surfaces ayant des propriétés distinctes, qui varient selon leur fonction de leur structure :

◆ Les surfaces co-vibrantes absorbent les basses fréquences. Leurs dimensions, distances et compositions constituent un élément important lors du réglage final (voir figure ci-dessous).

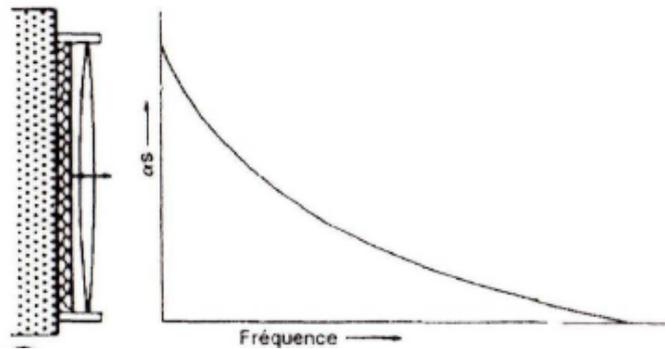


Figure II-19 : Absorption de fréquences basses par surface de co-vibrante

(Source : Neufert, 2009)

◆ Les surfaces comportant des cavités situées devant un espace creux absorbent souvent les moyennes fréquences (résonateur de Helmholtz) ; nombre de trous, volume de l'espace creux et le matériau isolant présent dans l'espace creux sont, le degré et la forme de l'absorption maximale, des facteurs qui déterminent la fréquence (voir figure ci-dessous).

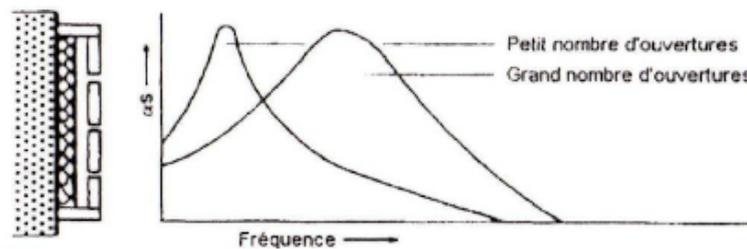


Figure II-20 : Comportement de l'absorption par cavités

(Source : Neufert, 2009)

◆ Les matériaux poreux absorbent les hautes fréquences. L'épaisseur du matériau et l'impédance acoustique influencent l'évolution au basses fréquences (voir figure ci-dessous).

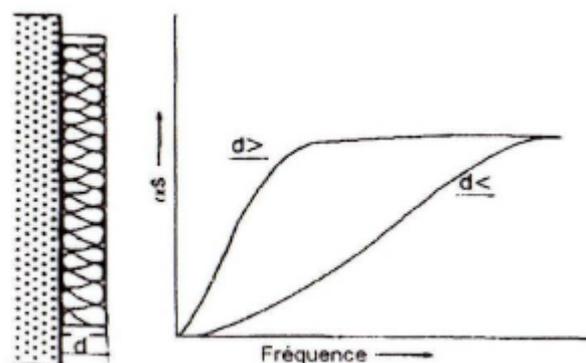


Figure II-21 : Absorption par matériaux poreux

(Source : Neufert, 2009)

II.4. Forme et géométrie

Les réflexions initiales provenant du côté sont subjectivement jugées plus agréables que celles provenant du plafond, dans le cas de la musique, même pour des temps minimes de retard, puisque les deux oreilles reçoivent des signaux différents. Une façon très facile de parvenir à une bonne acoustique consiste à construire les salles étroites et hautes avec des parois géométriquement articulés qui réfléchissent le son et des plafonds qui le diffusent (Neufert, 2009).

II.4.1. Géométrie des salles

Volume en relation avec son fonction (tableau II-3) pour :

- ◆ Parole : 4 m^3 /personne.
- ◆ Concert : 10 m^3 /personne.

Un petit volume ne peut pas donner un temps de réverbération suffisant (Neufert, 2009).

II.4.2. Forme de la salle

Dans le domaine de la musique, il est recommandé d'utiliser les salles étroites et hautes avec des murs articulés « réflexions initiales latérales ». Près des écrans, du podium réfléchissant sont requis pour les réflexions initiales précoces et pour la vérification du son de l'orchestre. Le fond de la salle ne doit pas générer de réflexions vers le podium, qui pourraient apparaître sous forme d'écho.

Il faut éviter les surfaces parallèles non articulées pour éviter les échos multiples (figure II-22).

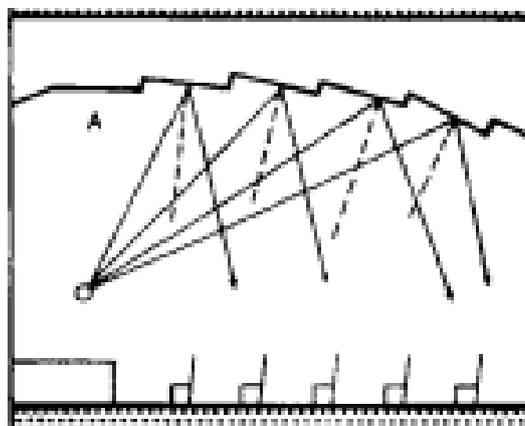


Figure II-22 : Forme de plafond inadaptée

(Source : Neufert, 2009)

Le parallélisme peut être évité avec pliage des angles supérieurs à 5° et permet d'obtenir une propagation du son. Le plafond sert à propager le son vers le fond de la salle et doit être réalisé de manière à garantir cette fonction (figure II-23).

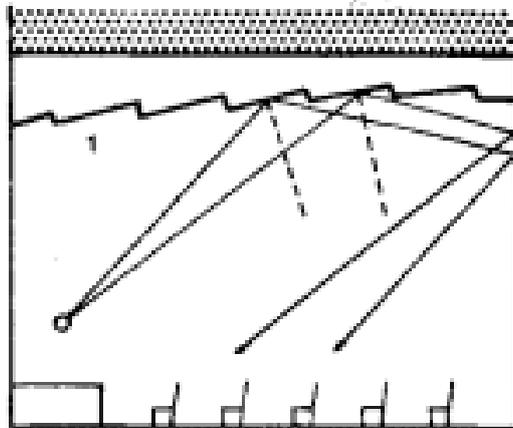


Figure II-23 : Forme inclinée du plafond

(Source : Neufert, 2009)

Dans le cas inverse, on observe des variations importantes de l'intensité sonore à cause de la concentration acoustique. Les salles dont les parois latérales divergent vers l'arrière présentent l'inconvénient de pas provoquer assez de réflexions latérales (figure II-24).

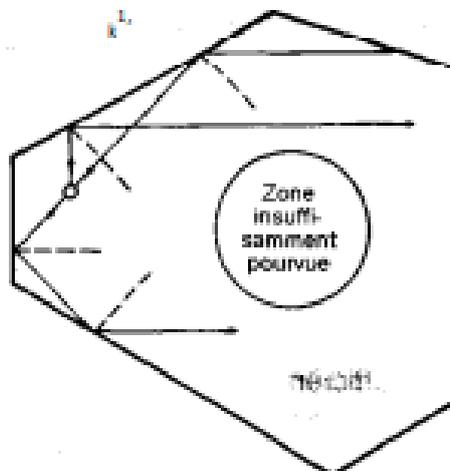


Figure II-24 : Plan peu favorable (Source : Neufert, 2009)

Comme dans le cas de la Philharmonie de Berlin et de Cologne (figure II-25), des surfaces de réflexion additionnelles peuvent y remédier, ou bien les murs reçoivent une courbure significative pour propager le son (Neufert, 2009).



Figure II-25 : Philharmonie de Berlin - Echelonnement des rangs

(Source : Neufert, 2009)

II.4.3. Disposition de la scène

De préférence la scène doit être disposé contre le mur le plus étroit de la salle ; pour la parole ou dans les petites salles (musique de chambre) aussi contre un mur latéral (figure II-26).

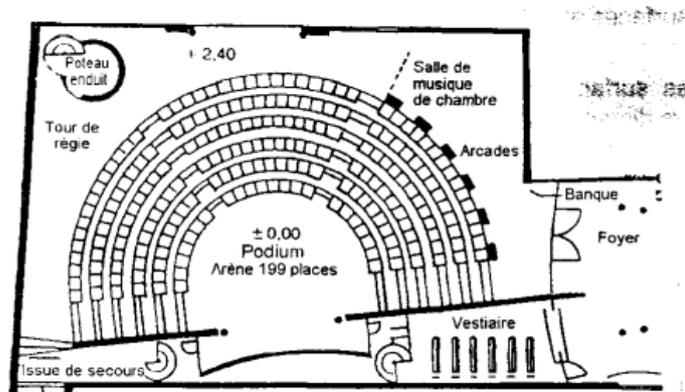


Figure II-26 : Scène de la petite salle de musique de chambre de la

Beethovenarchiv de Bonn (Source : Neufert, 2009)

Les auditoriums avec un parquet plat et des scènes variables sont généralement un problème pour une performance sonore. Les scènes doivent être sensiblement surélevées par rapport au sol pour favoriser la propagation du son directement, autrement il y a une baisse excessive du niveau sonore pendant la propagation du son (figure II-27).

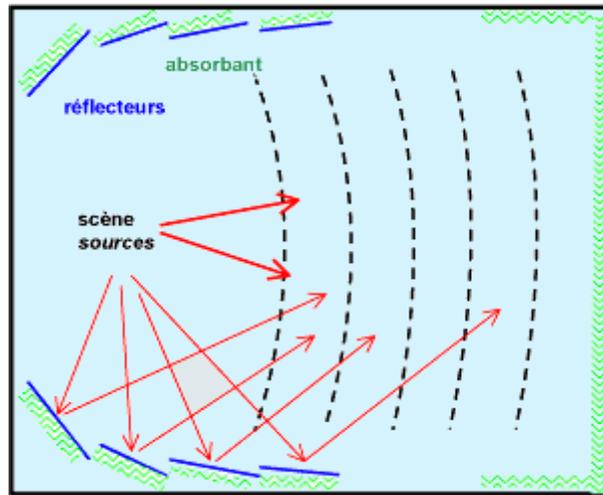


Figure II-27 : Chute du niveau sonore au-dessus de surfaces absorbantes
(Source : www.acouphile.fr)

Pour des raisons d'acoustique et de visibilité, le même niveau de son direct sera atteint pour tous les sièges en surélevant les rangées en spirale logarithmique (figure II-28).

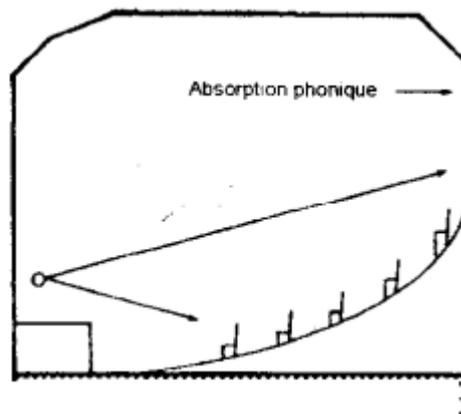


Figure II-28 : Surélévation des rangs en spirale log (Source : Neufert, 2009)

Les éléments réfléchissants pourront compenser les inconvénients de la structure, par exemple le pliage de surfaces murales convergentes (figure II-29).

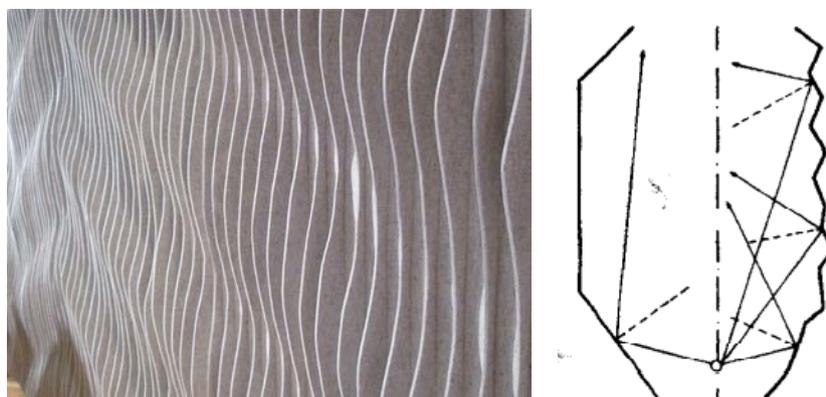
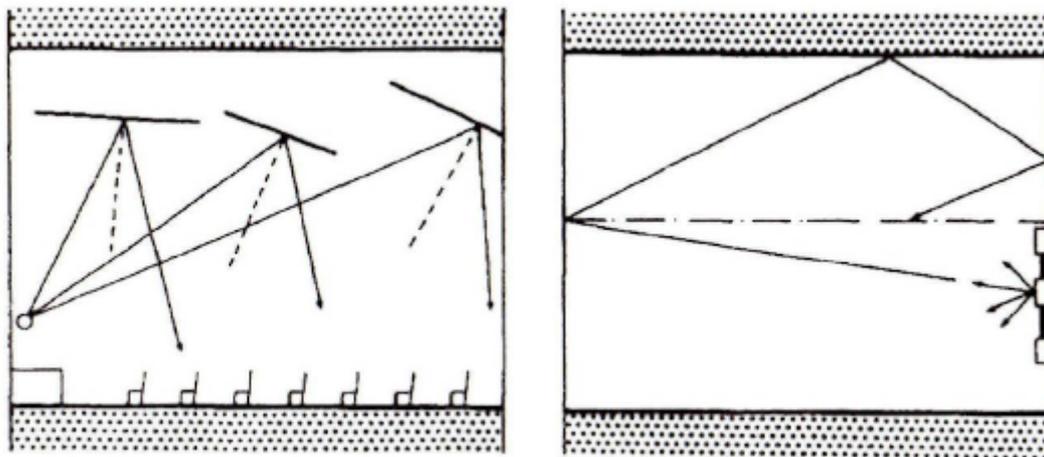


Figure II-29 : Pliage de la surface murale (Source : Neufert, 2009)

La pose des voiles pour des plafonds inadapté au d'éléments de reproduction acoustique (figure II-30) (Neufert, 2009).



(a)

Voile pour les plafonds pour orientation du son

b)

Éléments de restitution acoustique en cas de surfaces de réflexion défavorables.

Figure II-30 : Voiles de reproduction acoustique (Source : Neufert, 2009)

Les surfaces absorbantes permettent d'ajuster le temps de réverbération aux valeurs désirées et limitent les concentrations sonores. Une alternative entre matériaux réfléchissants et absorbants agit sur la réflexion comme une structuration solide de la surface (figure II-28). Les surfaces courbes risquent de provoquer un phénomène de focalisation (voûte). Évitez surtout les salles hémisphériques avec le centre de la voûte qui se trouve au-dessus de la scène, ce qui entraîne une concentration tridimensionnelle du son (figure II-31).

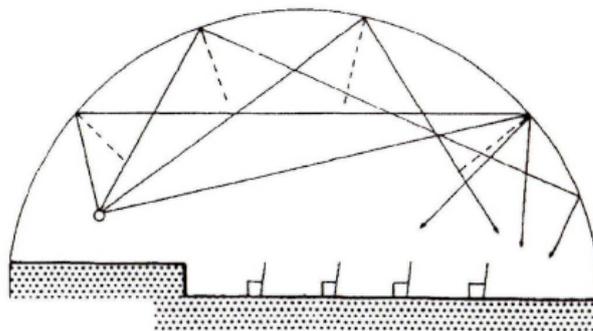


Figure II-31 : Effet de foyer par surfaces courbes

(Source : Neufert, 2009)

En outre, une bonne transmission du son peut être assurée par une courbe appropriée (figure II-32) (Neufert, 2009).

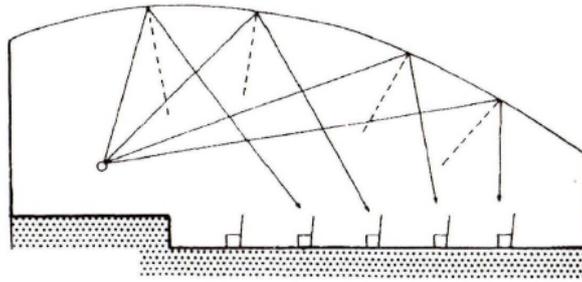


Figure II-32 : Bonne propagation du son par courbe adaptée (Source : Neufert, 2009)

Conclusion

Ce chapitre vise à développer un support pour la conception d'un auditorium performant acoustiquement afin d'atteindre notre but, nous avons procédé à une recherche bibliographique sur les particularités acoustiques des auditoriums, nous avons divisé cette recherche en deux parties, une partie est dédiée au principe du confort acoustique et l'autre partie est consacrée au confort acoustique dans les auditoriums ; pour la première partie nous avons développé les différents principes du confort acoustique ainsi que nous avons exposé en détail les principes d'isolation acoustique de construction contre les diverses nuisances sonores et les principes de base de la correction acoustique qui fait appel au traitement de l'absorption sonore afin d'atténuer les phénomènes de réverbération. Le choix d'un dispositif constructif d'isolation acoustique ou de correction dépend du confort acoustique recherché et de la nature des bruits existant. La mise en place de ces dispositifs est délicate et elle mérite d'être soigneusement étudié. Le traitement acoustique d'un auditorium vise à assurer la meilleure qualité d'écoute aux auditeurs, ce qui dépend des qualités des matériaux intérieurs de toutes les parois et principalement de leur capacité à réfléchir les sons, Les aménagements intérieurs et le mobilier ont aussi leurs impacts sur la limitation de la réverbération de son.

DEUXIÈME PARTIE : PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III :

ETUDE EMPIRIQUE DU CONFORT ACOUSTIQUE DANS L'AUDITORIUM UNIVERSITAIRE DJAAFRI SAADI

CHAPITRE III : ETUDE EMPIRIQUE DU CONFORT ACOUSTIQUE DANS L'AUDITORIUM UNIVERSITAIRE

DJAAFRI SAADI

Introduction

Actuellement, nous possédons des outils performants, qui se présentent sous forme d'appareils de mesure et de logiciels de calcul, pour traiter la qualité acoustique des salles et permettre de déterminer et d'évaluer le confort acoustique entre une salle et son environnement. L'utilisation de tels instruments, sans connaissance préalable, peut conduire les non-spécialistes à des interprétations erronées (Hamayon, 2014). Les méthodes empiriques sont les premières à avoir été utilisées dans ce domaine, les modèles de Sabine et Eyring étant les plus répandus. Leurs méthodes permettent une estimation approximative et rapide de certains paramètres, en particulier le niveau de pression acoustique. Les théories de Sabine et d'Eyring sont encore employées pour estimer le niveau de bruit ou les qualités acoustiques de certains éléments de construction (murs, sols, etc.). La théorie du champ diffus est aussi appliquée par les architectes pour obtenir une estimation rapide du champ acoustique dans une pièce déterminée. Néanmoins, ces méthodes ont leurs limites. Par ailleurs, la théorie du champ diffus ne peut pas être utilisée dans des salles fortement absorbantes (Gramez, 2010B).

Un auditorium qui a une bonne acoustique est celui qui facilite la communication d'une manière appropriée à sa vocation, dans un auditorium il faut accordé de l'importance aux temps de réverbération. Les problèmes d'acoustique sont généralement liés au fait que les sons sont trop réfléchis, ou pas suffisamment, ou dans la mauvaise direction, il est nécessaire d'analyser les propriétés acoustiques de l'auditorium, de connaître notamment le temps de réverbération, résultant de la réflexion des ondes sonores sur les parois, et la réponse impulsionnelle, connaître le comportement des ondes sonores dans ce dernier pour le modifier d'une manière appropriée, par exemple par la pose de matériaux absorbants.

III.1 Présentation du Campus Universitaire Targa Ouzemmour

L'université de Bejaia, créée en octobre 1983, est un établissement public pluridisciplinaire. Elle est composée de huit facultés, l'université de Bejaïa dispose de trois campus : Targa Ouzemmour, Aboudaou et El Kseur. Le campus Targa Ouzemmour regroupe trois facultés: Faculté de technologie, faculté des sciences exactes, faculté de la nature et de la vie avec 13 000 places pédagogiques. La figure ci-dessous représente le campus universitaire avec son environnement immédiat.

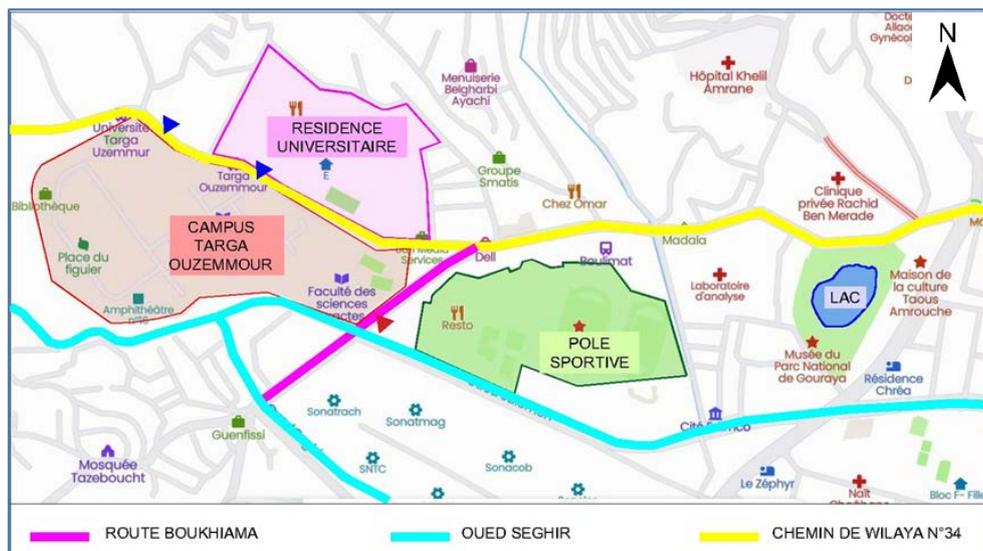


Figure III-1 : Campus Targa Ouzemmour (Source : Google Maps adapté par auteur,2022)

Le campus universitaire de Targa Ouzemmour se situe au sud-ouest du centre-ville de Bejaia, il est délimité au nord par le chemin de la wilaya N°34 et sud-est par la route de Boukhiama et c'est à partir de ces deux côtés qu'on voit les deux façades principales du campus, et d'oued Seghir du côté ouest. Le campus se situe à proximité du pôle sportif, et à 6 km du centre historique, le campus s'étale sur une surface de 20 hectares.

III.2 Étude quantitative de l'auditorium Djaafri Saadi

Cette recherche a été menée sur l'auditorium universitaire Djaafri Saadi plus précisément sur le confort acoustique. L'étude quantitative sur le corpus d'étude a été effectuée à travers des prises de mesures in situ.

III.2.1 Présentation des cas d'étude

Le campus « Targa Ouzemmour » intègre principalement des bâtiments d'enseignement, des équipements culturels « un centre culturel et un auditorium » et un seul terrain du sport isolé

et très peu fréquenté par les étudiants. La figure ci-dessous présente une carte de campus Targa Ouzemour avec l'auditorium et son l'environnement immédiat.

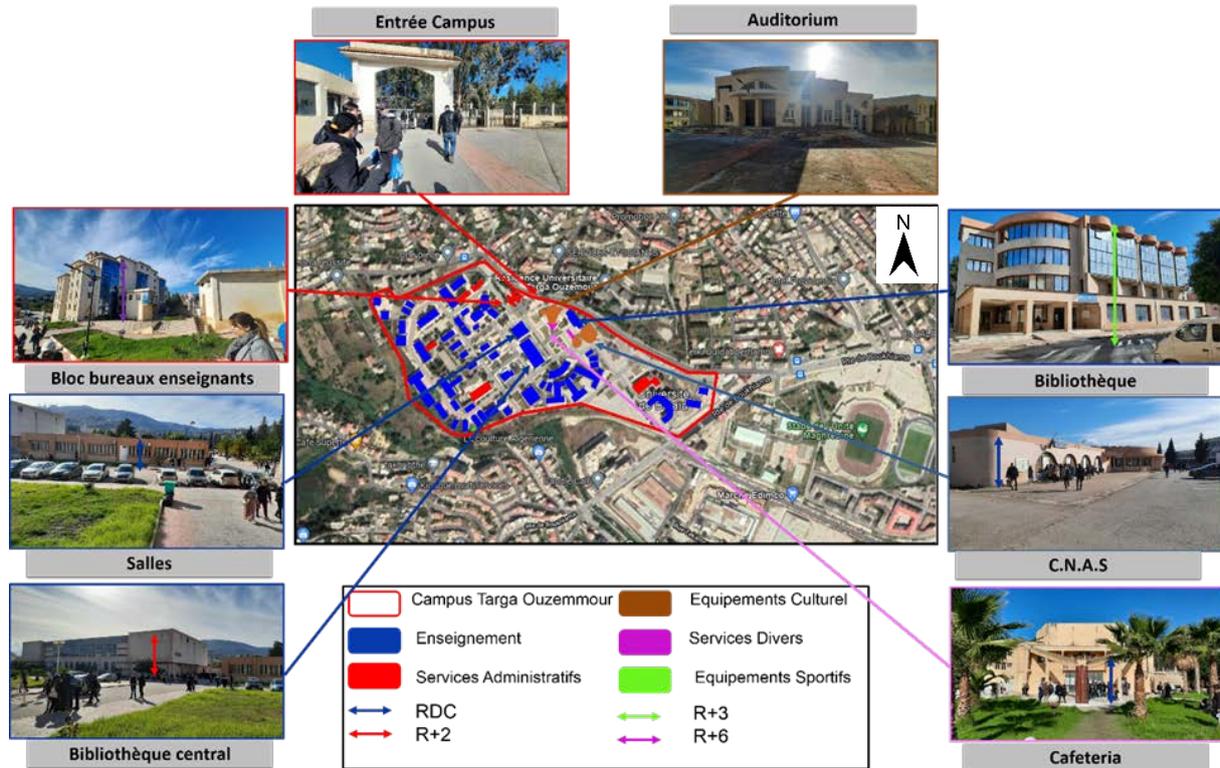


Figure III-2 : Constitution de l'auditorium Djaafri Saadi (Source : Auteur, 2022)

Le campus Targa Ouzemour est constitué de blocs d'enseignements, amphi, laboratoire, blocs administratifs...etc., l'auditorium Djaafri Saadi se situe à côté de la deuxième entrée de campus universitaire, il s'étale sur une superficie de 1290m² et se compose principalement d'un auditorium de 485.65m² avec une arrière scène (salon d'honneur, régie, sanitaire, vestiaires...) de 91.10m², halle d'entrée de sensibilisation de 134.40m², halle d'expositions de 107.15m², cafeteria de 127.75m², salles d'étude de 85.05m² et des bureaux (régie, salle de projection chambre noir, salle de conservation ...) d'une superficie de 223.90m² (voir annexe B).

III.2.2 Contexte Immédiat

L'auditorium est exposé à plusieurs sources de bruit :

a) Bruit Aérien extérieur

- ◆ La circulation mécanique du chemin de wilaya N° 34.
- ◆ Circulation mécanique à l'intérieur de l'université.

- ◆ Cafeteria universitaire Rez de chaussée de l’auditorium.

- ◆ Évènement culturelle du ASCS.

b) Bruit de choc

- ◆ Cafeteria universitaire

- ◆ Espace d’exposition

c) Bruit d’équipement

- ◆ Climatisation

La figure ci-dessous illustre l’auditorium Djaafri Saadi avec les différence source de bruit extérieur

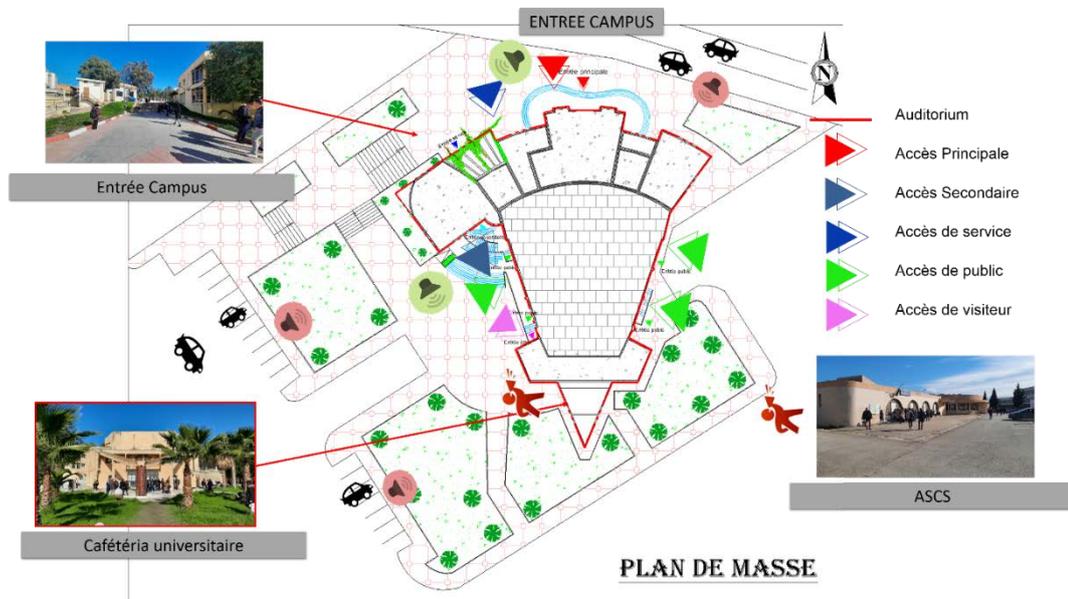


Figure III-3 : Bruit aérien extérieur (Source : Auteur, 2022)

L’auditorium est exposé aux différentes sources de bruit, notamment le bruit aérien extérieur qui provient de la cafeteria et le regroupement des étudiants, et le bruit des équipements de climatisation qui représente une source de gêne.

III.2.3 L’enveloppe de la construction

L’auditorium est caractérisé par des détails spécifiques qui sont énumérés comme suit :

a) La forme

L’auditorium a une forme régulière, trapézoïdale (voir annexe B).

b) La taille

La capacité d'accueil de l'auditorium est environ de 480 places.



Figure III-4 : Auditorium Djaafri Saadi (Source : Auteur, 2022)

c) Les matériaux

- ◆ Les parois extérieures sont en double parois en brique de 15 et 10 cm avec lame d'air.
- ◆ Les parois intérieures sont en brique de 10 cm.
- ◆ Tous les murs intérieurs ainsi que la structure et les marches sont revêtue de la moquette.
- ◆ Le plafond est suspendu en forme courbé en plâtre.
- ◆ La scène est en linoleum.

III.2.4 Protocole de la prise de mesures

Les mesures sont effectuées lorsque le local est inoccupé (maximum deux personnes), avec une source suffisamment énergétique pour que le niveau de pression du début de la courbe de décroissance soit au moins supérieur à 35 dB au niveau de pression du bruit de fond. Les prises de mesurage s'effectuent dans un jour courant de la semaine (la présence de bruit aérien extérieur) pour vérifier l'isolements des façades, l'opération de prise de mesure commence à 10h jusqu'à 14h, la figure ci-dessous représente le plan de l'auditorium

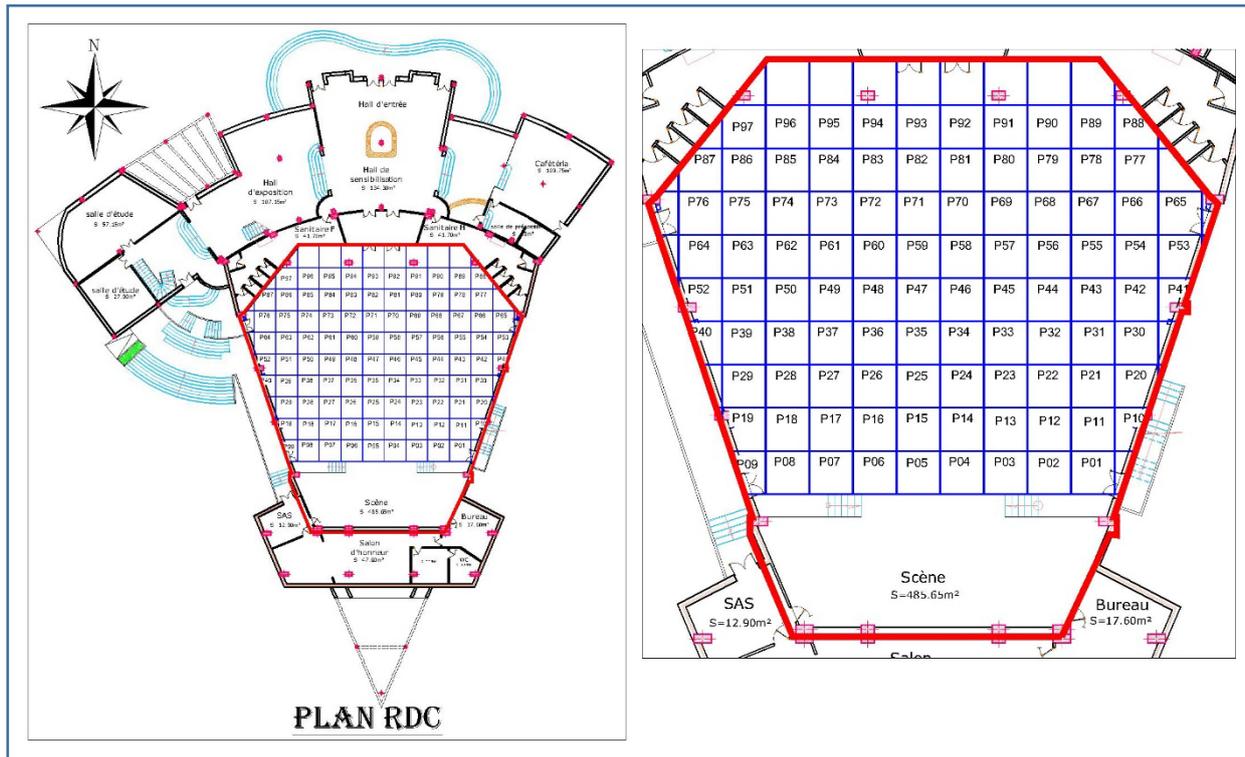


Figure III-5 : Plan auditorium Djaafri Saadi avec grille (Source : Auteur,2022)

Pour cette étude trois scenarios seront exécuté :

- ◆ Scénario 01 : Le calme avec bruit extérieur.

Ce scenario va nous permettre de vérifier l'isolation des parois.

- ◆ Scénario 02 : Une source sonore intérieur sans baffle.

Ce scénario va nous permettre de vérifier la distribution du son dans la salle.

- ◆ Scenario 03 : Une source sonore intérieur avec baffle.

Pour que les prises de mesure seront précis nous avons élaboré une grille de 2mx2m dans l'auditorium et nous avons obtenue 97 points.

III.2.5 Instrument de la prise de mesures

Dans notre recherche nous avons utilisé une application portable « Sonomètre » cette application est un compteur intelligent de son niveau pour Android, elle utilise le microphone intégré du portable pour mesurer le volume sonore en décibels (dB) et affiche également des échantillons sur le graphique le figure ci-dessous illustre un graphique affiche avec l'application.



Figure III-6 : Instrument utilisé pour la prise de mesure (Source : Auteur,2022)

La comparaison entre les valeurs enregistrées dans l’application Android et le sonomètre confirme la précision et la fiabilité des instruments utilisés pour la prise de mesures car les différentes valeurs comparées sont similaires ou avec un écart très faible et négligeable la figure III-7 illustre cette comparaison.



Figure III-7 : Comparaison entre sonomètre et application Android « sonomètre »
(Source : Auteur, 2022)

L’application et le sonomètre ont donné presque la même valeur pour le mesure d’un son.

III.2.6 Résultats et interprétations

Les résultats obtenus par la prise de mesures (voir annexe C), et ils sont représentés dans les figures (III-8, III-9 et III-10). La figure III-8 représente les mesures acoustiques pendant le silence.

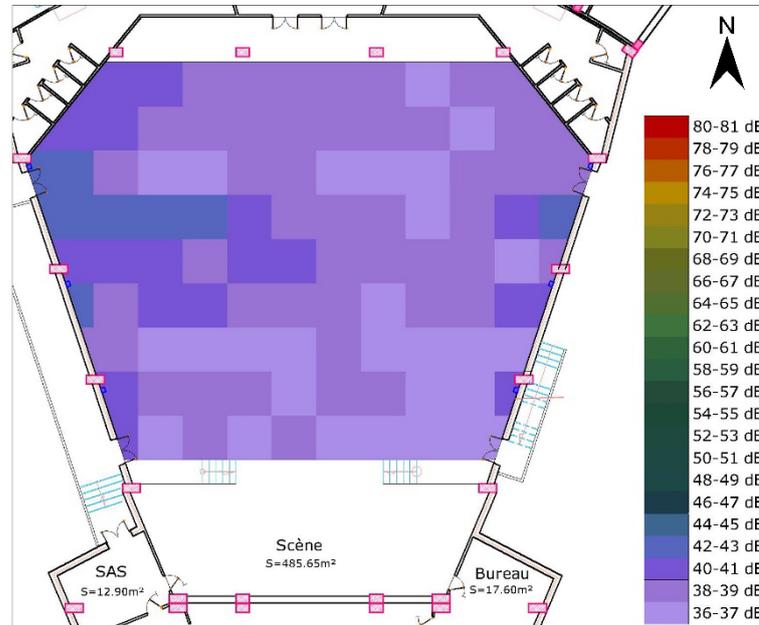


Figure III-8 : Graphique représentant Scenario 01 pour les calculs acoustiques

(Source : Auteur, 2022)

D'après les mesures acoustiques effectuées en utilisant l'application Android « sonomètre », on constate que le niveau sonore pendant le silence complet est compris entre 36 et 43 dB, qui est une valeur conforme en normes pour le calme. Mais on remarque que le niveau sonore est compris entre 36 à 39 dB dans l'auditorium mais ce chiffre augmente de 40 à 43 dB à côté des portes extérieures qui signifie un bruit aérien extérieur et aussi à côté de climatiseur qui indique un bruit d'équipement.

La figure III-9 illustre les mesures acoustiques pendant la présence d'une source sonore située dans la scène.

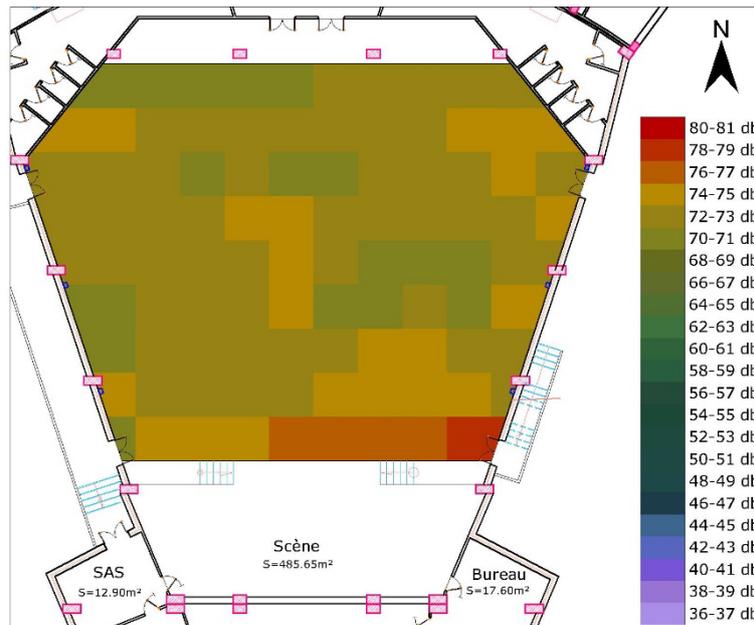


Figure III-9: Graphique représentant Scenario 02 pour les calculs acoustiques
(Source : Auteur, 2022)

On constate que le niveau sonore pendant la présence d'une source sonore est entre 70 et 79 dB, qui est une valeur conforme en normes pour une conversation normale, en général le niveau sonore est entre 70 et 75 dB et atteint 79 dB au point le plus proche de la source sonore.

La figure III-10 illustre les mesures acoustiques pendant la présence d'une source avec six baffles placé trois de chaque côté, le premier est placé à côté des premières rangées tandis que le deuxième est placé au milieu et le troisième au fond.

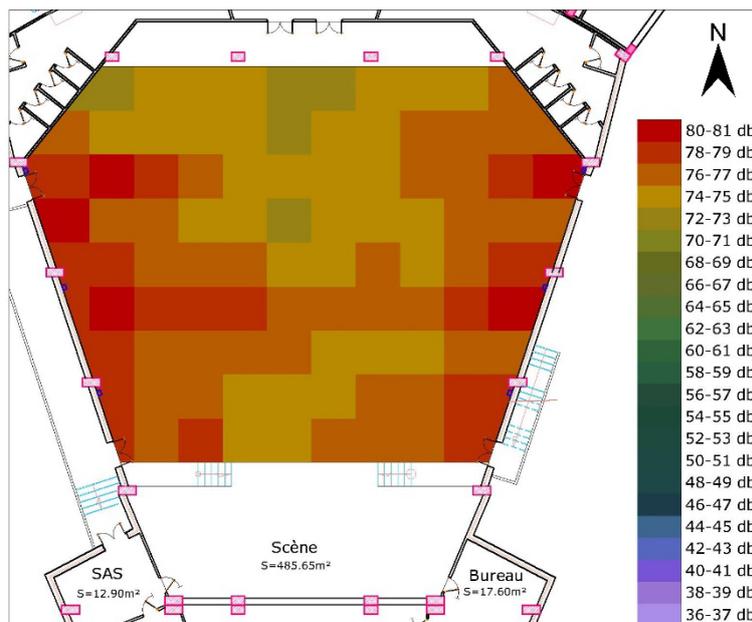


Figure III-10 : Graphique représentant Scenario 03 pour les calculs acoustiques (Source : Auteur, 2022)

On constate que le niveau sonore pendant la présence d'une source sonore avec des baffles de chaque côté est entre 72 et 81 dB, qui est une valeur conforme en normes, en remarque que le niveau sonore est entre 72 et 75 dB, mais ce niveau augmente au deux côté près des baffles est atteint jusqu'à 81dB, cela est due à la présence des ondes directes et une autre réfléchi, ce qui augmente le niveau enregistré dans ces endroits à cause du caractère cumulatif des ondes sonores.

III.3 Étude qualitative de l'auditorium Djaafri Saadi

La qualité sonore des auditoriums doit être prise en considération dès la phase d'esquisse pour aboutir à une conception ayant une qualité acoustique, l'étude qualitative c'est le résultat de l'interprétation des réponses des interrogés.

III.3.1 Les méthodes et les techniques de recherche utilisées

L'enquête par questionnaire est un outil méthodologique composé d'une série de questions qui permet de quantifier et de vérifier une hypothèse théorique. Plusieurs paramètres conditionnent la qualité du son tel que la forme et les matériaux utilisés dans l'auditorium. Le choix des questions s'est fait donc en se basant sur ces variables. Il s'agit d'une enquête qualitative à questions fermées, qui impliquent pour les interrogés un nombre limité de choix de réponses et une forme précise de réponse. La population visée par l'évaluation est les étudiants et les enseignants.

Notre corpus d'étude comprend un seul cas d'étude qui est l'auditorium universitaire Djaafri Saadi. Nous avons effectué un questionnaire qui comprend douze (12) questions (voir annexe D), le questionnaire est fait sous le biais de Google Forms et envoyé via boîtes Email aux enseignants et aux étudiants d'architecture de l'université Terga Ouzemmour qui ont assisté à des conférences cette année à l'auditorium qui a été organisé par le département d'architecture, le traitement de ces données s'est fait par le biais de Google Forms.

III.3.2 Structure du formulaire des questions

Le questionnaire a suivi les normes méthodologiques en matière de réalisation d'enquête. Les questions sont issues à partir de deux sources principales : de la littérature concernant le thème du confort acoustique. Le recours à des études sur l'acoustique dans le but de tirer un maximum d'information et de profiter de l'expérience acquise qu'elle soit bonne ou mauvaise.

Les questions de l'enquête portent sur :

- ◆ La sensibilité au bruit acoustique (pas sensible, peu sensible, moyen sensible, sensible, très sensible).
- ◆ Le jugement acoustique (très mauvais, mauvais, acceptable, bonne, très bonne).
- ◆ La qualité d'écoute (je n'entends rien, j'entends un peu, j'entends bien)

Les questions choisies sont des questions fermées (questions fermées dichotomiques, questions fermées à choix multiples) ; les personnes interrogées doivent choisir une ou plusieurs réponses formulées à l'avance. Le choix de cette catégorie de questions est lié à ses avantages ; facilité de la compréhension de la question, facilité de l'expression de la réponse et son sens fixe.

Il faut noter que les questions ouvertes sont plus riches, mais, elles sont plus difficiles à traiter statiquement.

Comme dans toute enquête, les personnes interrogées vont avoir tendance à répondre à leurs attentes par rapport aux questions, et non aux faits. Cela montre la limite de la méthode et l'utilité de l'accompagner ces résultats par une simulation numérique.

III.3.3 Le traitement statistique

Le traitement des résultats se fait au baie de Google Forms qui est un outil gratuit édité par Google pour créer des formulaires et tout type de questionnaires. Relié au compte Google Drive, il permet de récupérer les résultats dans un fichier Google Sheets. Il est également disponible au sein de l'abonnement professionnel Google Workspace (ex G Suite). L'interface de l'outil en ligne est disponible en plusieurs langues dont le français et permet d'éditer rapidement des formulaires et questionnaires sur tout type de sujet et il permet aussi de générer une évaluation pour des étudiants en formation, etc. Les récapitulatifs sont affichés automatiques pour toutes les réponses au questionnaire.

III.3.4 Résultats et interprétations

Trente réponses ont été obtenues au questionnaire. Tous les questionnaires sont exploités pour le traitement des résultats. Ce questionnaire été adressé aux enseignants et aux étudiants d'architecture de l'université Terga Ouzemmour qui ont assisté à des conférences cette année à l'auditorium, alors la plupart des personnes interrogé ont visité plusieurs fois l'auditorium la figure II-11 illustre le pourcentage de nombre de fois visité l'auditorium.

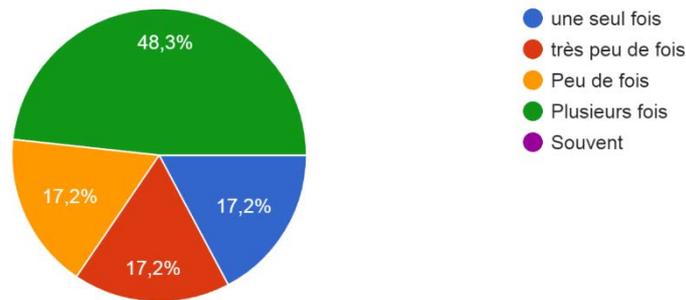


Figure III-11 : Pourcentage de fréquentation de l'auditorium (Source : Auteur, 2022)

Les interrogés sont généralement des architectes et ils ont visité l'auditorium plusieurs fois et la plupart sont sensible ou moyen sensible au bruit, ce qui donne plus de valeur au questionnaire.

La deuxième et troisième question porte sur les zones qu'ils ont occupé pendant les conférences et la zone préférée a occupé dans l'auditorium, la figure II-12 illustre l'auditorium diviser a des zones, les personnes interrogées en occupé des zones différentes et il préfère les zones près de la scène pour qu'il entendre bien et voir bien.

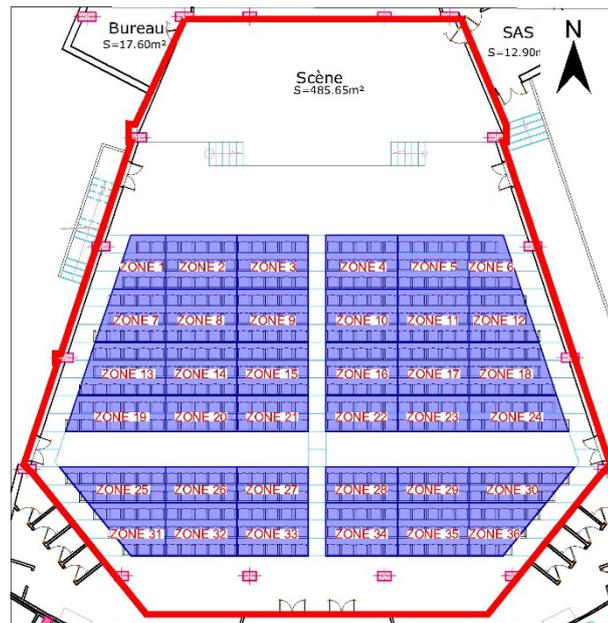


Figure III-12 : Le plan de l'auditorium avec zones (Source : Auteur, 2022)

L'auditorium a été divisée en 36 zones pour qu'on puisse couvrir tous l'auditorium, 07 personne n'ont pas répondu à cette question, tandis la majorité ont répondu qu'il préfère la zone 10 pour plusieurs raisons parmi ces raisons la visibilité, accessibilité, la qualité sonore, et quelques-uns ont choisi la zone 16 et le reste préfère les premières zones pour la qualité sonore.

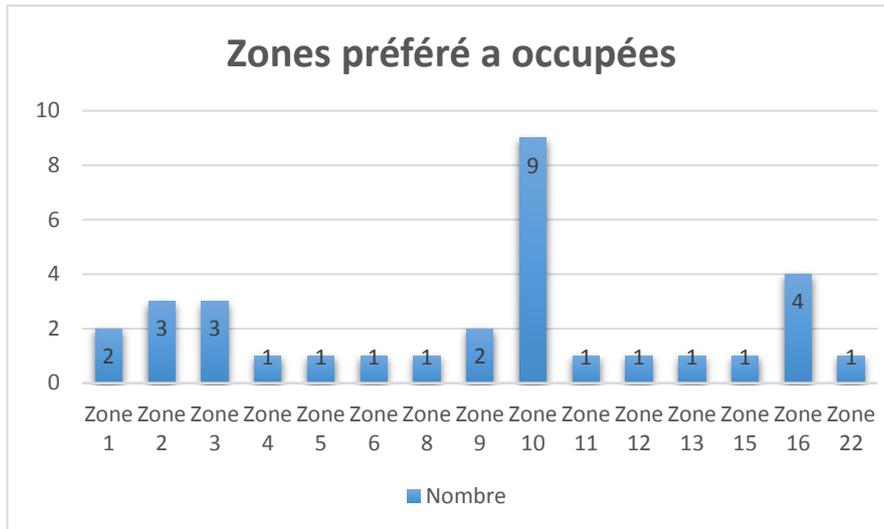


Figure III-13 : les zones préférées à occuper (Source : Auteur, 2022)

La figure qui suit II-14 illustre les résultats obtenus concernant le bruit aérien extérieur 18 personnes ont confirmé la présence de bruit extérieur à l'intérieur de l'auditorium ce qui représente 60% des personnes interrogées.

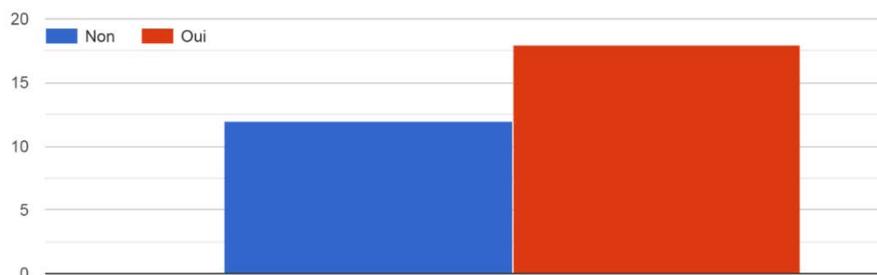


Figure III-14 : Existence des nuisances sonores au sein de l'auditorium (Source : Auteur, 2022)

La figure II-15 présente la source de ces bruits, la grande partie des personnes interrogées ont affirmé que les étudiants sont la cause de ces nuisances tandis que le reste des avis entre les véhicules et le cafeteria

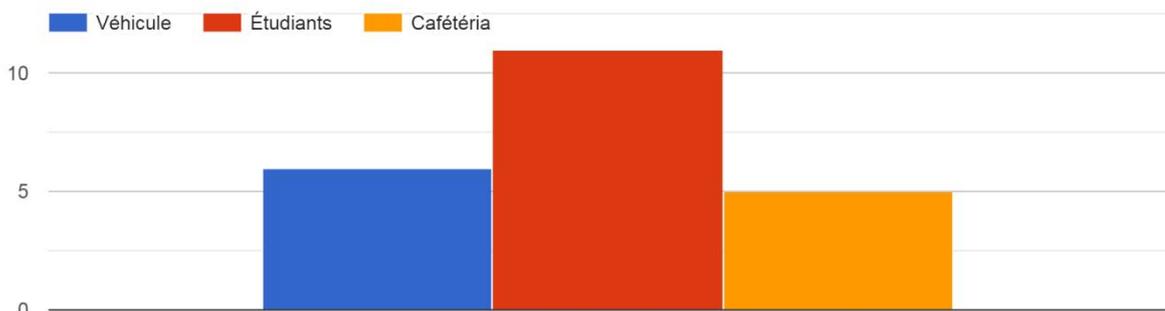


Figure III-15 : La source bruit extérieur (Source : Auteur, 2022)

La présence de nuisance sonore extérieure à l'intérieur de l'auditorium confirme que l'auditorium dispose d'une mauvaise isolation acoustique.

Pour la qualité sonore à l'intérieur de l'auditorium les personnes interrogées ont jugé que la qualité du son et l'ambiance sonore à l'intérieur est acceptable, les figure III-16 et III-17 illustrent les résultats obtenus.

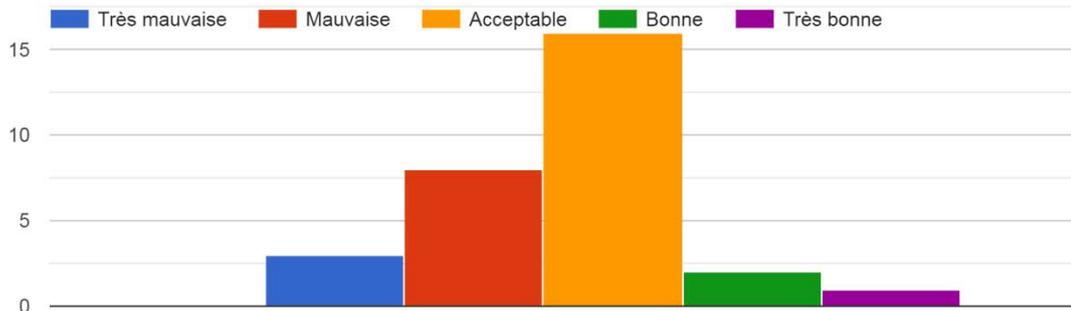


Figure III-16 : Qualification de la qualité du son (Source : Auteur, 2022)

D'après les résultats 53.3% des personnes interrogés ont affirmé que la qualité de son et l'ambiance sonore est acceptable tandis de 26.7% ont affirmé que la qualité du son est mauvaise et 10% ont affirmé qu'elle est très mauvaise et 10% qui reste entre bonne et très bonne.

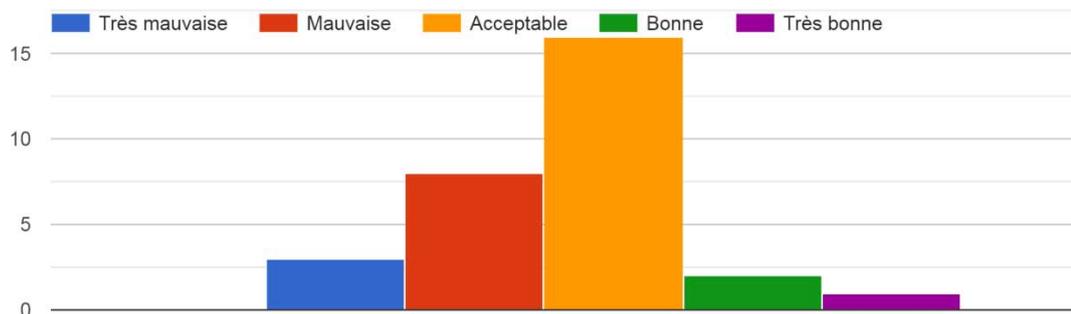


Figure III-17 : Qualification de l'ambiance sonore (Source : Auteur, 2022)

D'après les résultats la qualité sonore de l'auditorium est acceptable que signifie que l'auditorium a été étudié acoustiquement.

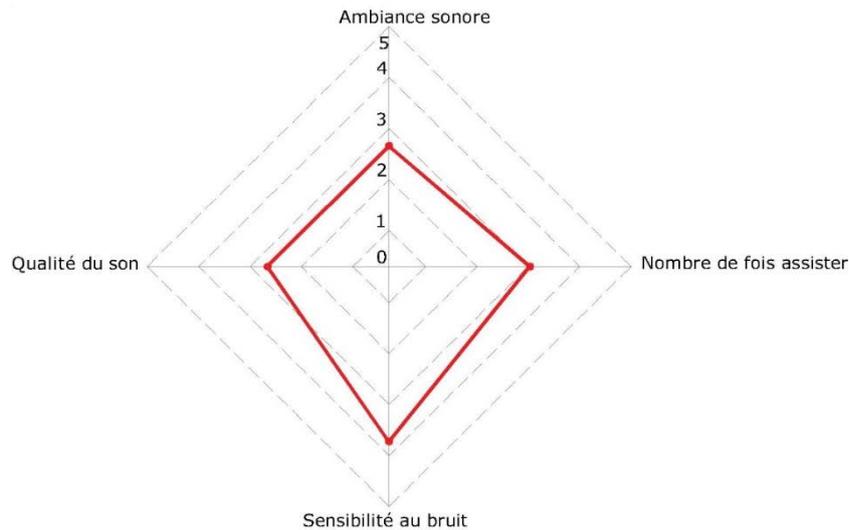


Figure III-18 :Schéma radar (Source : Auteur, 2022)

Ce schéma clarifié la moyenne des réponses à ces quatre questions et en remarque que le nombre de fois assister à des conférences et la sensibilité au bruit sont au-dessous de la moyenne ce qui donne plus de valeur à leurs réponses et pour la qualité du son et l’ambiance sonore elles sont au-dessus de la moyenne que représente que la qualité sonore n’est pas bonne.

Les figure III-19 et III-20 et III-21 illustrent les résultats de la réverbération (le retour de son) et d’écho (la résonance), d’après les résultats les interrogés entendent un retour de son dans l’auditorium et pour la plupart ce retour de son leur dérangeant.

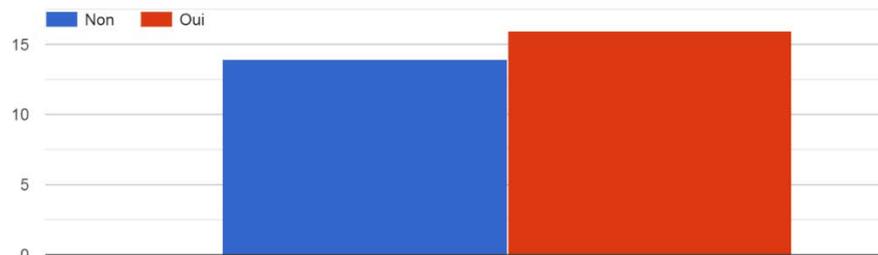


Figure III-19 : Le retour de son dans l’auditorium (Source : Auteur, 2022)

Tous les parois intérieures et le sol sont revêtues d’un absorbant ce qui laisse la réflexion du son au plafonds qui a une forme suspendue et courbe.

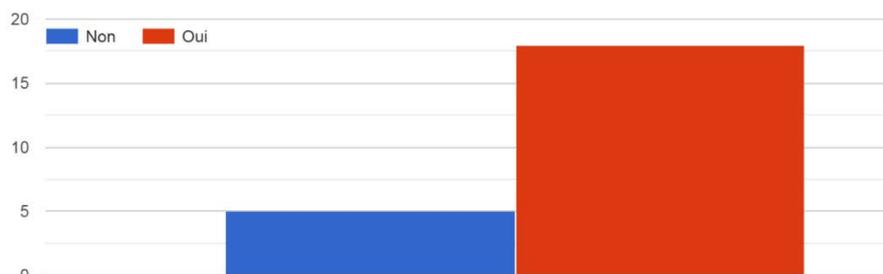


Figure III-20 : La satisfaction via le retour de son dans l’auditorium (Source : Auteur, 2022)

La figure III-21 illustre la résonance du son dans l’auditorium les résultats montrent que le plus grand nombre n’entend pas une résonance du son dans l’auditorium

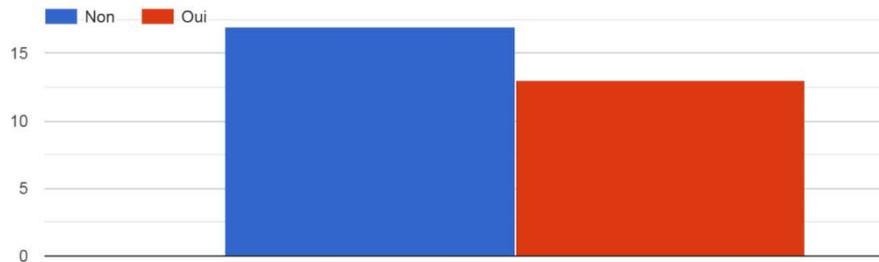


Figure III-21: La résonance du son (Source : Auteur, 2022)

La figure III-22 montre que la plupart des interrogés ont confirmé qu’il entend un peu leur interlocuteur ou n’entends rien.

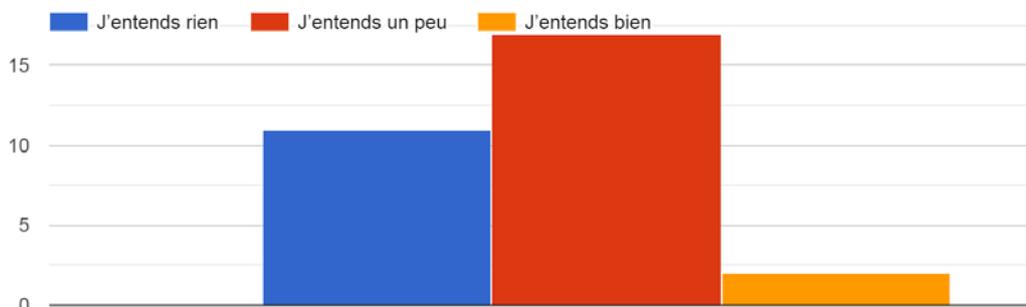


Figure III-22 : L’écoute de la voix de l’interlocuteur (Source : Auteur, 2022)

La figure III-23 illustre le besoin de développer une étude acoustique pour l’auditorium, la plupart trouvent que ce dernier nécessite une étude acoustique.

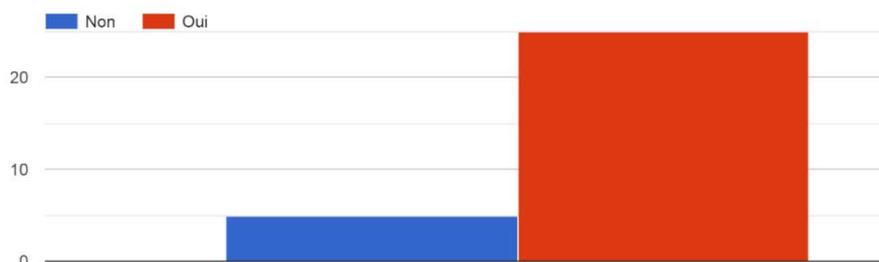


Figure III-23 : Le besoin de développer une étude acoustique (Source : Auteur, 2022)

D’après les réponses des questionnés, la majorité occupe des places différentes dans l’auditorium, et ils affirment que l’auditorium ne résonnent pas. Cependant ils trouvent que la qualité sonore et l’ambiance sonore sont acceptable. Et ils affirment aussi qu’il existe des nuisances sonores au sein de l’auditorium qui provient généralement des étudiants à l’extérieur, enfin 83% des interrogés affirme que l’auditorium a besoin d’une étude acoustique.

Conclusion

L'étude qualitative et quantitative est primordiale pour évaluer le confort acoustique de l'auditorium mais cette étude nécessite d'être enrichie par une étude numérique pour confirmer l'étude empirique. L'étude quantitative est une étape indispensable pour réaliser les mesures de bruit et définir les solutions techniques à mettre en œuvre, elle permettra donc de vérifier les hypothèses posées dans les premiers chapitres et de répondre aux problèmes posés. D'après l'analyse des résultats de l'étude qualitative de l'auditorium, ce dernier a une qualité acoustique acceptable avec quelques problèmes liés à la réflexion excessive des ondes sonores qui cause une réverbération laquelle a été confirmée d'après les réponses des interrogés au questionnaire créant ainsi une confusion dans la clarté du son, cette réverbération peut être causée par la forme ou les matériaux de construction utilisés.

CHAPITRE IV :

**ETUDE ET OPTIMISATION NUMERIQUE DE
L'ACOUSTIQUE DES AUDITORIUMS**

CHAPITRE IV : ETUDE ET OPTIMISATION NUMERIQUE DE L'ACOUSTIQUE DES AUDITORIUMS

Introduction

L'architecture a énormément évolué et changé de nos jours, nous puissions aisément simuler nos constructions à l'avance. Grâce à de logiciels de simulation, nous pouvons simuler facilement le niveau de confort en établissant des calculs sur les constructions et sur leurs aspects. Les technologies de CAO (conception assistée par ordinateur) ont atteint un tel point qu'el nous permet de mesurer et de simuler notre futur cadre bâti, non seulement en prévoyant son évolution, mais aussi en l'adaptant à son cadre bâti, en prédisant non seulement ses formes spatiales, mais aussi sa qualité spatiale et, plus encore, ses performances. L'objectif de ce chapitre est l'évaluation de la performance acoustique de l'auditorium en simulant la performance de l'auditorium Djaafri Saadi qui nous permettra ensuite de proposer les meilleures solutions alternatives pour atteindre une performance acoustique.

IV.1 La technique de simulation

Depuis le début du 20ème siècle, la recherche sur l'acoustique des salles a permis de développer des instruments pour prédire les comportements sonores dans des espaces clos. De très nombreuses méthodes de simulation ont ainsi vu le jour. Toutes différentes par leurs applications, elles se basent toujours sur les caractéristiques de la propagation des ondes acoustiques. Les architectes de l'Antiquité n'ont pas assisté à l'essor de la simulation acoustique pour bâtir salles et des théâtres présentant d'excellentes propriétés sonores. Toutefois, les progrès que les instruments de prédiction ont permis d'apporter à cet art ont été considérables, et aujourd'hui dans les pays développés, rares sont les salles et auditoriums qui peuvent être construits sans une étude acoustique préliminaire, des logiciels très performants tels que Catt-acoustique, Ease, Odeon, Ecotect.... Sont disponibles sur le marché. De même, de multiples méthodes de simulation ont fait l'objet d'études plus approfondies (Kandelman, 2007), malheureusement ce n'est pas le cas en Algérie, c'est pourquoi nous devons développer ses études et les appliquer dans la réalité.

IV.2 Le choix d'outil de simulation

Le logiciel ECOTECT fait partie des outils d'analyse de performance, il s'adresse principalement aux architectes, il est prévu pour être utilisé lors des premières étapes conceptuelles. Il intègre une interface de modélisation 3D assez simple et intuitive avec une gamme de fonctions d'analyse. Celles-ci comprennent : l'ombre portée et la réflexion solaire ; la pénétration du soleil et la conception de dispositifs d'ombrage ; l'accès au soleil et le captage photovoltaïque/de chaleur ; le confort thermique horaire et les charges mensuelles des locaux ; les niveaux d'éclairage naturel et artificiel ; les réflexions acoustiques et les temps de réverbération ; le coût du projet et l'impact environnemental (Andrew & Andrew, 2001) la figure VI-1 illustre quelques résultats de simulation avec Ecotect.

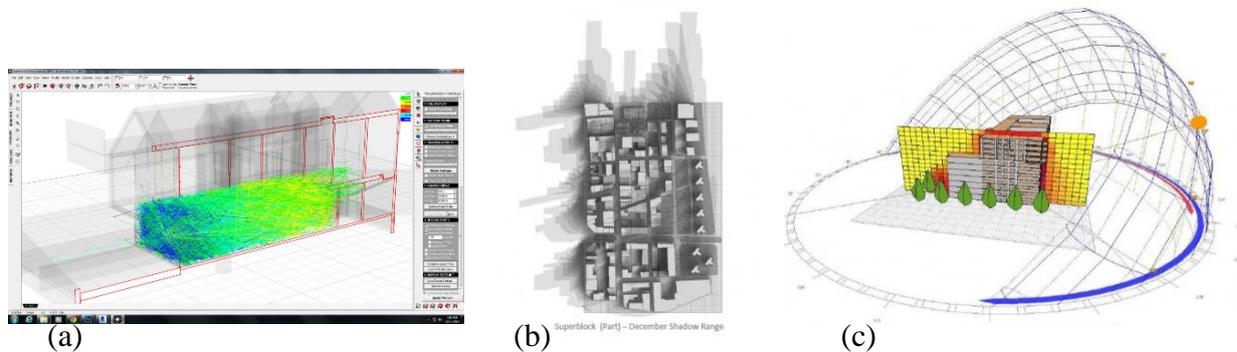


Figure IV-1: Résultat de simulation avec Ecotect, acoustique (a), ombres et dégradés (b) Radiation solaire (c) (Source :<http://legacy.iaacblog.com>)

La fonctionnalité la plus importante d'ECOTECT est son approche interactive de l'analyse des performances. Les étudiants peuvent sélectionner différents matériaux de surface et comparer très rapidement les changements qui en résultent. À mesure que la complexité du modèle augmente; il peut être exporté vers une série d'outils spécifiques aux applications pour une analyse plus détaillée. Les formats actuellement pris en charge sont les suivants : le progiciel de simulation d'éclairage RADIANCE des Lawrence Berkley Laboratories, VRML pour les laboratoires ; VRML pour la visualisation 3D interactive; les outils de simulation thermique DOE-2 et EnergyPlus du ministère américain de l'énergie, et d'autres applications telles que POV-Ray, un outil de rendu basé sur le raytracing (Andrew & Andrew, 2001).

IV.3 Les étapes de simulation via le logiciel ECOTECT

La simulation est effectuée pour évaluer l'efficacité sonore de l'auditorium universitaire Djaafri Saadi à Bejaia. Le logiciel de simulation Ecotect a été utilisé pour visualiser la propagation du son et déterminer les problèmes acoustiques ainsi voir l'influence de la forme et des matériaux sur le confort acoustique (Pour visualiser les étapes en détail voir annexe E).

IV.3.1. Réalisation du modèle simulé

La réalisation du modèle simulé peut être effectuée grâce aux outils de création d'Ecotect, mais compte tenu de la complexité du modèle ; la réalisation de ce dernier a été effectuée à l'aide du logiciel Sketchup (Figure IV-5) avec seulement les détails indispensables puis le fichier a été enregistré au format 3DS après l'importation de ce fichier dans Ecotect.

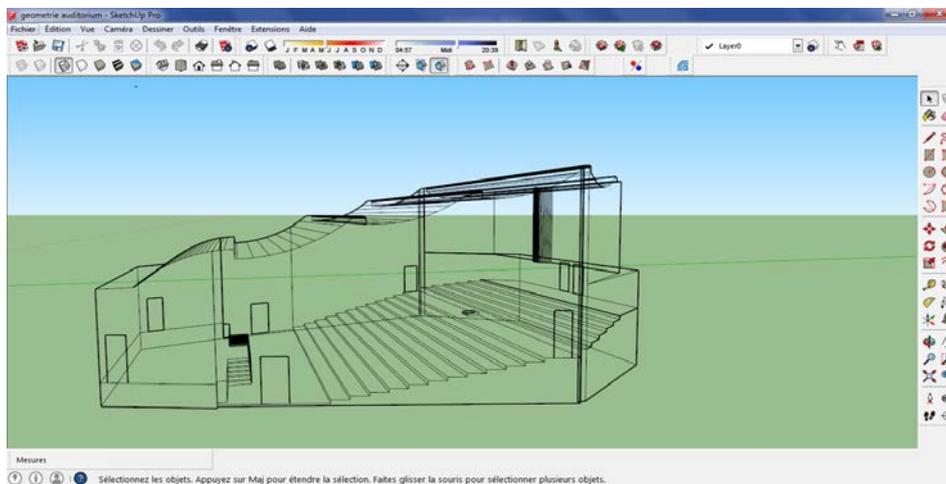


Figure IV-2: Modélisation de modèle à simulé sur SketchUp (Source : Auteur, 2022)

Le volume de l'auditorium est de 3500 m³. Les murs intérieurs sont construits en double parois de bricks avec lame d'air de 5mm, pour le traitement acoustique toutes les parois intérieures ainsi que le sol sont revêtue par la moquette (Figure IV-3), tandis que la scène et les marche sont revêtue de linoléum.

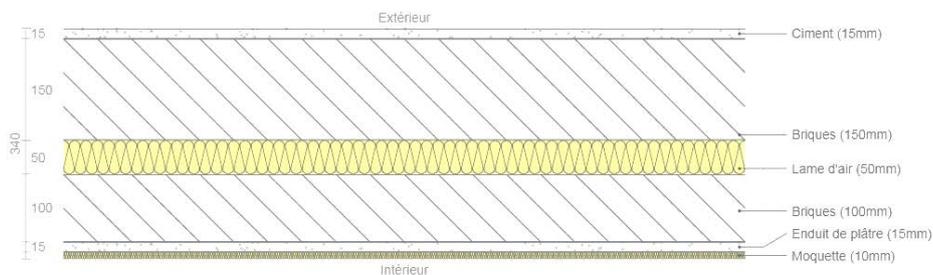


Figure IV-3: La composition des parois de l'auditorium (Source : Auteur, 2022)

Cette figure illustre la composition des parois de l'auditorium .

IV.3.2. Importation du modèle dans l'Ecotect

Cette étape consiste à importer le modèle dans l'Ecotect, en cliquant sur import ensuite 3D Cad geometry, le logiciel donne la main pour l'importer sous plusieurs formats ; 3DS, DXF, OBJ....

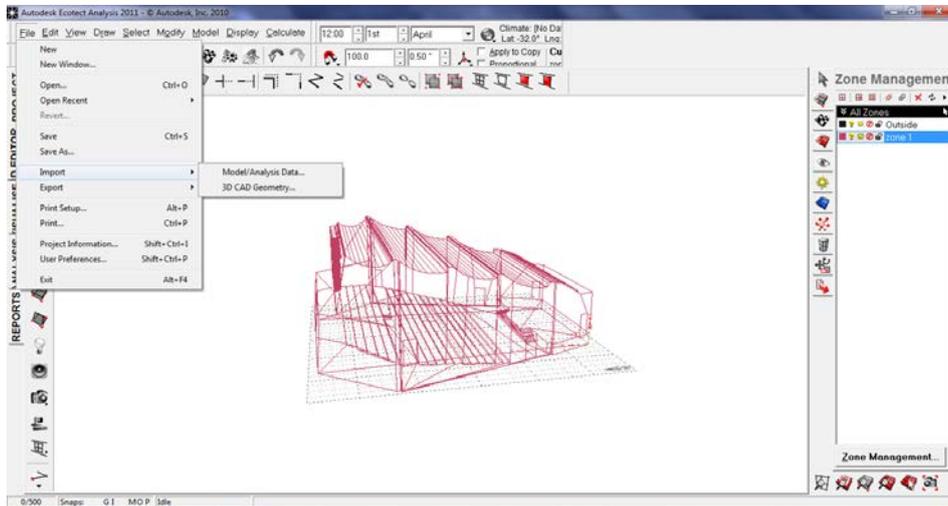


Figure IV-4: Importation du modèle dans l'Ecotect (Source : Auteur, 2022)

IV.3.3. Insertion des matériaux

Il faut insérer les matériaux de chaque élément ; mur, plafond, sol... (Figure IV-5); en appuyant sur sélectionne puis par type d'élément ou en sélectionnant directe par la souris ; les matériaux sont regroupés par type.

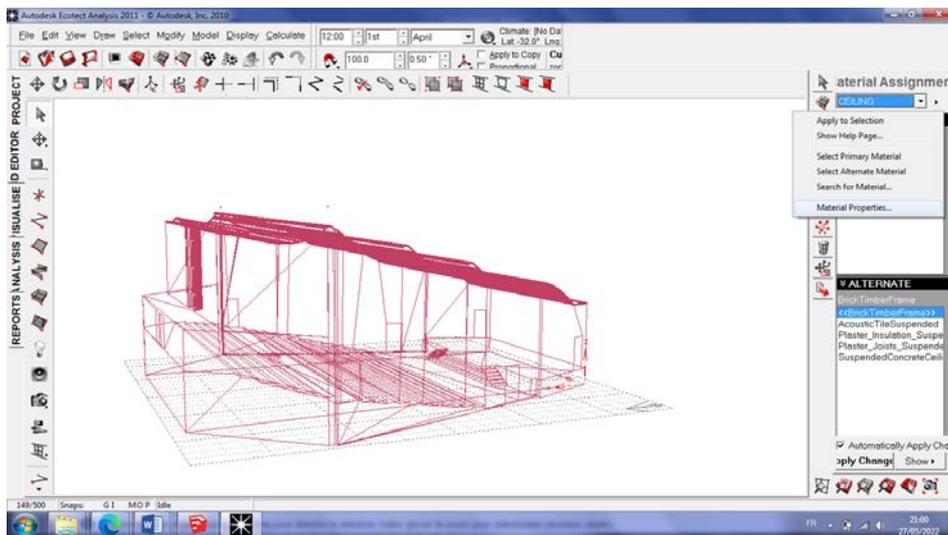


Figure IV-5: Insertion des matériaux (Source : Auteur, 2022)

IV.3.4. Définition de la source

Dans cette étape nous devons insérer la source sonore et sa direction pour que nous puissions faire le calcul.

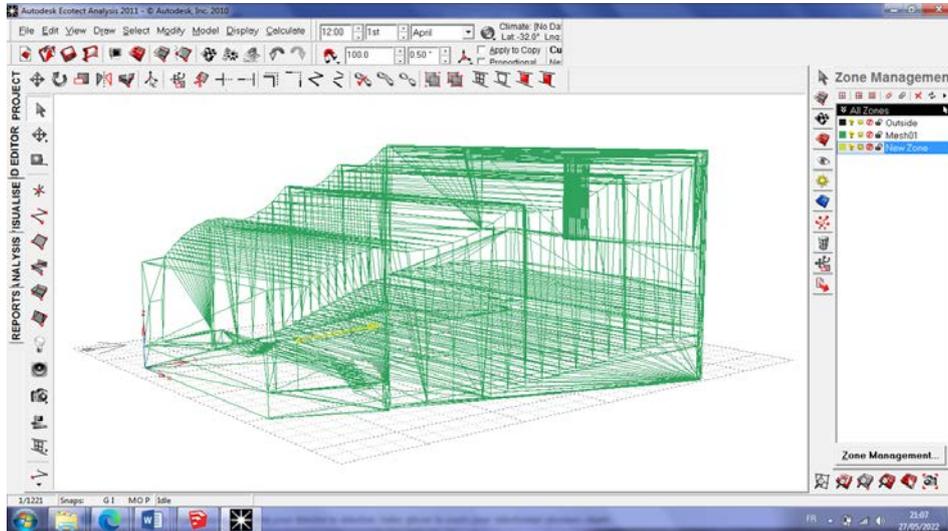


Figure IV-6: Définition de la source (Source : Auteur, 2022)

IV.3.5. Analyse acoustique

En obtenant la durée de réverbération en appuyant sur l'onglet analyse, premièrement en calcul de volume après en introduit de nombre des places dans l'auditorium et le type de siège (Figure IV-7).

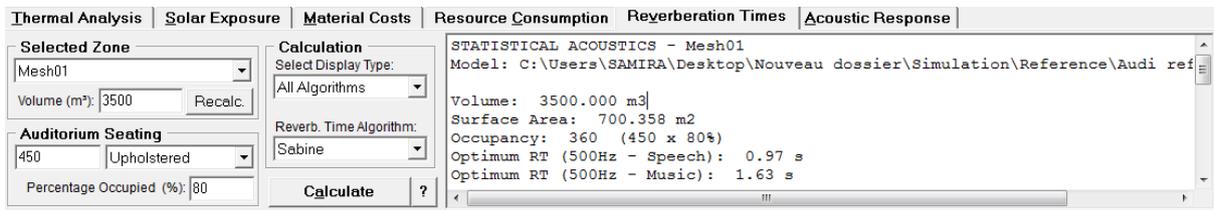


Figure IV-7: La durée de réverbération (Source : Auteur, 2022)

Pour l'analyse acoustique elle se trouve dans l'onglet acoustique réponse, et on a trois option pour la visualiser ; réponse impulsionnelle, réverbération estimée et rayons/particules existants (Figure IV-8).



Figure IV-8: Analyse acoustique (Source : Auteur, 2022)

Pour la propagation du son dans l'espace on peut la visualiser par animation par des rayons, des particules ou bien on peut visualiser les surfaces incidentes, par l'emploi des couleurs et une légende (Figure IV-9).

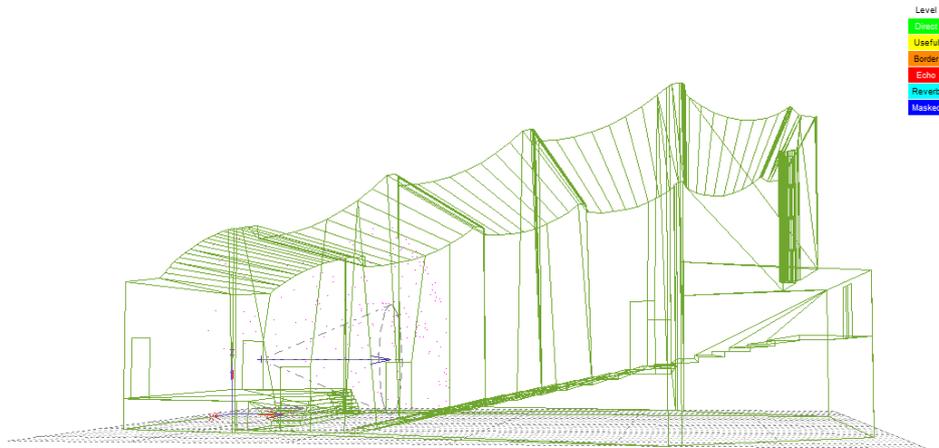


Figure IV-9: La propagation du son représenté par particules animées (Source : Auteur, 2022)

IV.4 Étude paramétrique de l'auditorium

IV.4.1. Modèle de référence

Le modèle de référence représente l'auditorium de Djaafri Saadi avec tous ces détails de construction et les matériaux utilisés (voir chapitre III) qui est illustré dans la figure IV-10.

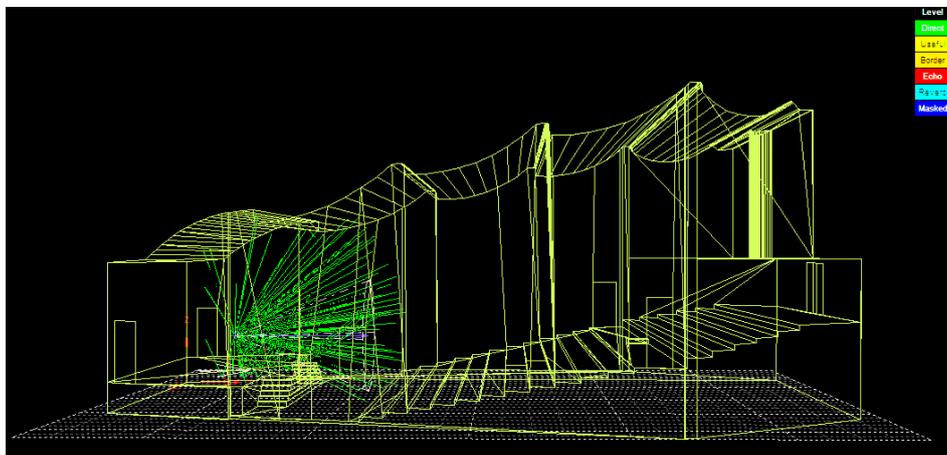


Figure IV-10: Modèle de référence (Source : Auteur, 2022)

Cette figure représente la géométrie de l'auditorium dans l'Ecotect après insertion des matériaux appropriés avec caractéristiques acoustiques (annexe A) et la source sonore.

IV.4.2. Étude de l'impact de la forme

Après visualisation du modèle de référence nous voulons tester l'influence de la forme des parois et du plafond sur la propagation du son dans l'auditorium

a) Forme des parois rectangulaires

Dans cette simulation on va utiliser le modèle de référence mais en changeant la forme de l'auditorium en forme rectangulaire pour voir l'impact de la forme des parois sur la propagation du son, la figure ci-dessous représente l'auditorium avec une forme rectangulaire.

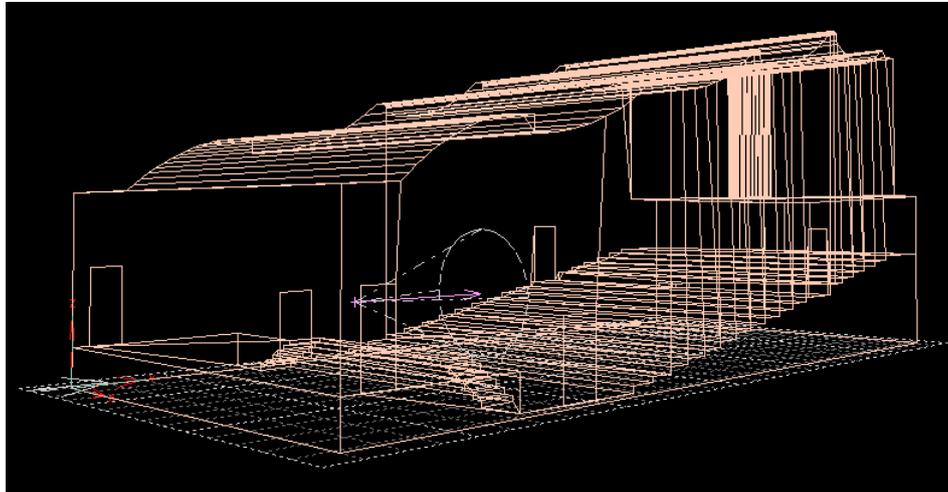


Figure IV-11: Forme rectangulaire de l'auditorium (Source : Auteur, 2022)

Dans cette simulation on va changer la forme tout en gardant les matériaux utilisés dans le modèle de référence pour voir l'influence de la forme.

b) Forme du plafond incliné

Dans cette simulation on va utiliser le modèle de référence mais avec une forme simple et inclinée du plafond (voir figure IV-12) pour voir l'impact de la forme de plafond sur la propagation du son.

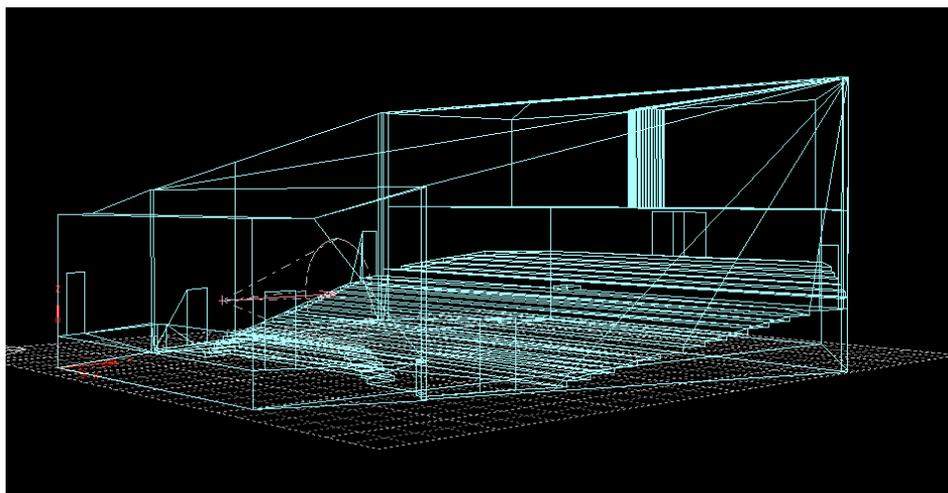


Figure IV-12: Forme inclinée du plafond de l'auditorium (Source : Auteur, 2022)

IV.4.3. Étude de l'impact des matériaux

Après avoir visionné le modèle de référence, nous avons noté les déficiences de l'auditorium telles que la longueur de la variation a l'effet de masque, dans ce modèle on va changer les matériaux des parois pour proposer une solution afin d'améliorer la performance acoustique de l'auditorium.

a) Parois avec isolant en cellulose

D'après l'étude empirique l'auditorium a une mauvaise isolation acoustique, notre intervention sera sur la composition de la parois en ajoutant un isolant cellulose 45mm renforcé par 30mm de liège et plaque de plâtre, le tableau IV-1 illustre les résultats obtenus sur le bruit d'impact et bruit aérien après l'ajout de cellulose et le tableau IV-2 représente les caractéristiques d'absorptions acoustiques de cellulose et laine de verre.

Tableau IV-1 : Résultat après déduction de la mesure du bruit ambiant constant

(Source : Beaumier, 2006)

Épaisseur	BRUITS D'IMPACT ATENUATION EN dB			Moyenne	BRUITS AERIENS ATENUATION EN dB			Moyenne
	Basses Fréq	Moyennes Fréq	Hautes Fréq		Basses Fréq	Moyennes Fréq	Hautes Fréq	
45	31	42	44	39	30	43	46	40
60	35	43	47	42	33	43	48	41
100	45	49	49	48	48	49	51	49

Tableau IV-2 : Performance acoustique de cellulose (Source : Beaumier ,2006)

Coefficient d'absorption	Fréquence en Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Laine de verre	0.20	0.36	0.64	0.81	0.90	0.94
Cellulose	0.25	0.68	1.17	1.09	1.14	1.13

b) Plafonds avec panneaux acoustique

Notre intervention sera au niveau du plafonds en ajoutant des panneaux acoustiques le tableau ci-dessous illustre les performances acoustiques des panneaux acoustique.

Tableau IV -3 :Performance acoustique panneaux acoustique (Source : Wuyts, 2019)

Coefficient d'absorption	Fréquence en Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Panneaux acoustique	0.3	0.5	0.6	0.9	0.9	0.85	0.80	0.75

IV.5 Résultats et discussion

IV.5.1. Résultat et interprétation de modèle de référence

Les figure ci-dessous représente la propagation du son par des rayons animés colorées les rayons verts présentent un son direct, les rayons jaunes représentent un son utile, les rayons cyan représentent une réverbération et les rayons bleus représentent un son masqué, la propagation des rayons sonores est en fonction du temps (milliseconde).

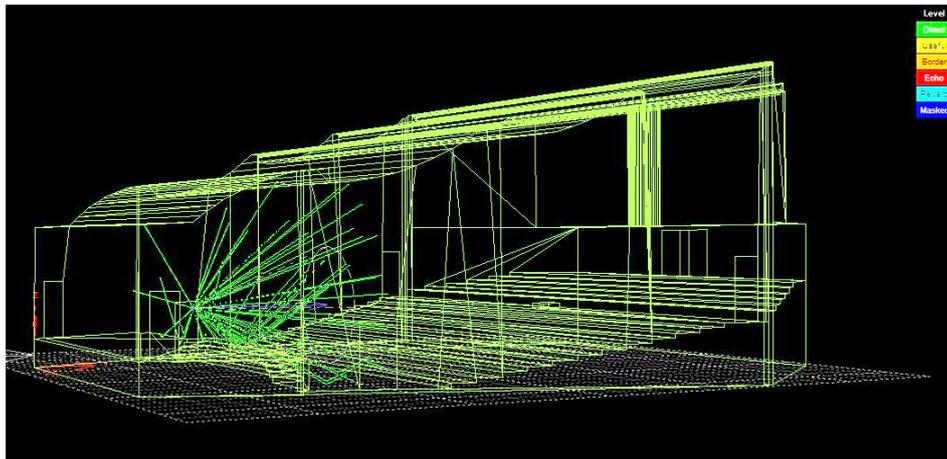


Figure IV-13: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 20ms (Source : Auteur, 2022)

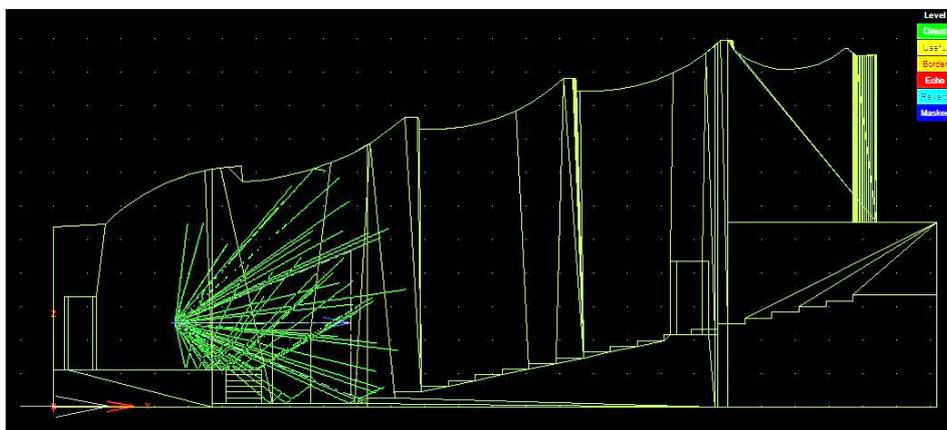


Figure IV-14: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 20ms (Source : Auteur, 2022)

Après 20 millisecondes, la figure illustre la propagation du son seulement en rayons verts le récepteur reçoit un son direct de la source sonore placé sous la scène.

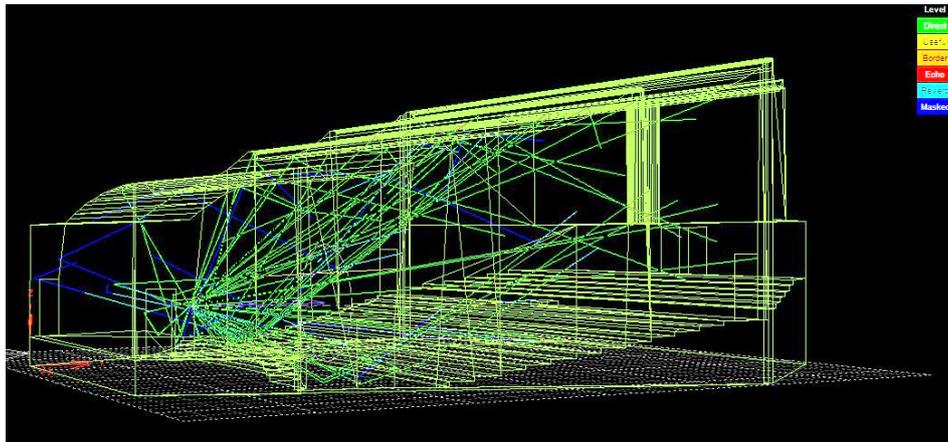


Figure IV-15: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 60ms (Source : Auteur, 2022)

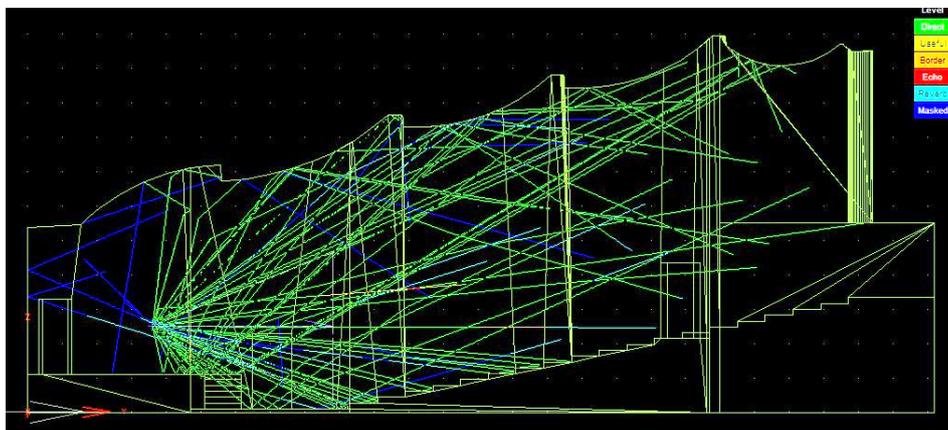


Figure IV-16: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 60ms (Source : Auteur, 2022)

Après 60 millisecondes, on remarque toujours l'existence de son direct ce dernier se reflète en arrière scène en produisant un son masqué et on remarque l'apparition des rayons réverbéré et peu de rayon de son utile.

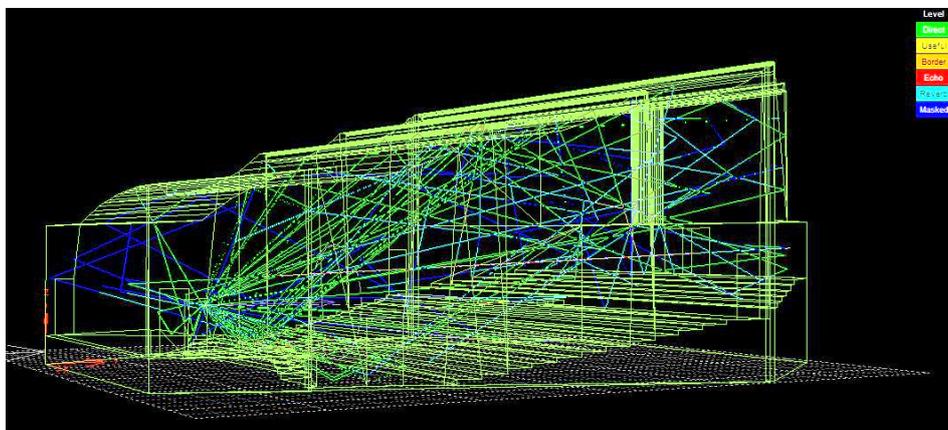


Figure IV-17: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms (Source : Auteur, 2022)

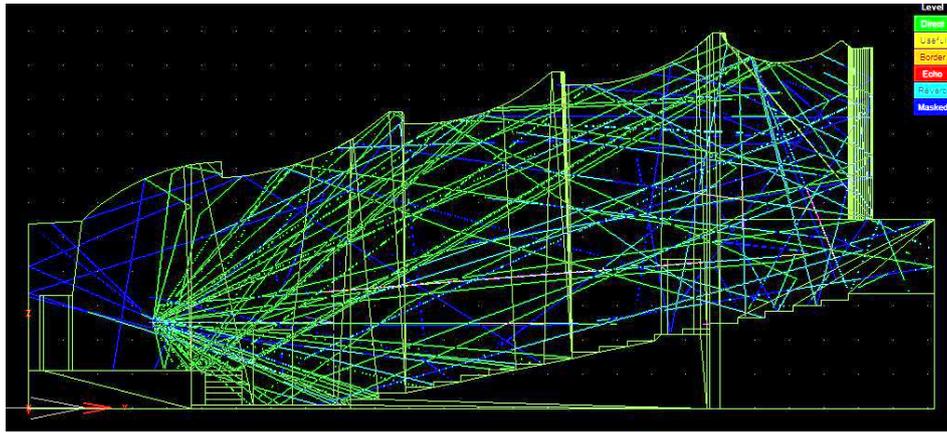


Figure IV-18: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms (Source : Auteur, 2022)

Après 100 millisecondes, on remarque la présence du son direct, du son masqué et du son réverbéré, on constate que le son direct frappe les parois et le plafond se transforme en un son réverbéré qui à son tour devient un son masqué qui correspond à un son a une fréquence inaudible.

La figure ci-dessous représente la variation des ondes sonore dans l'auditorium en fonction du temps.

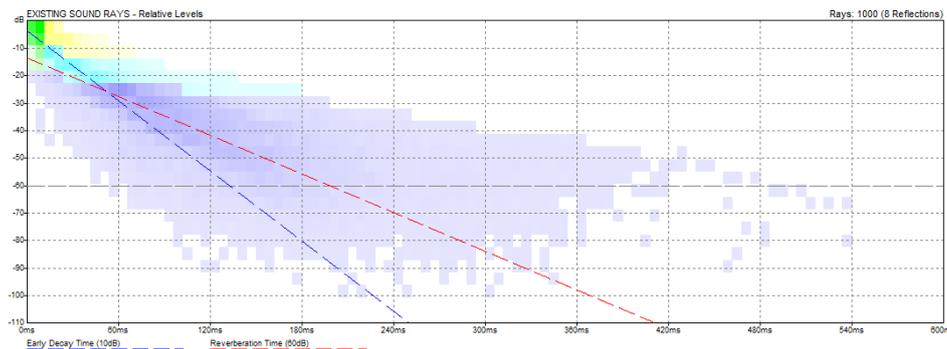


Figure VI-19: Variation des ondes sonore en fonction du temps (Source : Auteur, 2022)

On remarque que la variation du son direct est faible aux environs de 20 millisecondes et que la variation du son réverbéré persiste jusqu'à 180 millisecondes tandis que la variation du son masqué présente la plus grande variation qui se manifeste jusqu'à 360 millisecondes puis commence à se disperser.

Nous sommes parvenus à révéler à travers cette étude une irrégularité du son dans l'espace; les points proches de la source sonore reçoivent un son direct et un son réfléchi, ce qui justifie les résultats obtenus dans l'étude empirique (augmentation du niveau sonore dans les points proches de la source) tandis que les points situés à distance de la source sonore reçoivent un son réverbéré , ainsi que l'absence de son utile, ce qui explique les résultats de l'étude quantitative ; les auditeurs n'entendent pas leurs interlocuteurs.

IV.5.2. Résultat et interprétation de modèle simulé avec parois rectangulaire

Les résultats de la simulation du modèle de référence ont montré les défaillances qui se trouvent au niveau de l'auditorium comme la longueur des rayons sonores qui ont provoqué la réverbération et le son masqué à travers cette modification de la forme des murs. Nous allons essayer de proposer quelques solutions pour améliorer la performance acoustique de l'auditorium les figure ci-dessous représente la propagation du son dans l'auditorium après 100 millisecondes.

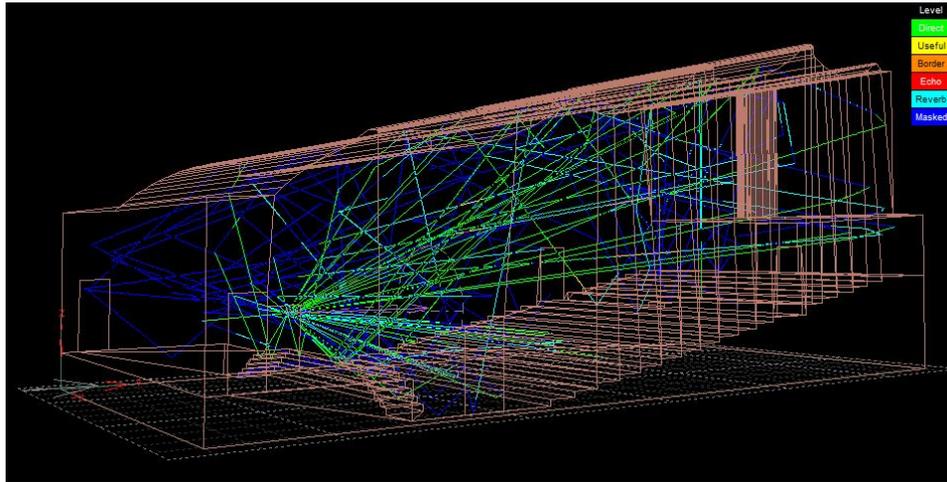


Figure IV-20: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de la forme des parois rectangulaire après 100ms (Source : Auteur, 2022)

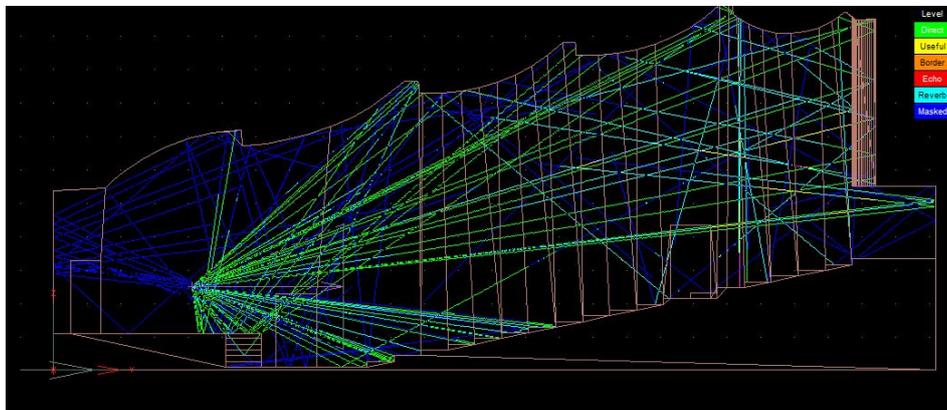


Figure IV-21: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de la forme des parois rectangulaire après 100ms (Source : Auteur, 2022)

Après 100 millisecondes, on remarque la présence du son direct plus concrète que dans le modèle de référencées, et la diminution des rayons réverbère, La figure ci-dessous représente la variation des ondes sonores dans l'auditorium en fonction du temps.

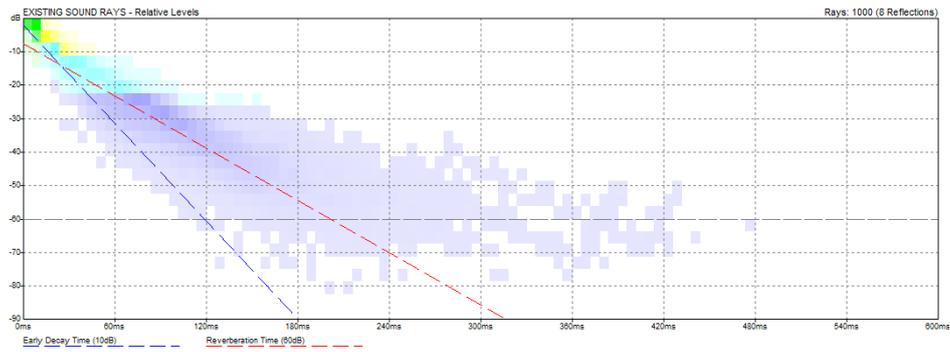


Figure IV-22: Variation des ondes sonore en fonction du temps (Source : Auteur, 2022)

On remarque que les ondes sonores masqué sont réduites et ils ont tendance à se dissiper après 240 milliseconde. Ils prennent moins de temps par apport au premier cas ; et le rayon réverbère disparaisse après 90 milliseconde.

En ce qui concerne la forme des parois de l'auditorium, ces dernières ne doivent pas comporter de décrochements pour minimiser la réflexion des ondes sonores.

IV.5.3. Résultat et interprétation de modèle simulé avec plafond incliné

Dans le modèle de référence on a constaté que le plafond incliné et courbé reflète trop les rayons sonores ce qui provoque des rayons réverbérés et des rayons masqués et à travers ce changement de la forme du plafond en essayant de trouver une solution pour améliorer la performance acoustique de l'auditorium, les figures ci-dessous représentent la propagation du son après 100 millisecondes, en laissant le plafond comme seul réflecteur.

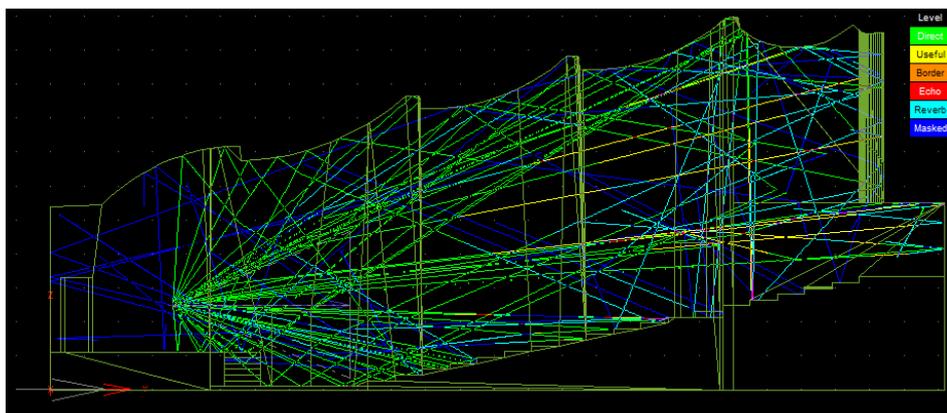


Figure IV-23: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms (Source : Auteur, 2022)

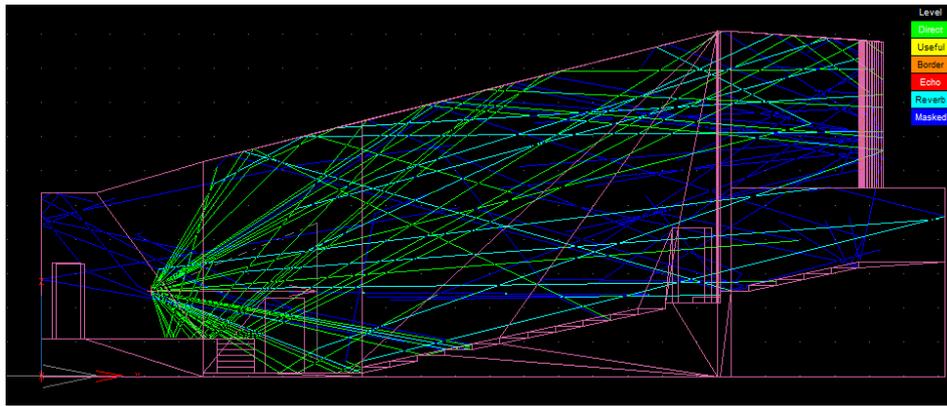


Figure IV-24: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de la forme inclinée de plafond après 100ms (Source : Auteur, 2022)

En comparant ces deux figures après 100 milliseconde en remarque que les rayons dans la forme du plafond inclinée se propage d'une manière plus régulière que celle de la forme de modèle de référence qui présente trop de réflexion.

Une forme de plafond inclinée favorise mieux l'écoute que la forme inclinée courbe en permettant à l'onde sonore de se propager de façon homogène à tous les points de l'auditorium

IV.5.4. Résultat et interprétation de modèle simulé avec isolant en cellulose

Pour résoudre les problèmes détecter au niveau de l'auditorium nous proposant des modifications des matériaux au niveau des parois la figure ci-dessous représente la variation des ondes sonore en fonction du temps.

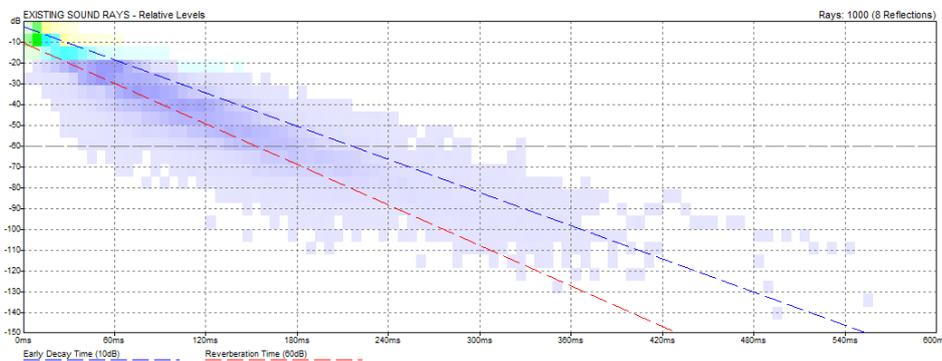


Figure IV-25: Variation des ondes sonore en fonction du temps (Source : Auteur, 2022)

La figure révèle que dans l'auditorium en présence d'un traitement acoustique "cellulose avec liège", une diminution de l'effet de masque, qui résulte de l'absorption de ces rayons par l'isolant alors une amélioration dans la qualité du son propagée dans L'auditorium.

L'ajout de cellulose avec du liège en tant qu'isolant à un impact favorable sur le niveau d'audition dans l'auditorium, ce qui garantit une bonne intelligibilité du son et augmente le confort acoustique dans ce dernier.

IV.5.5. Résultat et interprétation de modèle simulé avec panneaux acoustique

Afin de résoudre les défaillances constatées au niveau de l'auditorium nous suggérons la modification des matériaux au niveau du plafond en ajoutant des panneaux acoustiques, la figure ci-dessous représente la variation des ondes sonores en fonction du temps.

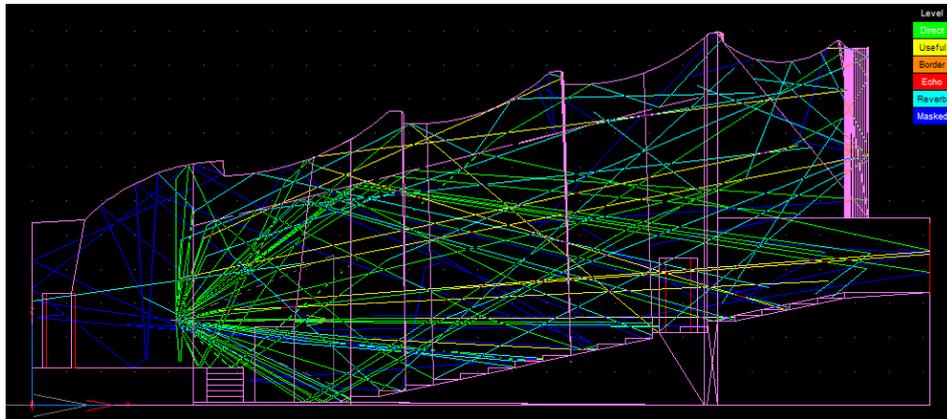


Figure IV-26: Vue latérale de la propagation du son suite à l'ajout des panneaux acoustiques après 100ms (Source : Auteur, 2022)

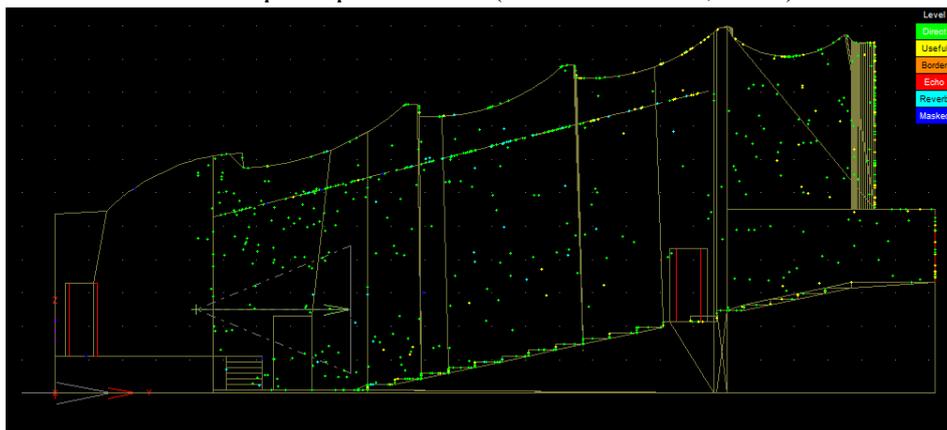


Figure IV-27: Vue latérale de la propagation du son par surface incidente suite à l'ajout des panneaux acoustiques après 100ms (Source : Auteur, 2022)

L'ajout des panneaux acoustique a niveau du plafond a permet de contrôler la réverbération des sons à l'intérieur de l'auditorium, de façon à atténuer certaines fréquences polluantes et rayons masqué.

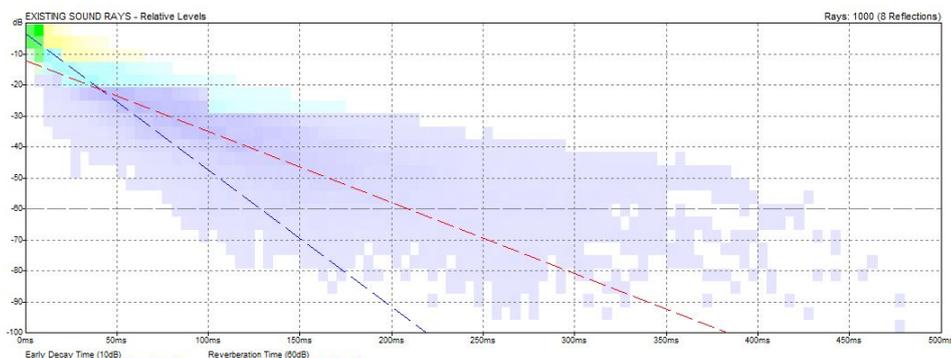


Figure IV-28: Variation des ondes sonore en fonction du temps (Source : Auteur, 2022)

La figure révèle que dans l'auditorium en présence d'un traitement acoustique "panneau acoustique", une diminution de l'effet de masque, qui résulte de l'absorption de ces rayons par l'isolant alors une amélioration dans la qualité du son propagée dans L'auditorium.

Conclusion

La simulation numérique nous a fourni la possibilité de visualiser et de résoudre les défaillances acoustiques de l'auditorium de façon sûre et performante. Il s'agit en effet d'une technique d'analyse importante qui nous a amené à proposer des solutions intéressantes en offrant une vision nette du problème de l'auditorium à l'aide du logiciel de simulation Ecotect.

Les résultats de la simulation numérique nous ont permis de cerner le problème majeur de qualité sonore dans l'auditorium. C'est la réflexion excessive des ondes sonores qui engendre une perturbation de l'intelligibilité du son car l'auditeur reçoit en même temps le son direct et le son réfléchi ce qui présente une incohérence dans la netteté du son. La cause de la réverbération est la forme de l'auditorium et les matériaux de construction utilisés.

Pour la conception d'un auditorium ayant une excellente performance acoustique, il est indispensable de combiner la bonne forme, car les propriétés géométriques ont une incidence directe sur la propagation des ondes sonores, et les matériaux qui permettront d'atteindre un bon niveau de clarté de la parole dans l'auditorium.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de mettre en évidence ce qui est négligé et de le comprendre pour l'exploiter, il s'agit de la conception acoustique. Qui est un sujet complexe et un vaste domaine qui exige au concepteur une bonne compréhension des principes et des techniques acoustiques disponibles afin d'être en mesure de développer les solutions appropriées dès la conception du projet.

Cette recherche se concentre sur le confort acoustique et prend l'auditorium de l'université comme cas d'étude. Cet équipement a un grand intérêt et nécessite une performance acoustique impeccable pour garantir la netteté de son. L'une des principales questions de la recherche était de connaître les solutions de conception architecturale qui favorisent une bonne qualité sonore dans l'auditorium. L'hypothèse proposée pour répondre à cette question est de vérifier si la forme géométrique et les matériaux de construction permettent un confort acoustique aux auditeurs.

Cette recherche nous a permis de bien comprendre l'acoustique architecturale en clarifiant tout d'abord les notions de base du son sachant que les caractéristiques d'un auditorium influencent la façon dont les vibrations sonores se propagent dans l'espace et affectent les personnes qui l'utilisent. Ensuite, de comprendre les notions de base du bruit car il est essentiel de ne pas négliger l'effet du bruit ambiant sur l'acoustique d'un bâtiment. Ainsi de bien cerner les principes du confort acoustique qui comprend les principes d'isolation acoustique de construction contre les diverses nuisances sonores et les principes de base de la correction acoustique qui fait appel au traitement de l'absorption sonore afin d'atténuer les phénomènes de réverbération. Le traitement acoustique d'un auditorium vise à assurer la meilleure qualité d'écoute aux auditeurs, ce qui dépend des qualités des matériaux intérieurs de toutes les parois et principalement de leur capacité de réfléchir et d'absorber les sons, Les aménagements intérieurs et le mobilier ont aussi leurs impacts sur la limitation de la réverbération de son.

L'étude empirique nous a permis de mieux cerner les phénomènes sonores dans l'auditorium à travers une étude quantitative qui a été établie par des prises de mesures in-situ à l'aide d'une application Androide "sonomètre", d'après les résultats obtenus l'auditorium a une qualité acoustique acceptable avec quelques problèmes, on a constaté une augmentation de niveau sonore jusqu'à 81 dB à côté des sources sonores liés à la réflexion excessive des ondes sonores qui cause une réverbération puis afin de renforcer notre étude et aboutir à des solutions techniques nous avons effectué une étude qualitative cette étude a confirmé les résultats

obtenus de l'étude quantitative, selon les données obtenues par le questionnaire, 83% des personnes interrogés ont affirmé que l'auditorium nécessite une étude acoustique afin de remédier à la qualité sonore déficiente et ce pour plusieurs raisons, la présence de nuisances sonores au sein de l'auditorium, la transmission des bruits extérieurs à l'intérieur, présence de la réverbération qui est peut-être causée par la forme ou les matériaux de construction utilisés.

Enfin la simulation numérique à l'aide du logiciel Ecotect nous a fourni la possibilité de visualiser et de résoudre les défaillances acoustiques de l'auditorium de façon sûre et performante. Les résultats de la simulation numérique nous ont permis de cerner le problème majeur de qualité sonore dans l'auditorium. C'est la réflexion excessive des ondes sonores qui engendre une perturbation de l'intelligibilité du son, Pour la conception d'un auditorium ayant une excellente performance acoustique, il est indispensable de combiner la bonne forme, car les propriétés géométriques ont une incidence directe sur la propagation des ondes sonores, et les matériaux qui permettront d'atteindre un bon niveau de clarté de la parole dans l'auditorium.

Recommandations

À travers cette recherche nous avons pu tirer des recommandés à prendre en considération afin d'améliorer le confort acoustique dans les auditoriums:

- L'utilisation d'un logiciel de simulation comme (Ecotect) pour effectuer une étude acoustique au préalable, en vue de sélectionner les formes et les matériaux adéquats pour obtenir une bonne qualité sonore.
- L'utilisation de plafond avec une forme inclinée tous en assurant l'équilibre entre l'emploi des matériaux réfléchissant et absorbants.
- Il y a une possibilité aussi d'utiliser la forme courbe de toiture avec l'intégration des réflecteurs au plafond.
- Pour les parois latérales il faut éviter les décrochements afin de diminuer la réflexion des rayons sonore.
- Pour les matériaux des parois intérieur il faut l'emploi des matériaux absorbant et en plus l'utilisation des matériaux isolant pour l'isolation entre l'intérieur et l'extérieur.

- Pour la paroi qui se trouve derrière la source sonore il faut l'emploi des matériaux réfléchissants dans face intérieure.
- Pour les parois qui se trouve en face de la source sonore il est indispensable d'utilise des matériaux absorbant.
- Pour le plancher il faut l'emplois des revêtements absorbants.
- Pour les sièges et le mobilier il faut utilisée des matériaux absorbants.

Ces recommandations vont permettre aux architectes de choisir la forme géométrique adéquate et les matériaux les plus adaptés pour garantir une propagation harmonieuse du son dans l'auditorium afin d'assurer le confort acoustique aux auditeurs.

Les limites de la recherche

Le but de ce travail est de déterminer l'influence des matériaux et de la forme sur le confort acoustique dans les auditoriums par l'élaboration d'une étude empirique et une étude numérique afin de déterminer l'influence de ces dernières sur le confort acoustique mais le manque de moyens de prise de mesure été un obstacle, ce qui nous a conduit à faire recours à l'utilisation d'une application Android pour effectuer des mesures empiriques.

Le manque de moyens matériels qui pourraient nous donner un accès à des logiciels de simulation plus perfectionnés comme Odéon et Catt-acoustique.

Ainsi que le temps limité qui nous a aussi poussé à limiter le nombre des modèles dans la simulation numérique qui aurait pu nous fournir la possibilité de comprendre l'influence de chaque détail constructif sur le comportement acoustique de l'auditorium et aurait constitué une contribution précieuse.

Perspectives de recherche

En guise de recherches futures à développer, les résultats obtenus démontrent l'influence de l'étude acoustique préalablement réalisée afin de sélectionner des formes et des matériaux appropriés permettant de garantir une bonne qualité sonore au sein de l'espaces architectural. Cette recherche ouvrir la voie à plusieurs perspectives notamment :

D'étendre le champ de cette étude à d'autres équipements dédiés au grand public tels que les salles de concert, les salles de spectacles, les amphithéâtres, etc.

Influence des isolants et réflecteur sur la propagation du son dans les auditoriums.

Bibliographie

- Association Qualitel. (2018). *Guide acoustique et rénovation- Améliorer l'acoustique des logements*. Récupéré sur www.qualite-logement.org
- Champilou, V., & Coutant, B. (2018). *Correction acoustique des salles de TD 3N21 et 3N22 : vers une solution "tout bois"*. Université Henri Poincaré.
- Cloud, C. (2015). *Acoustique du bâtiment et de l'environnement*. Récupéré sur www.general-acoustics.fr
- Corporation, O. (2022). *Guide de l'utilisateur*. Récupéré sur Originlab: <https://www.originlab.com/>
- Cowan, J. P. (2016). *The Effects of Sound on People-Wiley*. John Wiley & Sons, Ltd.
- DE SA , C., & Horsin Molinaro, H. (2017). *Conception acoustique d'une salle-Intérêt du prototypage et principe de conception de maquette*. Récupéré sur <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan>
- Gramez , A. (2019). Analyse par la perception sonore de la propagation du son à l'intérieur d'une salle. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Récupéré sur <http://repository.usthb.dz/xmlui/handle/123456789/8328>
- Gramez, A. (Avril 2010). Étude du comportement acoustique des salles. *10ème Congrès Français d'Acoustique*. Lyon.
- Gramez, A. (Avril 2010). Introduction à la réglementation acoustique Algérienne et la réhabilitation acoustique des façades. *10ème Congrès Français d'Acoustique*. Lyon.
- Hamayon, L. (2013). *Réussir l'acoustique d'un bâtiment* (éd. 3e édition). Edition Le Moniteur.
- Hamayon, L. (2014). *Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments* (éd. 3e édition). Edition Le Moniteur.
- Jedidi, M., & Soussi, C. (2013). *Acoustique du bâtiment: Cours et exercices corrigés*. Récupéré sur www.researchgate.net/publication/291697557
- Lahaye, J.-P., Mersch, S., De Vroey, D., Adnet , M.-N., Saelmackers, F., Mulnard, A., . . . Wagelmans, J. (2021). *Le point sur l'isolation acoustique*. Centre de Référence professionnelle bruxellois, Bruxelles-Environnement, Eco-construction, Innoviris.
- Luquet, P., & Aflato, E. (2005). L'évolution de l'instrumentation : Les outils de la mesure acoustique. *Acoustique & technique*(N°42-43), p. 4.
- Matthieu, E. (2016). *Confort acoustique des bâtiments (les grandes notions)*. Cerema.
- Muller, B., & Mommertz, E. (2009). *Acoustics and Sound Insulation: Principles, Planning, Examples*. Birkhäuser.
- Neufert, E. (2009). *Neufert, Ernst: Les elements des projets de construction*. (1. e. édition, Éd., K. Ansquer, Y. Benderitter, U. Benderitter, J. Helwig, P. Helwig, U. Keller, . . . Y. Minssart, Trads.) Dunod.

Rapin, J.-M. (2017). *L'acoustique du bâtiment-Manuel professionnel d'entretien et de réhabilitation*. Éditions Eyrolles.

Recommandation pratique css05. (2008). *Assurer le confort acoustique*. Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments.

Veritas, B. (2015). *Isolation thermique et acoustique des bâtiments: Réglementation, produits, mise en oeuvre*. Le Moniteur.

Wuyts, D. (2019). *Acoustique: Conception et mise en oeuvre*. environnement brussels.

Annexes

Annexe A : Tableau de valeurs de coefficients d'absorption Sabine de différents matériaux

Types de matériaux	Bandes d'octave(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Laine minérale : densité 100 kg/m ³ , épaisseur 50mm	0.27	0.62	0.88	0.93	0.81	0.76
Mousse de polyuréthane floquée : épaisseur 15 mm	0.13	0.13	0.24	0.70	0.77	0.68
Mousse plastique d'urée formol : densité 230 kg/m ³ , épaisseur 20 mm	0.14	0.19	0.31	0.62	0.81	0.72
Plâtre perforé régulièrement: diamètre de perforation 6mm, épaisseur 12mm sur laine minérale d'épaisseur 18mm	0.10	0.19	0.42	0.74	0.57	0.34
Plâtre perforé régulièrement: trous de 20,11 et 6mm de diamètre, épaisseur 7mm sur laine minérale d'épaisseur 13mm	0.05	0.18	0.61	0.68	0.39	0.30
Tôle 20/10 perforée à 15% : sur laine minérale d'épaisseur 30mm	0.26	0.33	0.56	0.79	0.65	0.45
Métal déployé (perforée a 20 %): sur laine minérale d'épaisseur 30mm	0.61	0.75	0.73	0.70	0.76	0.67
Bac de polystyrène expansé avec perforation carrées de 15x15mm : sur laine minérale de 50mm et vide d'air de 10cm	0.38	0.64	0.68	0.63	0.69	0.53
Bois verni	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Chaux sur lattis en bois	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
Crépi	0.01	0.03	0.04	0.05	0.08	0.17

Types de matériaux	Bandes d'octave(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Marbre	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Plâtre	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.08
Brique peintes	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Brique brutes	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07
Vitre	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Crin de jute	0.05	0.07	0.18	0.65	0.75	0.71
Linoléum	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
Linoléum sur Isorel	0.04	0.06	0.08	0.12	0.04	0.04
Parquet	0.03	0.04	0.08	0.12	0.12	0.17
Tapis caoutchouc 6.5mm	0.04	0.04	0.08	0.12	0.10	0.10
Tapis liège 20mm ciré et poli	0.04	0.03	0.05	0.11	0.07	0.02
Tapis liège brut 20mm	0.04	0.03	0.08	0.18	0.21	0.22
Tapis moquette dur thibaude	0.14	0.32	0.45	0.45	0.40	0.35
Draperie coton contre mur	0.04	0.05	0.11	0.18	0.30	0.44
Draperie coton plis serrés	0.10	0.38	0.50	0.85	0.32	0.67
Tissu amiante a 20cm du mur	0.15	0.20	0.30	0.20	0.33	0.35
Feutre 12mm flottant	0.17	0.24	0.35	0.50	0.65	0.65
Velours à 10 cm du mur	0.09	0.33	0.45	0.52	0.50	0.44
Velours à 20 cm du mur	0.12	0.36	0.45	0.52	0.50	0.44
Aggloméré de liège	0.15	0.26	0.22	0.22	0.20	0.20
Amiante projeté 25 mm	0.20	0.55	0.58	0.59	0.59	0.59
Contreplaqué 5mm a 20mm du mur	0.07	0.12	0.28	0.11	0.08	0.08
Contreplaqué 5mm a 50mm du mur	0.47	0.34	0.30	0.11	0.08	0.08
Feutre 25mm collé	0.12	0.25	0.49	0.63	0.65	0.60
Laine minérale 40mm agglomérée	0.30	0.70	0.88	0.85	0.65	0.60
Laine minérale recouverte de papier kraft	0.74	0.54	0.36	0.32	0.30	0.17
Laine de verre 25mm	0.15	0.38	0.60	0.64	0.62	0.62
Laine de verre sur treillage métallique flottant	0.45	0.45	0.45	0.50	0.52	0.52

Types de matériaux	Bandes d'octave(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Laine de verre 50mm recouverte de toile poreuse	0.39	0.45	0.56	0.59	0.61	0.55
Laine de lin	0.09	0.18	0.48	0.73	0.50	0.33

Annexe B : Dossier technique de l'auditorium Djaafri Saadi

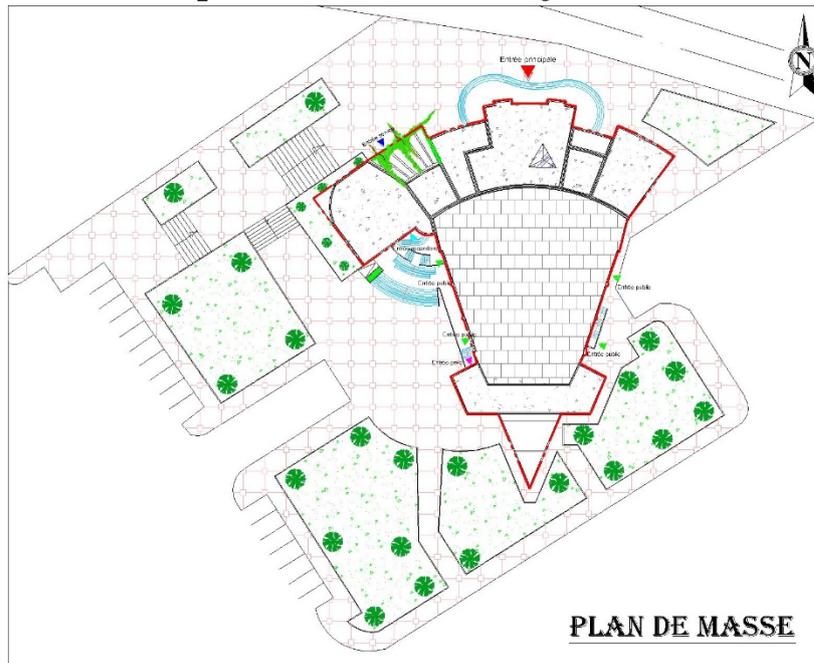


Figure B-1: Plan de masse (Source: Auteur, 2022)

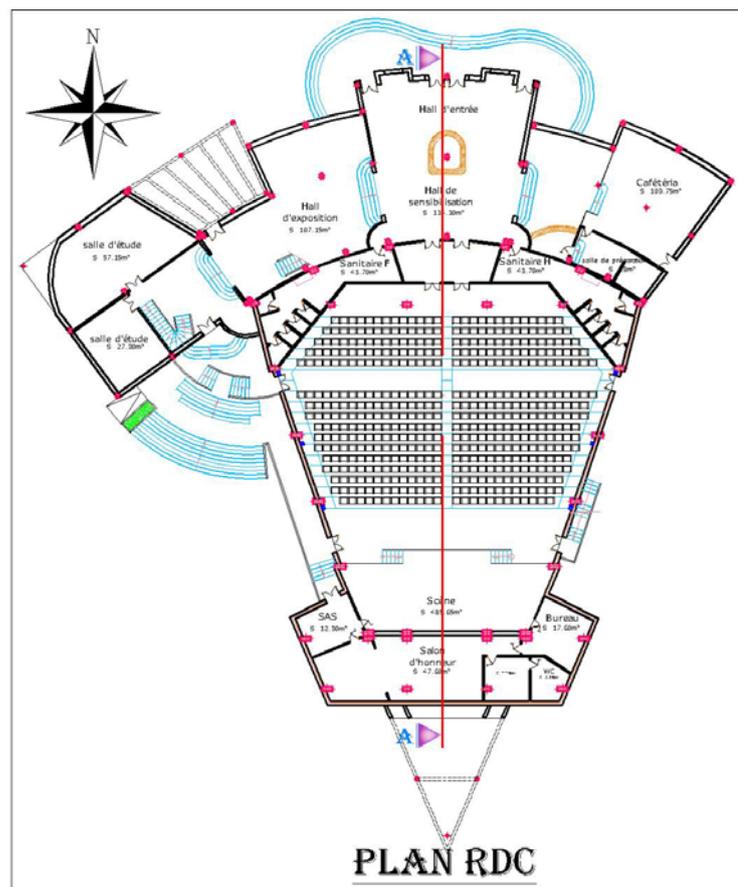


Figure B-2 : Plan de RDC (Source: Auteur, 2022)

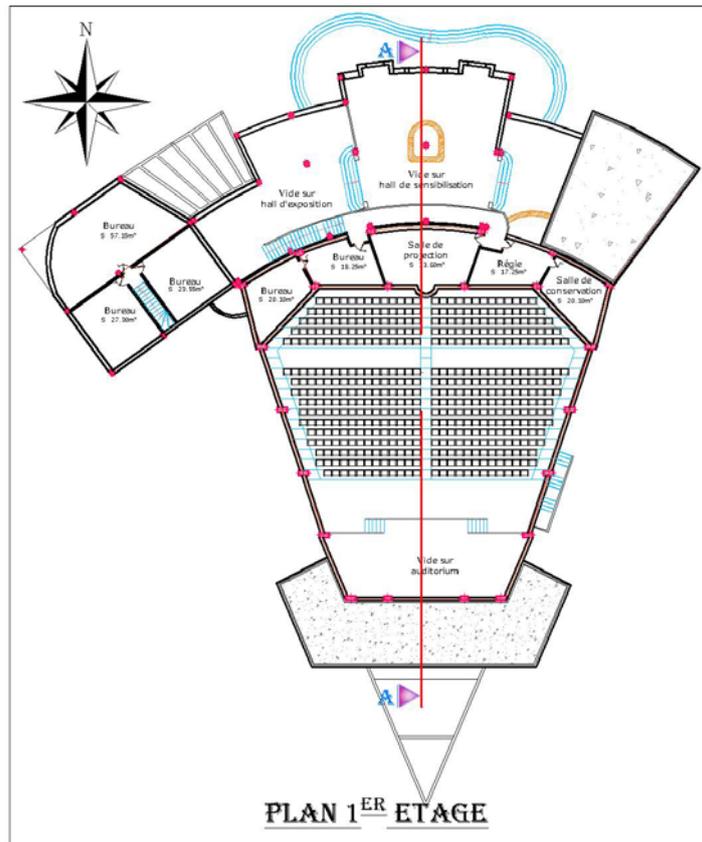


Figure B-3: Plan 1^{er} étage (Source: Auteur, 2022)

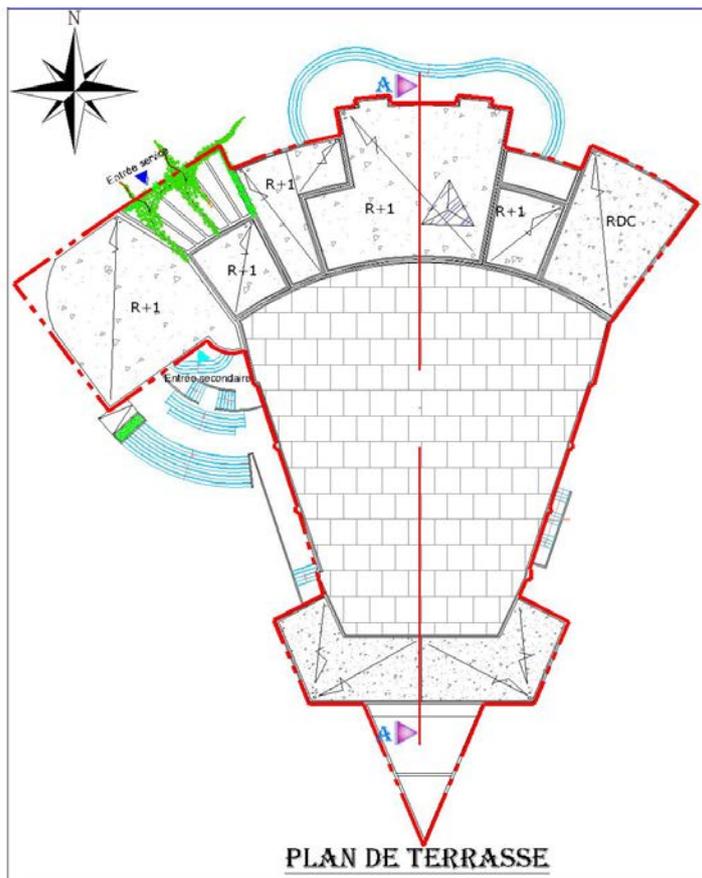


Figure B-4: Plan de terrasse (Source: Auteur, 2022)

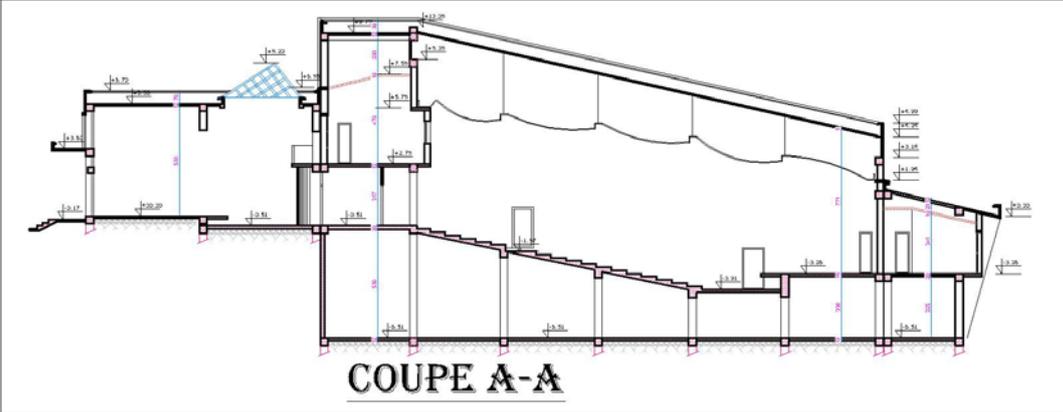


Figure B-5 : Coupe A-A(Source: Auteur, 2022)

Annexe C : Résultat de prise de mesure de l'étude empirique

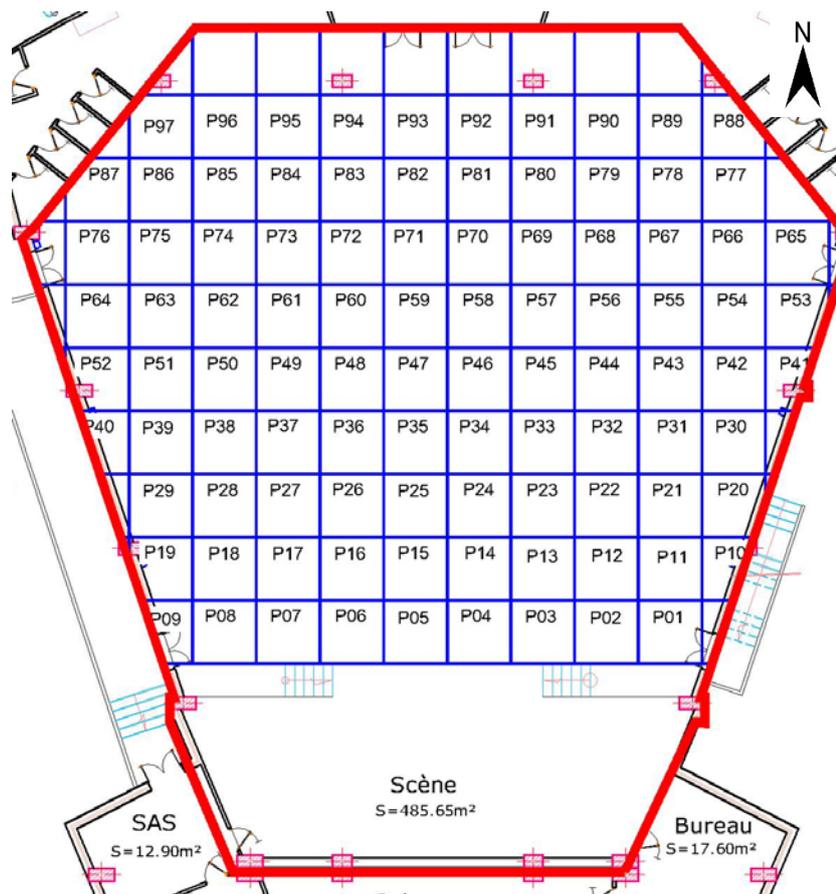


Figure C-1: Plan de l'auditorium avec les points de mesure (Source :Auteur, 2022)

POINT	MESURE								
P01	36	P21	36	P41	38	P61	42	P81	38
P02	36	P22	36	P42	37	P62	42	P82	38
P03	36	P23	37	P43	38	P63	42	P83	38
P04	37	P24	38	P44	38	P64	42	P84	38
P05	38	P25	37	P45	38	P65	38	P85	39
P06	37	P26	37	P46	39	P66	38	P86	40
P07	38	P27	37	P47	40	P67	39	P87	41
P08	37	P28	37	P48	40	P68	37	P88	39
P09	40	P29	39	P49	39	P69	37	P89	38
P10	40	P30	40	P50	40	P70	37	P90	37
P11	37	P31	39	P51	40	P71	38	P91	38
P12	37	P32	38	P52	40	P72	38	P92	38
P13	38	P33	37	P53	45	P73	37	P93	38
P14	38	P34	38	P54	40	P74	37	P94	38
P15	37	P35	38	P55	39	P75	38	P95	39
P16	38	P36	38	P56	37	P76	42	P96	40
P17	38	P37	40	P57	38	P77	38	P97	41
P18	38	P38	40	P58	39	P78	37		
P19	40	P39	39	P59	39	P79	38		
P20	37	P40	42	P60	40	P80	38		

Figure C-2 : Mesures prise lors du calme (Source : Auteur, 2022)

POINT	MESURE								
P01	79	P21	72	P41	73	P61	73	P81	72
P02	77	P22	74	P42	73	P62	73	P82	72
P03	76	P23	74	P43	71	P63	72	P83	72
P04	76	P24	73	P44	70	P64	72	P84	72
P05	76	P25	72	P45	71	P65	72	P85	73
P06	75	P26	73	P46	72	P66	74	P86	74
P07	75	P27	72	P47	74	P67	73	P87	75
P08	74	P28	72	P48	73	P68	73	P88	72
P09	71	P29	71	P49	73	P69	72	P89	73
P10	73	P30	74	P50	72	P70	71	P90	73
P11	74	P31	70	P51	72	P71	71	P91	72
P12	75	P32	73	P52	72	P72	72	P92	72
P13	75	P33	71	P53	70	P73	71	P93	71
P14	74	P34	71	P54	73	P74	72	P94	71
P15	73	P35	74	P55	72	P75	72	P95	71
P16	73	P36	73	P56	72	P76	72	P96	70
P17	72	P37	73	P57	72	P77	75	P97	70
P18	72	P38	72	P58	73	P78	74		
P19	75	P39	71	P59	74	P79	73		
P20	72	P40	71	P60	74	P80	73		

Figure C-3 : Mesures prise avec source de bruit interieur (Source : Auteur, 2022)

POINT	MESURE								
P01	78	P21	77	P41	78	P61	74	P81	74
P02	76	P22	74	P42	78	P62	76	P82	73
P03	76	P23	75	P43	76	P63	77	P83	74
P04	76	P24	75	P44	75	P64	80	P84	75
P05	74	P25	76	P45	76	P65	80	P85	75
P06	75	P26	76	P46	74	P66	78	P86	74
P07	78	P27	76	P47	74	P67	76	P87	76
P08	77	P28	76	P48	76	P68	77	P88	76
P09	79	P29	79	P49	77	P69	75	P89	75
P10	79	P30	80	P50	76	P70	74	P90	74
P11	78	P31	78	P51	78	P71	74	P91	74
P12	76	P32	76	P52	78	P72	74	P92	73
P13	76	P33	76	P53	77	P73	76	P93	72
P14	75	P34	77	P54	76	P74	78	P94	74
P15	75	P35	77	P55	76	P75	80	P95	74
P16	75	P36	78	P56	75	P76	79	P96	74
P17	76	P37	79	P57	74	P77	77	P97	72
P18	76	P38	79	P58	74	P78	76		
P19	79	P39	80	P59	73	P79	76		
P20	76	P40	78	P60	74	P80	74		

Figure C-4: Mesures prise avec source de bruit interieur avec baffle (Source : Auteur, 2022)

Annexe D : 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 الرحمن ميرة- بجاية

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

Questionnaire

استبيان

Dans le cadre de la préparation d'un mémoire de fin d'étude en vue d'obtention d'un master en architecture consacre à « **Le confort acoustique dans les auditoriums** », nous avons l'honneur de vous demander de bien vouloir nous aider en acceptant de répondre aux questions ci-joint. Votre précieuse collaboration nous permettra de connaitre votre opinion. Vos réponses seront anonymes, pour une meilleure et libre expression.

Toute contribution en termes de délai de réponse, de suggestions et d'informations ne peut qu'enrichir notre étude et lui donner une meilleure qualité.

Merci pour votre aide et votre compréhension.:

Cochez la case qui convient ou répondez sur la question s'il est demandé.

في إطار التحضير لمذكرة التخرج من الماستر في الهندسة المعمارية خاصة بـ «الراحة الصوتية في القاعات» ،
يشرفنا أن نطلب منك التفضل بمساعدتنا من خلال الموافقة على الإجابة على الأسئلة المرفقة سيسمح لنا تعاونك الثمين بمعرفة
رأيك. ستكون إجاباتك مجهولة المصدر، من أجل تعبير أفضل وحر.

اي مساهمة من حيث وقت الاستجابة والاقتراحات والمعلومات لا يمكن إلا أن تثري دراستنا وتعطيها جودة أفضل.

شكرا لمساعدتك وتفهمك.

ضع العلامة (x) في المكان المناسب أو أجب عن السؤال إذا طُلب منك ذلك.

1. Combien de fois avez-vous assisté à des conférences dans l'auditorium universitaire Djaafri Saadi ?

1. كم مرة قمت بزيارة مدرج الجامعي الجعفري السعدي؟.....

- Une seul fois Très peu de fois Peu de fois Plusieurs fois Souvent
 مرة واحدة مرات قليلة جدا مرات قليلة عدة مرات غالبا

2. Quelle zone vous avez occupé dans l'auditorium le plus souvent ?.....

2. ماهي المنطقة التي شغلتها في القاعة غالب الاحيان؟.....

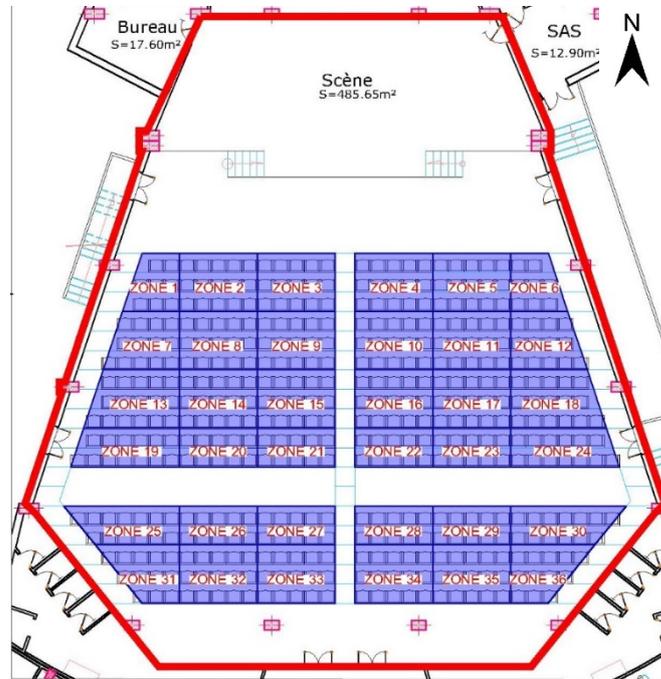


Figure D-1: Plan de l'auditorium (Source: Auteur, 2022)

3. Quelle zone préférez-vous occuper dans l'auditorium et pourquoi?

3. ماهي المنطقة التي تفضل ان تشغلها في القاعة ولماذا؟.....

4. Quelle est votre sensibilité au bruit en tant que nuisances ?

4. كيف هي حساسيتك للضوضاء كمصدر ازعاج؟

- Pas sensible Peu sensible Moyen sensible Sensible Très sensible
 غير حساس غير حساس نوعا ما معتدلة حساس حساس للغاية

5. Entendez-vous des bruits extérieurs à l'intérieur de l'auditorium ?

5. هل تسمع ضوضاء خارجية داخل القاعة؟

Non لا

Oui نعم

- Si oui quelle est la source de ce bruit ?

- إذا كانت الإجابة ب نعم ما مصدر هذه الضوضاء؟

Véhicule
السيارات

Étudiants
الطلاب

Cafétéria
الكافتيريا

6. Comment qualifiez-vous la qualité du son dans l'auditorium ?

6. كيف تقيم جودة الصوت في القاعة؟

Très mauvaise
سيئة جدا

Mauvaise
سيئة

Acceptable
مقبولة

Bonne
جيدة

Très bonne
جيدة جدا

7. Comment décrivez-vous l'ambiance sonore à l'intérieure de l'auditorium ?

7. كيف تصف بيئة الصوت داخل القاعة؟

Très mauvaise
سيئة جدا

Mauvaise
سيئة

Acceptable
مقبولة

Bonne
جيدة

Très bonne
جيدة جدا

8. Est-ce que vous entendez un retour du son dans l'auditorium (répétition des sons)?

8. هل تسمع ارتجاجات صوتية في القاعة (تكرار الأصوات)؟

Non لا

Oui نعم

9. Est-ce que cette répétition du son que vous entendez vous dérange ?

9. هل يزعجك هذا التكرار للصوت الذي تسمعه؟

Non لا

Oui نعم

10. Est que vous entendez une résonance du son dans l'auditorium (retour du son avec augmentation) ?

10. هل تسمع رنينًا للصوت في القاعة (عودة الصوت مع الزيادة)؟

Non لا

Oui نعم

11. Quand tout le monde parle, entendez-vous votre interlocuteur ?

11. عندما يتحدث الجميع، هل تسمع المقدم؟

Je n'entends rien
لا أسمع شيئًا

J'entends un peu
أسمع قليلا

J'entends bien
أسمع جيدا

12. Est-ce que vous pensez que cet auditorium a besoin d'une étude acoustique ?

12. هل تعتقد أن هذه القاعة بحاجة الى دراسة صوتية؟

Non لا

Oui نعم

Merci beaucoup pour votre coopération.

شكرا جزيلًا لتعاونك

Annexe E : Les étapes de simulation via le logiciel ECOTECT

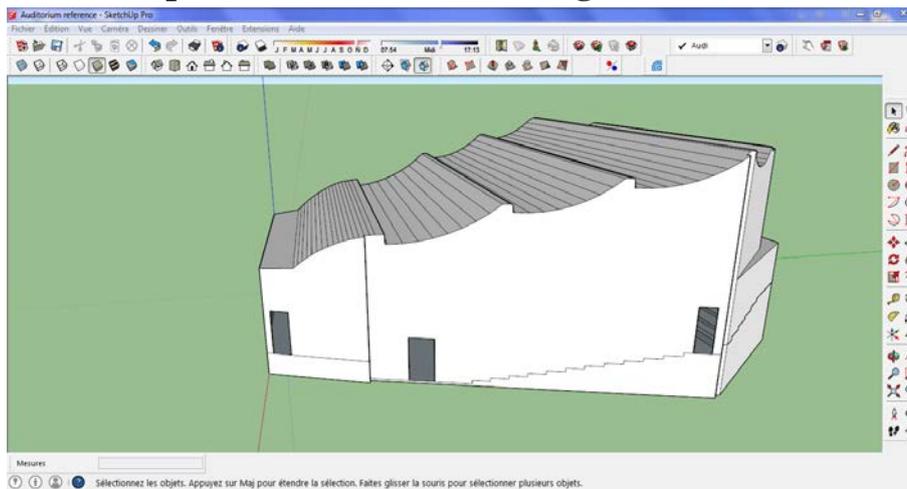


Figure E-1: Modélisation du modèle de référence en SketchUp

(Source : Auteur, 2022)

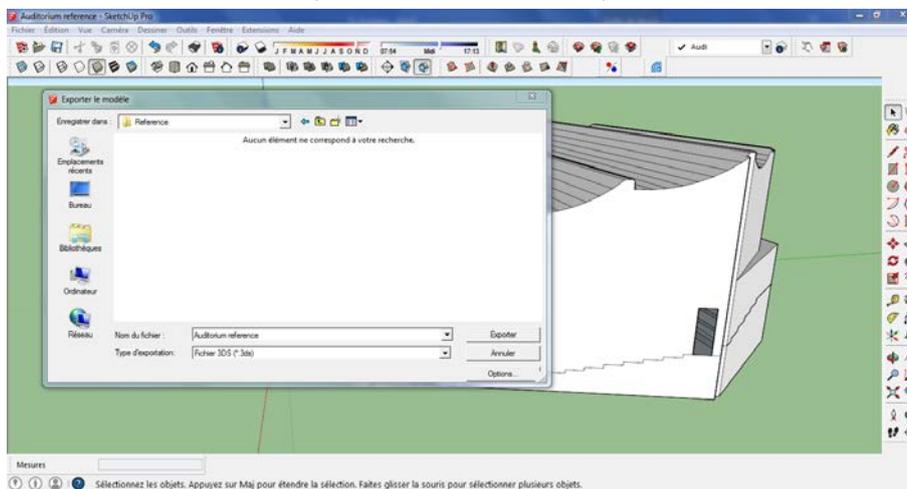


Figure E-2: Exportation du modèle en format 3DS (Source : Auteur, 2022)

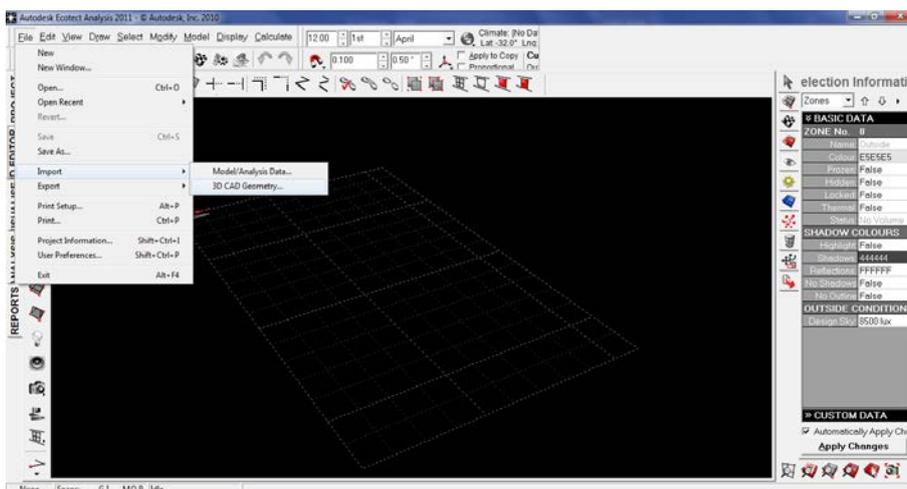


Figure E-3: Importation du modèle en Ecotect (Source : Auteur, 2022)

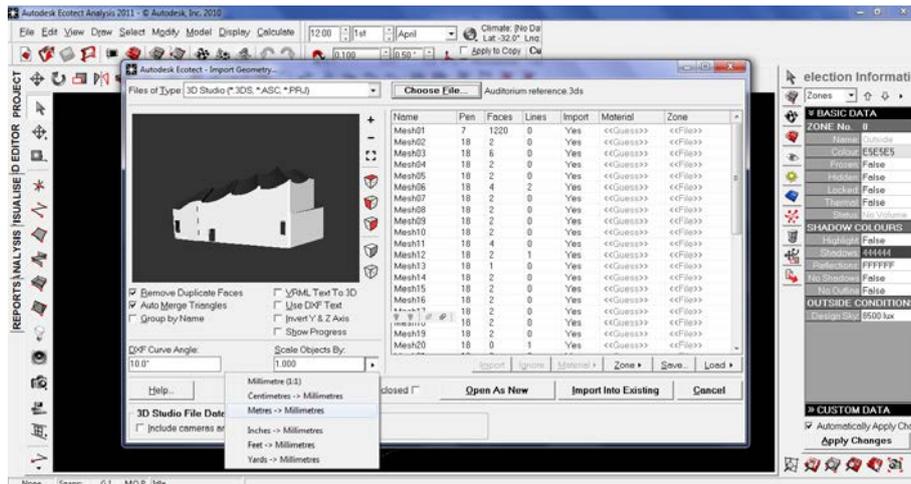


Figure E-4: Réglage de l'unité d'importation du modèle sur Ecotect
(Source : Auteur, 2022)

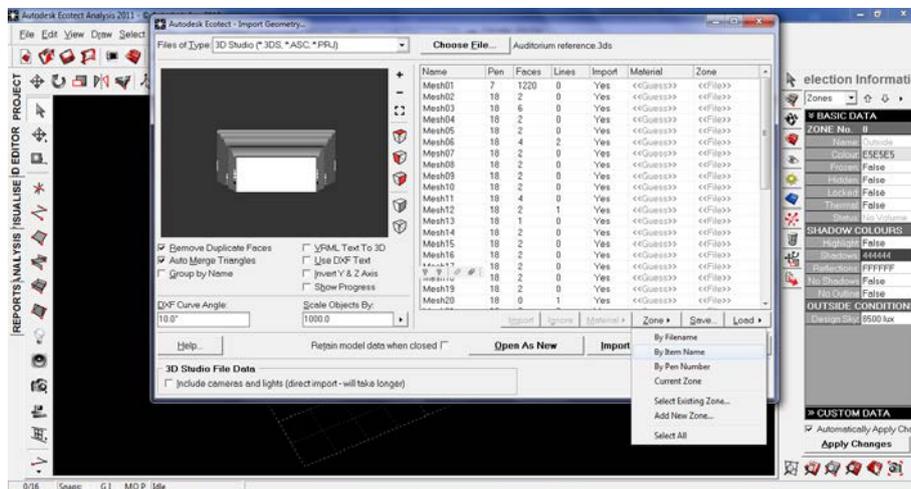


Figure E-5: Réglage de zone d'importation du modèle sur Ecotect
(Source : Auteur, 2022)

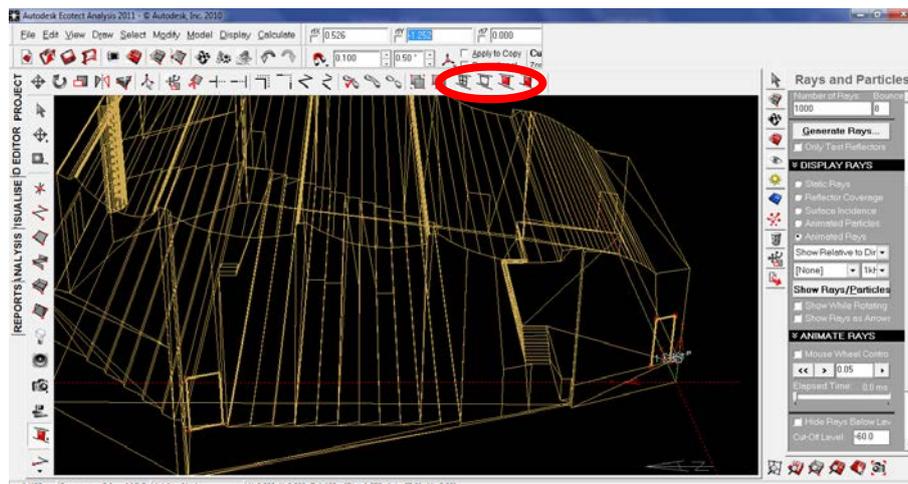


Figure E-6 : Insertion des portes et fenêtres (Source : Auteur, 2022)

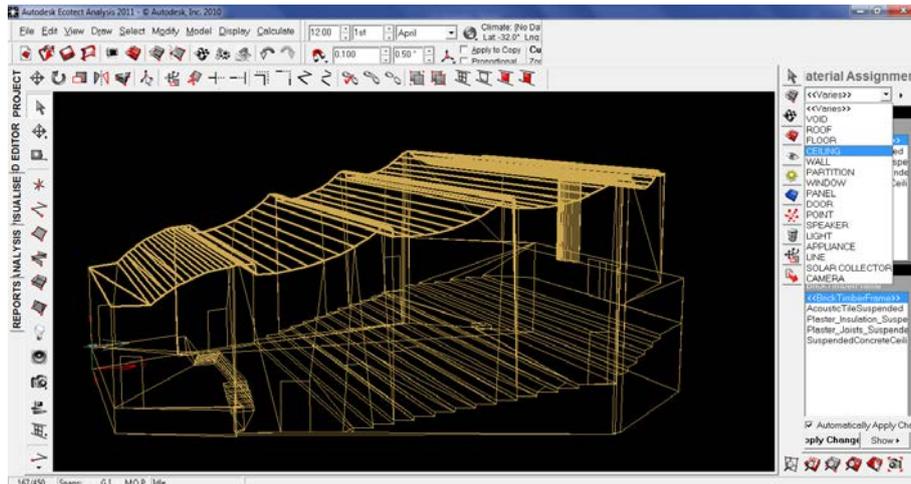


Figure E-7: Réglage des éléments du modèle (Source: Auteur, 2022)

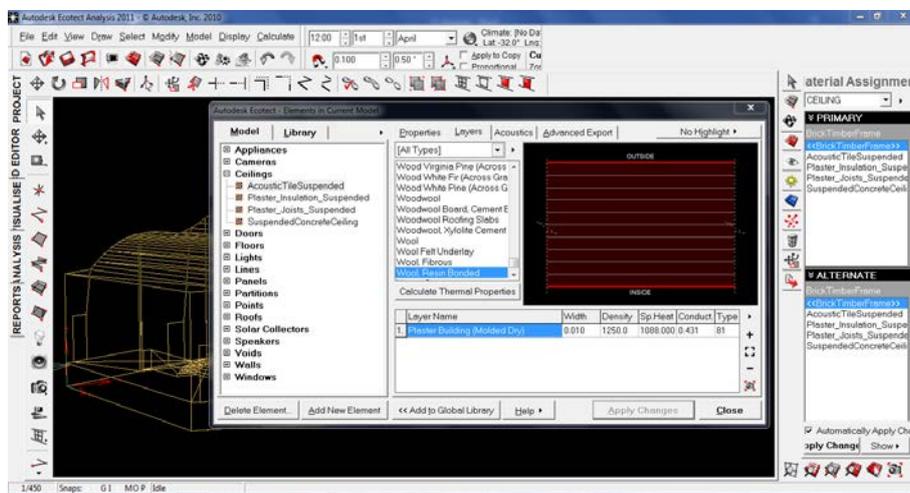


Figure E-8: Insertion des matériaux (Source: Auteur, 2022)

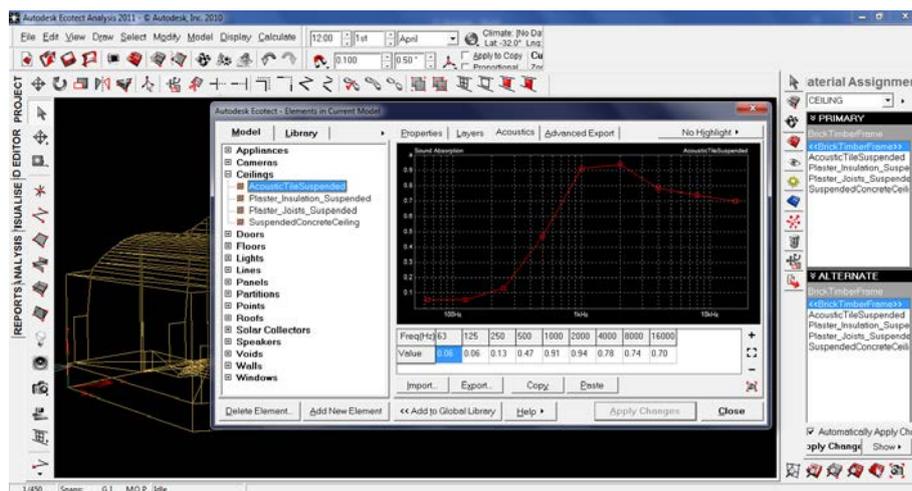


Figure E-9 : Réglage des caractéristiques acoustique des matériaux (Source: Auteur, 2022)

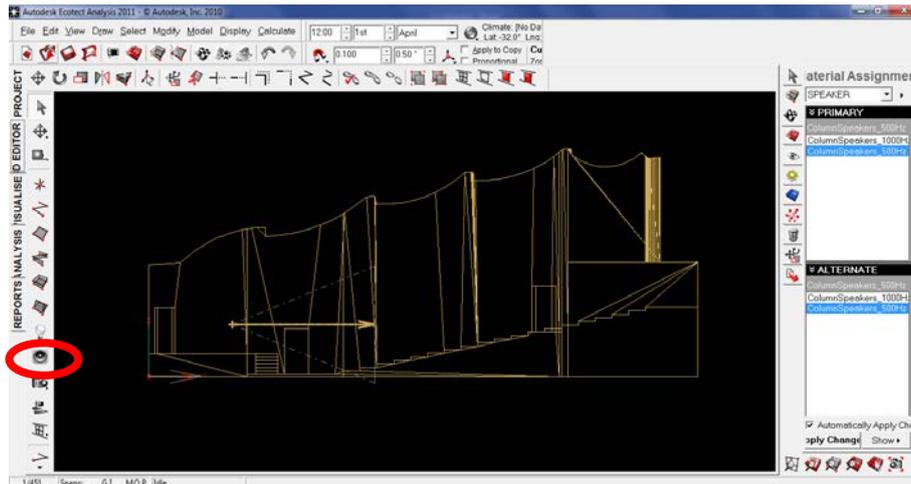


Figure E-10 : Insertion et réglage de la source sonore (Source: Auteur,

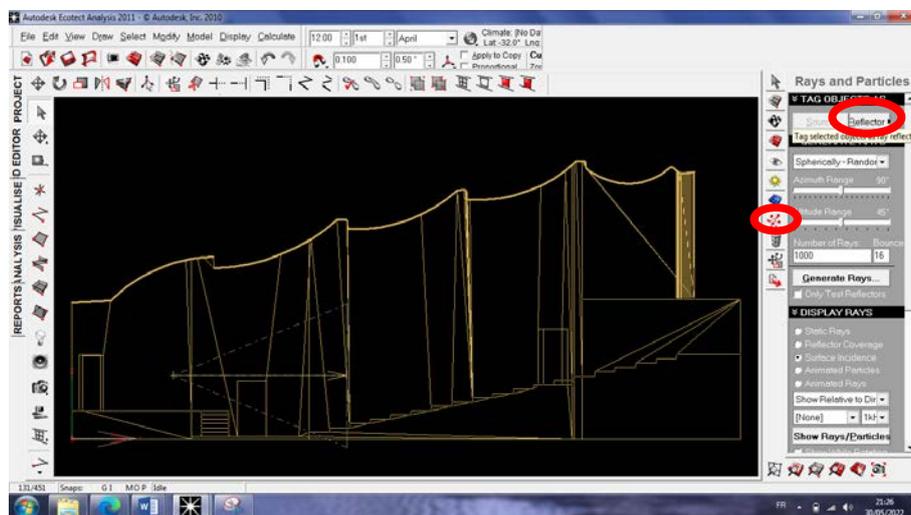


Figure E-11: Définir le plafond comme objet réflecteur (Source: Auteur, 2022)

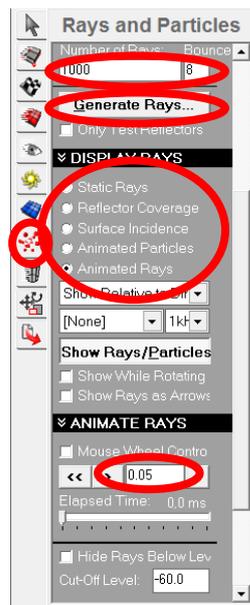


Figure E-12: Réglage des paramètres de visualisation de propagation du son (Source: Auteur, 2022)

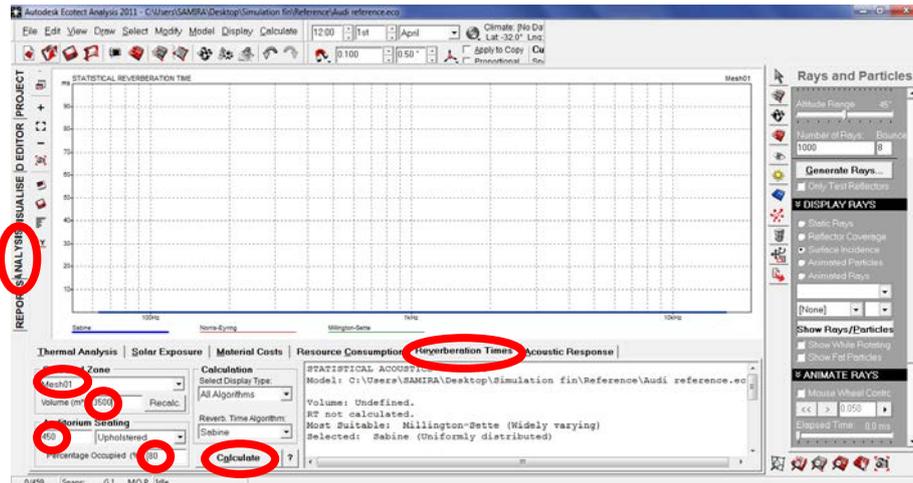


Figure E-13: Réglage des paramètres de temps de réverbération
(Source: Auteur, 2022)

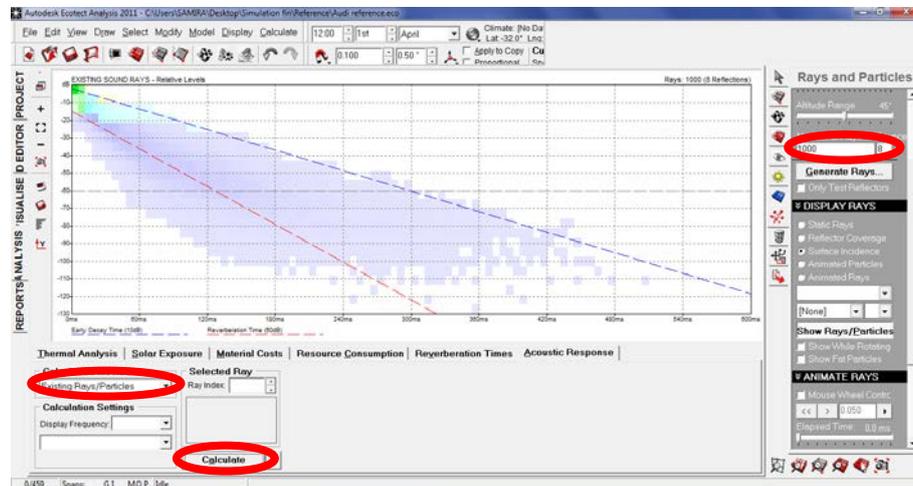


Figure E-14: Réglage des paramètres de réponse acoustique
(Source: Auteur, 2022)

Annexe F : Résultats Simulation numérique via le logiciel Ecotect

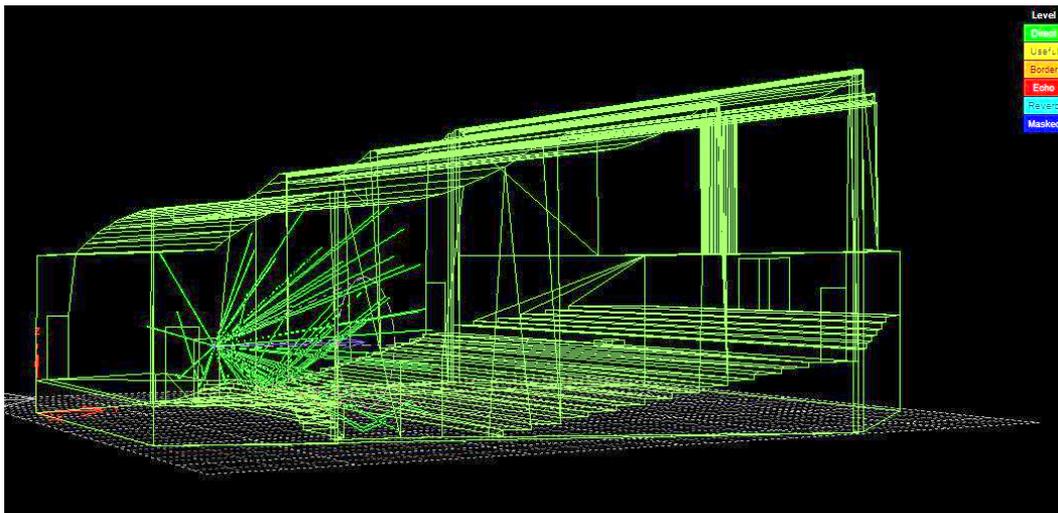


Figure F-1: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 20ms (Source : Auteur 2022)

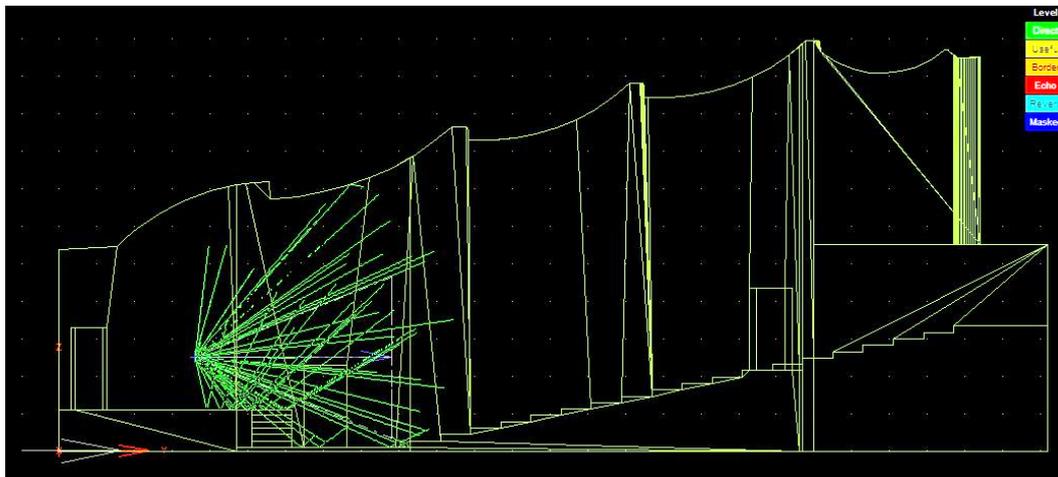


Figure F-2: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 20ms (Source : Auteur 2022)

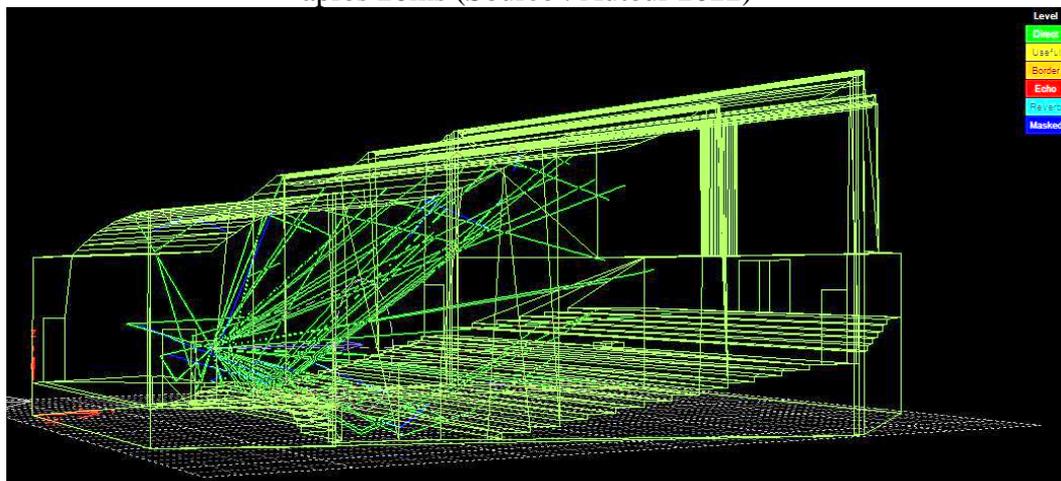


Figure F-3: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 40ms (Source : Auteur 2022)

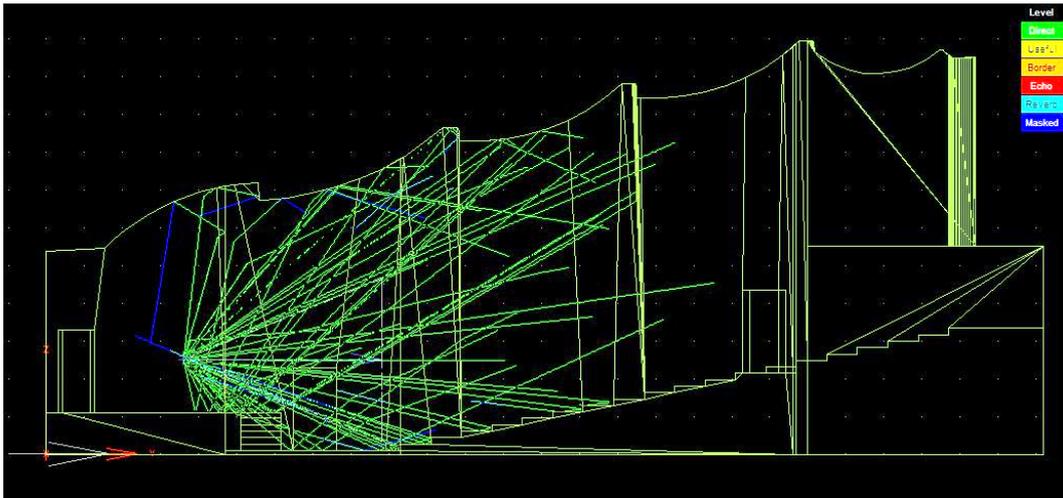


Figure F-4: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 40ms (Source : Auteur 2022)

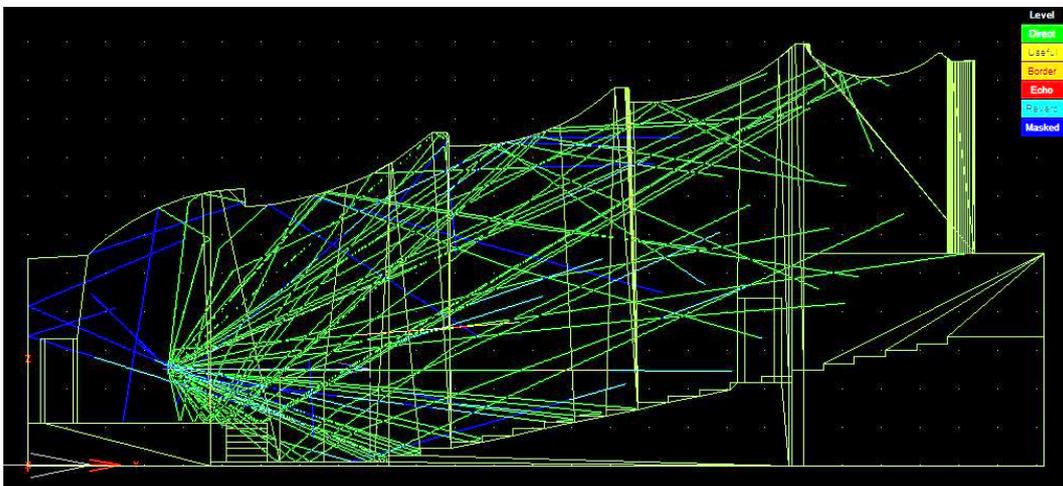


Figure F-5: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 60ms (Source : Auteur 2022)

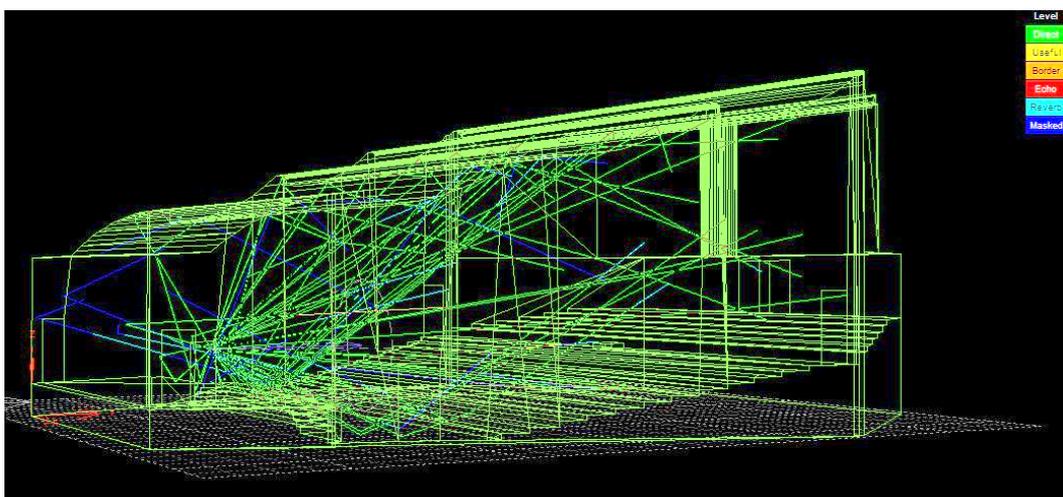


Figure F-6: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 60ms (Source : Auteur 2022)

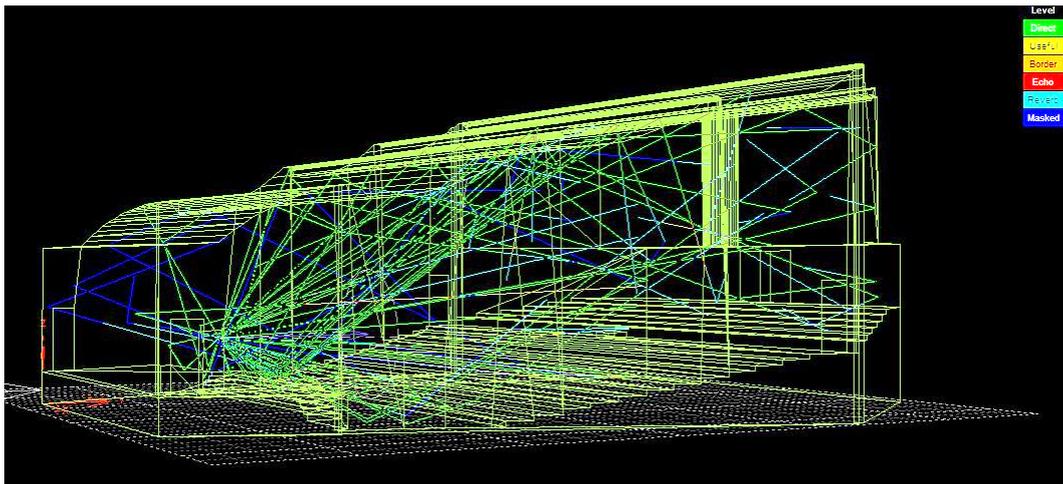


Figure F-7: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 80ms (Source : Auteur 2022)

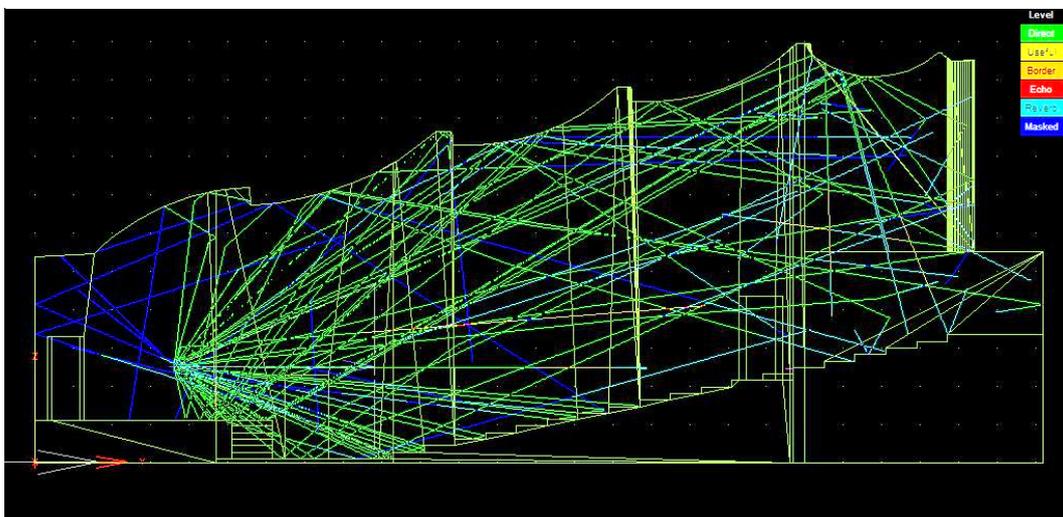


Figure F-8: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 80ms (Source : Auteur 2022)

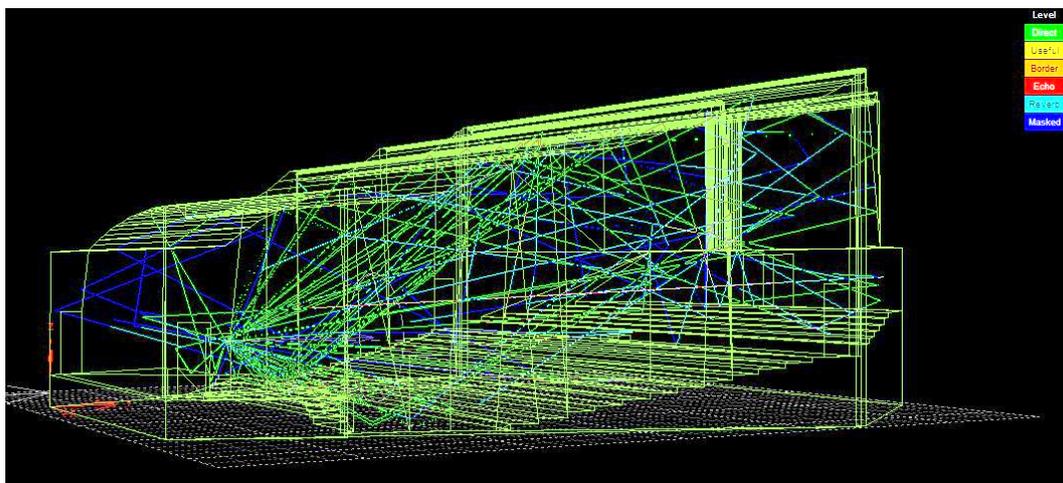


Figure F-9: Vue en perspective de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms (Source : Auteur 2022)

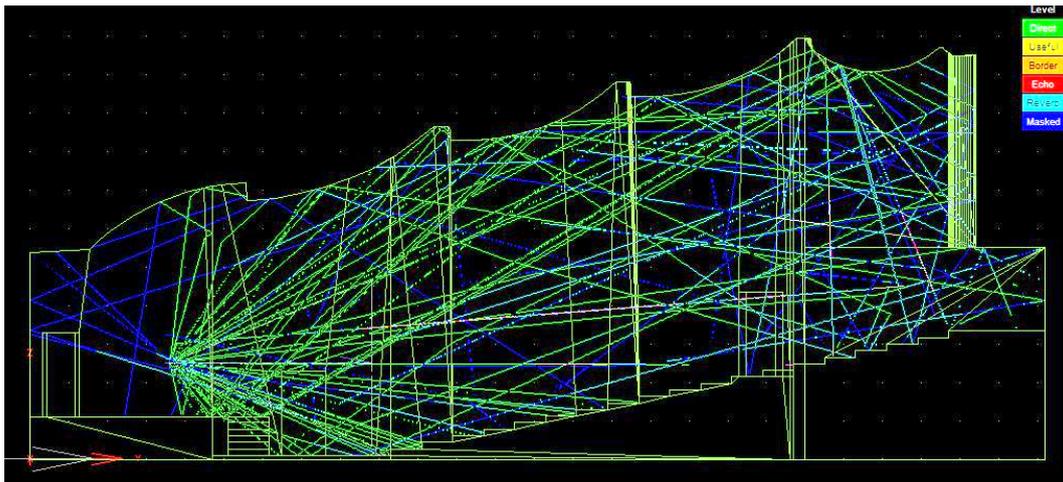


Figure F-10: Vue latérale de la propagation du son dans le modèle de référence après 100ms (Source : Auteur 2022)