



Université Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

REHABILITATION ACOUSTIQUE DURABLE ET SON ROLE DANS LE
PROCESSUS D'AMELIORATION ENVIRONNEMENTALE DES EQUIPEMENTS
CULTURELS

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences. Filière Architecture.
Option Architecture

Par : FARID Dalal

Année Universitaire

2020-2021



Université Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

N° Série :

N° d'Ordre :

REHABILITATION ACOUSTIQUE DURABLE ET SON ROLE DANS LE
PROCESSUS D'AMELIORATION ENVIRONNEMENTALE DES EQUIPEMENTS
CULTURELS

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences. Filière Architecture.
Option Architecture

Présentée par : FARID Dalal

Sous la direction de : Pr Debache Benzagouta Samira. Université Constantine 3

Devant le Jury Composé de :

| | | |
|-------------------------------|---------------|-------------------------|
| Pr CHABI Nadia | Président (e) | Université Constantine3 |
| Pr. DEBACHE BENZAGOUTA Samira | Rapporteur | Université Constantine3 |
| Pr KORICHI Amar | Examineur | Université Constantine3 |
| Pr REMRAM Youcef | Examineur | Université USTHB |
| Pr ALKAMA Djamel | Examineur | Université Guelma |
| Pr DJAKAB Essaid | Examineur | Université Alger 1 |

Année Universitaire

2020-2021

Remerciements

- Je remercie **Dieu le tout puissant** pour m'avoir donné toute cette force et ce courage pour faire aboutir ce modeste travail.
- Je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance et mes vifs remerciements envers ma directrice de thèse **Madame le Professeur DEBACHE BENZAGOUTA Samira**, pour avoir méticuleusement dirigé ce travail, pour sa confiance, sa patience et ses encouragements de tous les instants ; sans elle, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail.
- Je remercie tout particulièrement **Professeur REMRAME Youcef** pour avoir mis à notre disposition le matériel nécessaire pour les essais expérimentaux (Amplificateur, microphone, source omnidirectionnelle) et aussi pour son assistance lors des mesures et du travail sur maquette expérimentale.
- Mes vifs respects à **tous les membres de jury** qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.
- J'adresse également mes vifs remerciements au laboratoire «*Mediterranean Acoustics Research & Development (PEMARD), developers of "Olive Tree Lab – Suite*», pour nous avoir permis, à travers une licence gratuite d'une année, l'utilisation du logiciel Olive Tree Lab, avec lequel nous avons élaboré les simulations nécessaires pour notre recherche.
- Je remercie mon mari pour son soutien, encouragements et conseils.
- En fin je remercie toutes celles et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- à la mémoire **de mes chers parents** (Mohamed Salah et Ouarda) auxquels je dois tout. Que Dieu ait leur âme dans son vaste paradis.
- A mon mari Ibrir Hadj.
- A mes enfants Ahmed Abd Asalam et Mohamed Salah.

Table des Matières

| | |
|--|------|
| LISTE DES FIGURES | viii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xii |
| LISTE DES PLANCHES..... | xiii |
| NOMENCLATURE..... | xiv |
| RESUME..... | xv |
| | |
| CHAPITRE I : | |
| CHAPITRE INTRODUCTIF..... | 1 |
| Introduction..... | 2 |
| 1.1. Problématique..... | 5 |
| 1.2. Hypothèses..... | 8 |
| 1.3. Objectifs de la recherche..... | 9 |
| | |
| CHAPITRE II | |
| GENERALITES SUR L'ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE..... | 13 |
| Introduction..... | 14 |
| 2.1. Son et bruit..... | 15 |
| 2.1.1. Définition du Son..... | 15 |
| 2.1.2 Type du son..... | 15 |
| 2.1.2.1. Son pur..... | 15 |
| 2.1.2.2. Son complexe..... | 16 |
| 2.1.3. Spectre sonore..... | 16 |
| 2.1.4. Définition du bruit..... | 17 |
| 2.1.5. Type du bruit..... | 17 |
| 2.1.5.1. Bruit blanc..... | 17 |
| 2.1.5.2. Bruit rose..... | 17 |
| 2.2. Ondes sonores..... | 18 |
| 2.2.1. Définition..... | 18 |
| 2.2.2. Intervalles intéressants..... | 18 |
| 2.2.3 Caractéristiques énergétiques des ondes sonores..... | 19 |
| 2.2.3.1. Pression acoustique..... | 19 |
| 2.2.3.2. Intensité acoustique..... | 19 |
| 2.2.3.3. Niveau sonore..... | 20 |
| 2.2.3.4. Fréquence sonore..... | 20 |
| 2.3. Comportement du son dans un espace clos..... | 21 |
| 2.3.1. Diffusion..... | 21 |
| 2.3.2. Réverbération acoustique..... | 21 |
| 2.3.3. Théories et formules de réverbération..... | 22 |
| 2.3.3.1. Formule de sabine..... | 22 |
| 2.3.3.2. Coefficient d'absorption α | 23 |
| 2.3.3.3. Aire d'absorption équivalente A..... | 23 |
| 2.3.4. Autre formules..... | 27 |
| 2.3.4.1. Formule d'Eyring..... | 27 |
| 2.3.4.2. Formule de Milligton..... | 28 |
| 2.3.4.3. Formule de Pujolle..... | 28 |
| 2.3.4.4. Choix d'une formule..... | 28 |
| 2.3.5. Absorption acoustique..... | 29 |
| 2.3.6. Matériaux absorbants..... | 29 |
| 2.3.6.1. Matériaux poreux et fibreux..... | 30 |
| 2.3.6.2. Résonateurs..... | 30 |
| 2.3.6.3. Membranes..... | 33 |
| Conclusion..... | 34 |
| | |
| CHAPITRE III | |
| EXIGENCES ACOUSTIQUES DANS LES SALLES DES EQUIPEMENTS CULTURELS..... | 35 |
| Introduction..... | 36 |
| 3.1. Équipement culturel..... | 36 |
| 3.1.1. Définition..... | 36 |
| 3.1.2. Exemples d'équipements culturels..... | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.1.2.1. Théâtre..... | 37 |
| 3.1.2.2. Cinéma..... | 38 |
| 3.1.2.3. Opéra..... | 40 |
| 3.1.2.4. Salles de spectacle à grande capacité..... | 41 |
| 3.1.2.5. Salle de conférence..... | 43 |
| 3.2. Acoustique des salles..... | 43 |
| 3.2.1. Définition..... | 43 |
| 3.2.2. Aperçu historique..... | 44 |
| 3.2.3. Type de salles..... | 48 |
| 3.2.3.1. Salle de la parole (Speech room)..... | 48 |
| 3.2.3.2. Salle de la musique..... | 49 |
| 3.2.3.3. Salle de destination mélangée..... | 50 |
| 3.3. Critères de la qualité acoustique d'une salle de conférence..... | 50 |
| 3.3.1. Forme architecturale..... | 50 |
| 3.3.2. Temps de réverbération optimal..... | 53 |
| 3.3.3. Temps de décroissance précoce EDT: (Early Decay Time)..... | 55 |
| 3.3.4. Réponse impulsionnelle..... | 56 |
| 3.3.5. La clarté (C80)..... | 57 |
| 3.3.6. Force sonore G..... | 58 |
| 3.3.7. Indice D50. (Deutlichkeit)..... | 58 |
| 3.3.8. Critères d'intelligibilité..... | 59 |
| 3.3.8.1. STI : indice de transmission de la parole..... | 60 |
| 3.3.8.2. RASTI : indice Rapide de la transmission de la parole..... | 61 |
| 3.3.8.3. Facteur de perturbation : les échos..... | 62 |
| Conclusion..... | 62 |
| | |
| CHAPITRE IV: | |
| REHABILITATION ACOUSTIQUE DURABLE..... | 63 |
| Introduction..... | 64 |
| 4.1. Réhabilitation..... | 64 |
| 4.1.1. Définition..... | 64 |
| 4.1.2. Type de réhabilitation..... | 65 |
| 4.1.2.1. Réhabilitation lourde..... | 65 |
| 4.1.2.2. Réhabilitation légère..... | 65 |
| 4.1.3. Réhabilitation acoustique..... | 65 |
| 4.1.3.1. Définition..... | 65 |
| 4.1.3.2. Isolation acoustique..... | 66 |
| 4.1.3.3. Correction acoustique..... | 66 |
| 4.1.4. Processus de réhabilitation acoustique..... | 67 |
| 4.1.4.1. Etat des lieux (Pré-diagnostic)..... | 67 |
| 4.1.4.2. Diagnostic acoustique..... | 68 |
| 4.1.4.3. Solutions proposées et travaux de réhabilitation..... | 68 |
| 4.2. Synthèse de la littérature dans le domaine de l'amélioration de la qualité acoustique des salles (état de l'art)..... | 69 |
| 4.2.1. Exemple et recherche sur la réhabilitation durable..... | 70 |
| 4.2.2. Matériaux durables pour réhabilitation..... | 79 |
| 4.2.2.1. Matériaux poreux naturels..... | 79 |
| 4.2.2.2. Matériaux recyclés..... | 82 |
| 4.2.2.3. Panneaux perforés..... | 84 |
| 4.2.3. Réflecteurs et leurs rôles dans la correction acoustique des salles..... | 88 |
| 4.3. Logiciels au service de la réhabilitation acoustique..... | 92 |
| 4.3.1. CATT..... | 92 |
| 4.3.2. ODEON..... | 93 |
| 4.3.3. Olive Tree Lab Suit..... | 93 |
| Conclusion..... | 94 |
| | |
| CHAPITRE V | |
| INVESTIGATION PAR SIMULATION ET MESURES IN-SITU..... | 95 |
| Introduction..... | 96 |
| 5.1. Présentations des deux cas d'études..... | 97 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.1. Palais de la culture Malek Hadad..... | 97 |
| 5.1.1.1. Description architecturale de la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad..... | 98 |
| 5.1.1.2. Réhabilitation acoustique de la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad..... | 100 |
| 5.1.2. Maison de la culture El Khalifa..... | 102 |
| 5.1.2.1. Description architecturale de la salle de conférence de la Maison de la culture El Khalifa..... | 103 |
| 5.1.2.2. Réhabilitation acoustique de la salle de conférence de la Maison de la culture El Khalifa..... | 104 |
| 5.2. Évaluation de la qualité sonore de la salle de conférence de Malek Hadad par les mesures in-situ..... | 106 |
| 5.2.1. Méthode de mesure..... | 106 |
| 5.2.2. Matériels et instruments de mesure utilisés..... | 107 |
| 5.2.3. Positions de mesure..... | 109 |
| 5.2.4. Détermination de la valeur optimale du temps de réverbération..... | 111 |
| 5.2.5. Résultats et Interprétation des mesures in-situ..... | 111 |
| 5.3. Evaluation de la qualité sonore des deux cas d'étude par la simulation acoustique..... | 112 |
| 5.3.1. Présentation des logiciels utilisés..... | 112 |
| 5.3.2. Méthode de modélisation..... | 112 |
| 5.3.3. Détermination des valeurs optimales des indices mesurés..... | 113 |
| 5.3.4. Résultats obtenus pour la salle de conférence du palais de la culture de Malek Haddad..... | 114 |
| 5.3.4.1. Interprétation des Résultats..... | 118 |
| 5.3.4.2. Confrontation de la simulation et les mesures in-situ pour la salle de Malek Haddad..... | 121 |
| 5.3.5. Résultats et interprétation de mesures obtenues pour la salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa..... | 122 |
| Conclusion..... | 125 |
| | |
| CHAPITRE VI | |
| CORRECTIONS ACOUSTIQUES DES SALLES DE CONFERENCE ETUDIEES..... | 126 |
| Introduction..... | 127 |
| 6.1. Matériaux de revêtement proposés..... | 129 |
| 6.1.1. Mesures effectuées dans la chambre réverbérante à travers la maquette acoustique..... | 129 |
| 6.1.1.1. Présentation de la chambre réverbérante..... | 129 |
| 6.1.1.2. Description du Matériel et de la méthode de mesure utilisés..... | 133 |
| 6.1.1.3. Logiciel Spectra RTA utilisé pour la mesure du temps de réverbération..... | 134 |
| 6.1.1.4. Procédures de mesure et de calcul du coefficient d'absorption des matériaux..... | 135 |
| 6.1.2. Échantillons proposés et utilisés dans les mesures..... | 139 |
| 6.1.2.1. Panneau acoustique mixte MDF perforés-paille..... | 139 |
| 6.1.2.2. Présentation des caractéristiques acoustiques de la paille..... | 139 |
| 6.1.2.3. Préparation de l'échantillon constitué d'un panneau acoustique mixte MDF-Paille..... | 140 |
| 6.1.2.4. Panneau acoustique de l'Alfa..... | 142 |
| 6.1.2.5. Présentation du matériau Alfa..... | 142 |
| 6.1.2.6. Préparation de l'échantillon de l'Alfa..... | 143 |
| 6.1.2.7. Caractéristiques de la maquette et des échantillons d'essais..... | 143 |
| 6.1.3. Résultats et interprétation des mesures..... | 144 |
| 6.1.3.1. Maquette vide sans revêtement..... | 144 |
| 6.1.3.2. Maquette recouverte d'un Panneau mixte MDF perforés-paille..... | 145 |
| 6.1.3.3. Maquette recouverte d'un Panneau acoustique de l'Alfa..... | 147 |
| 6.2. Essais des corrections acoustiques sur les salles de conférence étudiées..... | 148 |
| 6.2.1. Corrections proposées pour la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad..... | 148 |
| 6.2.1.1. Application du panneau acoustique mixte MDF-paille..... | 148 |
| 6.2.1.2. Modélisation et simulation..... | 149 |
| 6.2.1.3. Résultats et Interprétation..... | 150 |
| 6.2.2. Corrections proposées pour la salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa..... | 156 |
| 6.2.2.1. Application des réflecteurs..... | 156 |
| 6.2.2.2. Modélisation et simulation..... | 158 |
| 6.2.2.3. Résultats et Interprétation..... | 159 |

| | |
|---|-----|
| Conclusion..... | 163 |
| CHAPITRE VII : CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... | 164 |
| CHAPITRE VIII : BIBLIOGRAPHIE..... | 170 |
| LISTE DES ANNEXES | |
| Annexe A : | 181 |
| Annexe B : | 184 |
| Annexe C : | 188 |
| Annexe E : | 194 |

Liste des Figures

| Figure | Page |
|---|------|
| 1.1. Structure de la thèse..... | 12 |
| 2.1. Son pur (sinusoïdal)..... | 16 |
| 2.2. Spectre d'un son pur et d'un son complexe..... | 16 |
| 2.3. Spectre du bruit blanc et rose..... | 17 |
| 2.4. Intervalles des ondes sonores perceptibles par l'homme..... | 18 |
| 2.5. Relation entre pression, période et fréquences..... | 20 |
| 2.6. Chemins de propagations du son dans une espace clos..... | 21 |
| 2.7. Variation du coefficient d'absorption avec la fréquence de l'onde incidente..... | 23 |
| 2.8. Mesure du coefficient d'absorption α d'un matériau..... | 25 |
| 2.9. Tube de Kunt pour la mesure du coefficient d'absorption des matériaux..... | 26 |
| 2.10. Matériaux poreux..... | 30 |
| 2.11. Résonateur de Helmholtz appliquée dans une salle..... | 31 |
| 2.12. Eléments composants d'un Résonateur de Helmholtz..... | 31 |
| 2.13. Exemple des vases acoustiques dans les théâtres antiques..... | 32 |
| 2.14. Vases de Vitruve..... | 32 |
| 2.15. Composition d'une membrane..... | 33 |
| 2.16. Types de matériaux absorbants..... | 34 |
| 3.1. Grandes activités d'un équipement culture..... | 37 |
| 3.2. Théâtre de Petrarca | 38 |
| 3.3. Salle du Ciné Rex Montbrison | 39 |
| 3.4. Opéra d'Alger | 40 |
| 3.5. Zénith Salah Bey de Constantine | 41 |
| 3.6. Plan et coupe de la salle Salah Bey | 42 |
| 3.7. Le Centre International des Conférences d'Alger | 43 |
| 3.8. Les peintures de Nacht de la nécropole de Thebs | 45 |
| 3.9. Rideaux de poiles de chèvres accrochés dans le tabernacle | 45 |
| 3.10. Théâtre antique à Epidaurus..... | 46 |
| 3.11. Auvents suspendus (valeria)..... | 47 |
| 3.12. Théâtre romain à Aspendus | 47 |
| 3.13. Durée de réverbération optimale de locaux | 49 |
| 3.14. Risque de focalisation lié aux formes concaves | 51 |
| 3.15. Traitement des parois latérales | 51 |
| 3.16. Dimensionnement des balcons de manière à éviter les zones d'ombre acoustique..... | 52 |
| 3.17. Hauteur de la scène et distance maximale de la source sonore dans une salle | 52 |
| 3.18. Réflecteurs acoustiques au plafond | 53 |

| | |
|---|----|
| 3.19. Durée de réverbération optimale des locaux | 54 |
| 3.20. Valeurs optimales pour le temps de réverbération de différents types de pièces..... | 55 |
| 3.21. Les réponses impulsionnelles mesurées dans deux pièces et les (T30, EDT) correspondants..... | 56 |
| 3.22. Graphique du critère de la clarté C 80..... | 57 |
| 3.23. Evaluation des valeurs de STI | 61 |
| 4.1. Différenciation entre l'isolation et la correction acoustique..... | 67 |
| 4.2. Processus de réhabilitation acoustique..... | 69 |
| 4.3. Comparaison des temps de réverbération avant et après la réhabilitation par rapport aux valeurs optimales..... | 71 |
| 4.4. Eglise de Preziosissimo Sangue di Gesù..... | 71 |
| 4.5. Valeurs de RT et EDT mesurées avant la correction..... | 72 |
| 4.6. a. Zone d'intervention pour la correction acoustique « rose »..... | 72 |
| b. Panneau de laine de bois..... | 72 |
| c. Panneau micro perforé..... | 72 |
| 4.7. Propositions d'amélioration des salles..... | 74 |
| 4.8. Amphithéâtres étudiés..... | 75 |
| 4.9. Vue de la salle de conférence..... | 76 |
| 4.10. a : Valeurs de Tr, mesures acoustiques..... | 77 |
| b : Tr, équation de Sabine..... | 77 |
| 4.11. Solutions proposées..... | 78 |
| 4.12. a : chanvre, b : écorce, c : moelle de tournesol, d la paille de lin c : paille de colza..... | 79 |
| 4.13. Photos des différents matériaux étudiés..... | 80 |
| 4.14. Tube de Kundt..... | 80 |
| 4.15. Exemples d'échantillons d'absorbants sonores (fruit vide de palmier à huile)..... | 81 |
| 4.16. Préparation d'échantillons des fibres naturelles issues du palmier dattier vide..... | 82 |
| 4.17. Échantillon de canne à sucre..... | 83 |
| 4.18. Échantillon de riz..... | 83 |
| 4.19. Matelas, meubles et déchets de tapis utilisés pour la préparation d'échantillons..... | 84 |
| 4.20. Schéma de principe d'un panneau micro-perforés MPP..... | 86 |
| 4.21. Exemple d'absorbant en MPP fabriqué avec un nid d'abeilles.Gauche: vue en avant. Droite: vue en arrière..... | 87 |
| 4.22. Vue et plan de la salle de réunion étudiée..... | 87 |
| 4.23. Installation et disposition d'absorbants MPP à nid d'abeille..... | 88 |
| 4.24. Schéma de la technologie de mise en forme du panneau réflecteur de haute précision..... | 89 |
| 4.25. a : Réflecteur de la scène au centre de congrès ICE..... | 90 |
| b : Réflecteur de la salle de conférence..... | 90 |
| 4.26. Panneaux réfléchissants avec diffuseurs Schroeder utilisés pour l'expérience; la largeur des diffuseurs est de 10 cm, 20 cm et 30 cm, de gauche à droite..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| 4.27. Panneaux à bords courbes utilisés pour l'expérience; les rayons des courbures sont de 10 cm, 20 cm et 30 cm, de gauche à droite..... | 91 |
| 5.1. Plan de situation du palais de la culture Malek Hadad..... | 97 |
| 5.2. Plan du RDC du palais de la culture Malek Hadad..... | 98 |
| 5.3. Plan des deux niveaux de la salle..... | 99 |
| 5.4. Coupe longitudinale de la salle..... | 99 |
| 5.5. a : Vue de la salle de conférence après la réhabilitation..... | 101 |
| b : Panneaux de Placoplatre (BA13) perforés..... | 101 |
| 5.6. Plan de situation du palais de la culture Malek Hadad..... | 102 |
| 5.7. Plan RDC du palais de la culture Malek Hadad..... | 103 |
| 5.8. Plan et coupe de la maison de la culture El Khalifa..... | 103 |
| 5.9. Panneaux MDF perforé et la mousse (éponge) utilisés pour la réhabilitation de la salle..... | 105 |
| 5.10. Matériels et instruments de mesure utilisés..... | 108 |
| 5.11. Branchement du Matériels de mesure utilisés..... | 109 |
| 5.12. Positions de mesures..... | 110 |
| 5.13. Hauteur du microphone (position 4)..... | 110 |
| 5.14. Résultats des mesures in-situ..... | 111 |
| 5.15. Model numérique de la salle Malek Haddad introduit sur le logiciel Olive Tree Lab SUITE..... | 113 |
| 5.16. a : les valeurs du TR60 avant la réhabilitation de la salle..... | 114 |
| b : les valeurs du TR60 après la réhabilitation de la salle..... | 114 |
| 5.17. a : les valeurs du C80 avant la réhabilitation de la salle..... | 115 |
| b : les valeurs du C80 après la réhabilitation de la salle..... | 115 |
| 5.18. a : les valeurs du G avant la réhabilitation de la salle..... | 116 |
| b : les valeurs du G après la réhabilitation de la salle..... | 116 |
| 5.19. a : les valeurs du D50 avant la réhabilitation de la salle..... | 117 |
| b : les valeurs du D après la réhabilitation de la salle..... | 117 |
| 6.1. Ossature métallique de la maquette | 130 |
| 6.2. Maquette acoustique en verre | 130 |
| 6.3. Dimensions de la maquette acoustique | 131 |
| 5.4. Position des trous réservés aux câbles des hauts parleurs | 132 |
| 6.5. Position des trous réservés aux câbles des microphones | 132 |
| 6.6. Matériels utilisés pour la mesure du temps de réverbération | |
| a : Ballon de brochure..... | 134 |
| b : Microphone omnidirectionnel..... | 134 |
| c : PC pour l'acquisition et enregistrement du signal impulsionnel..... | 134 |
| 6.7. Interface de l'analyse de bruit..... | 135 |
| 6.8. Enregistrement du temps de réverbération à la fréquence 1000 Hz | 136 |
| 6.9. Procédure d'extrapolation de la décroissance de la courbe de réverbération..... | 136 |
| 6.10. a : Temps de réverbération dans la bande d'octave de 500 H..... | 138 |
| b : Temps de réverbération dans la bande d'octave de 2000 Hz..... | 138 |

| | |
|--|-----|
| 6.11. Les coefficients d'absorption α de la paille..... | 140 |
| 6.12. Panneau acoustique mixte MDF-paille | 141 |
| 6.13. Les différentes étapes de la récolte de l'Alfa (a) l'arrachement, (b) la collecte et (c) la mise en balle..... | 142 |
| 6.14. Echantillon de l'alfa..... | 143 |
| 6.15. Coefficient d'absorption du verre..... | 145 |
| 6.16. Surface onduluse du panneau de l'alfa..... | 148 |
| 6.17. Détail du revêtement mural proposé pour la correction..... | 149 |
| 6.18. Agencement des matériaux proposés dans la salle de conférence de Malak Hadad..... | 149 |
| 6.19. Introduction des caractéristiques acoustiques du panneau acoustique mixte MDF- la paille dans le programme du logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 150 |
| 6.20. Position des réflecteurs sur coupe..... | 157 |
| 6.21. Champ sonore direct et indirect après l'insertion des réflecteurs..... | 157 |
| 6.22. Introduction des caractéristiques acoustiques des réflecteurs dans le programme du logiciel..... | 158 |
| 6.23. Simulation acoustique sur Olive Tree Lab..... | 158 |

Liste des tableaux

| Tableaux | Page |
|---|------|
| 3.1. Les valeurs optimales des (EDT, C80, G, D50)..... | 59 |
| 4.1. Le coefficient d'absorption α des différents matériaux étudiés..... | 81 |
| 5.1. Données architecturales et géométriques de la salle de conférence du palais de culture Malek Haddad..... | 100 |
| 5.2. Données architecturales et géométriques de la salle de conférence de la maison de la culture El khalifa..... | 104 |
| 5.3. Les valeurs optimales sont obtenues selon ISO/DIS 3382..... | 113 |
| 5.4. Valeur du STI de la salle avant et après la réhabilitation..... | 117 |
| 5.5. Comparaison du STI avant réhabilitation, le STI après réhabilitation, et celui optimal..... | 120 |
| 5.6. Comparaison du STI avant réhabilitation, le STI après réhabilitation, et celui optimal..... | 125 |
| 6.1. Caractéristique de la maquette et des échantillons d'essais..... | 143 |
| 6.2. Les valeurs de STI après correction, et comparaison avec le STI actuel, et celui optimal..... | 155 |
| 6.3. Récapitulation des différents résultats..... | 155 |
| 6.4. Les valeurs de STI après correction, et comparaison avec le STI actuel, et celui optimal..... | 163 |

Liste des planches

| Planche | Page |
|--|------|
| 5.1. Comparaison entre le Tr60 avant réhabilitation, le Tr60 après réhabilitation, et celui optimal..... | 118 |
| 5.2. Comparaison entre le C80 avant réhabilitation, le C80 après réhabilitation, et celui optimal..... | 119 |
| 5.3. Comparaison entre le G avant réhabilitation, le G après réhabilitation, et celui optimal..... | 119 |
| 5.4. Comparaison entre le D50 avant réhabilitation, le D50 après réhabilitation, et celui optimal..... | 120 |
| 5.5. Comparaison entre le Tr60 mesuré, le Tr60 simulé, et celui optimal..... | 121 |
| 5.6. Comparaison entre Tr60 avant réhabilitation, le Tr60 après réhabilitation, et celui optimal..... | 122 |
| 5.7. Comparaison entre C80 avant réhabilitation, le C80 après réhabilitation, et celui optimal..... | 123 |
| 5.8. Comparaison entre G avant réhabilitation, le G après réhabilitation, et celui optimal..... | 124 |
| 5.9. Comparaison entre D50 avant réhabilitation, le D50 après réhabilitation, et celui optimal..... | 124 |
| 6.1. Coefficient d'absorption dans le cas de la maquette vide..... | 145 |
| 6.2. Résultats des mesures cas de la maquette + panneau MDF et paille..... | 146 |
| 6.3. Résultats des mesures cas de la maquette +Panneau acoustique de l'Alfa..... | 147 |
| 6.4. a : les valeurs du TR60 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 151 |
| b : Comparaison entre leTR60 après correction, le Tr60actuel, et celui optimal..... | 151 |
| 6.5. a : les valeurs du C80 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 152 |
| b : comparaison entre le C80 après correction, le C80actuel, et celui optimal..... | 152 |
| 6.6. a : les valeurs du D50 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 153 |
| b : comparaison entre le D50 après correction, le D50 actuel, et celui optimal..... | 153 |
| 6.7. a : les valeurs du G après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 154 |
| b : comparaison entre le G après correction, le G actuel, et celui optimal..... | 154 |
| 6.8. a : les valeurs du TR60 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 159 |
| b : comparaison entre le TR60 après correction, le TR60 actuel, et celui optimal..... | 159 |
| 6.9. a : les valeurs du C80 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 160 |
| b : comparaison entre le C80 après correction, le C80actuel, et celui optimal..... | 160 |
| 6.10. a : les valeurs du G après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 161 |
| b : comparaison entre le G après correction, le G actuel, et celui optimal..... | 161 |
| 6.11. a : les valeurs du D50 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite..... | 162 |
| b : comparaison entre le D50 après correction, le D50 actuel, et celui optimal..... | 162 |

Liste des abréviations

| Symboles | Définition | Unité |
|----------------------|--|------------------|
| A | Aire d'absorption équivalente | m ² |
| c | Célérité du son | m/s |
| f | Fréquence sonore | Hz |
| I | Intensité acoustique | W/m ² |
| Lp | Le niveau sonore ou niveau de pression acoustique | dB |
| λ | Longueur d'onde | m |
| p | Pression acoustique | Pa |
| TR | Temps de réverbération | s |
| P ₀ | Pression atmosphérique ou pression statique | Pa |
| P _{eff} | Pression efficace | Pa |
| W | Puissance acoustique d'une source sonore | W |
| α | Coefficient d'absorption d'un matériau | |
| α_m | Coefficient d'absorption moyen | |
| T _{OPT-500} | Temps de réverbération optimal a une fréquence de 500 Hz | s |
| EDT | Première décroissance EDT (EarlyDecay Time) | s |
| C80 | La clarté | dB |
| G | Force sonore | dB |
| D50 | rapport de l'énergie des 50 premières millisecondes | |
| STI | L'indice de transmission de la parole | |
| RASTI | Indice Rapide de la transmission de la parole | |

Résumé

En Algérie, l'acoustique est un domaine qui a très peu été investi par les chercheurs. Si c'est le cas ils s'intéressent plutôt à l'acoustique physique. L'acoustique architecturale reste encore une énigme dans notre pays alors qu'elle concerne la maîtrise des critères de confort et de l'écoute dans les constructions. L'autre spécificité est la qualité acoustique des salles qui reste encore un sujet préoccupant aussi bien pour les physiciens que pour les architectes et les générations de chercheurs.

Il est clair que l'application favorisée de l'acoustique architecturale dans les espaces destinés à recevoir un public, notamment les salles de conférences, améliore d'une manière significative l'échange d'informations orales où les processus d'apprentissage impliquent une communication verbale intensive. C'est pourquoi nous nous intéressons dans cette recherche doctorale, à l'amélioration qualitative des conditions acoustiques des salles de conférences existantes en utilisant des méthodes et des matériaux économiques et durables.

En partant d'un état de l'art sur les expériences de réhabilitations acoustiques durables des salles nous avons identifié les exigences qualitatives des salles d'écoute, ainsi que les méthodes de réhabilitation durables qui procurent des avantages environnementaux, sociaux et économiques.

Pour ce faire une étude expérimentale de mesure in-situ à travers une maquette acoustique a été engagée pour définir les caractéristiques acoustiques de deux matériaux, la paille et l'alfa. Ces deux fibres naturelles présentent plusieurs avantages spécifiques, notamment leur abondance, leur capacité de renouvellement, leur recyclabilité et leur haute résistance spécifique. La simulation numérique pour l'étude des corrections acoustiques, nous a permis de démontrer l'efficacité de l'utilisation des matériaux étudiés dans l'amélioration significative des conditions acoustiques des salles de conférences étudiées.

En termes de conclusion, cette recherche a permis d'établir des lignes directrices et des recommandations qui intègrent la notion de la qualité acoustique durable dans la conception et la réhabilitation des salles de conférences.

Mots clés : Qualité acoustique, confort de l'écoute, réhabilitation acoustique, salle de conférence, matériaux durables.

Abstract

In Algeria, acoustics is a field that has been very little invested by researchers. If this is the case, they are more interested in physical acoustics. Architectural acoustics still remains an enigma in our country, even though it concerns the control of comfort criteria and listening in buildings. The other specificity is the acoustic quality of the rooms which is still a subject of concern for physicists as well as for architects and generations of researchers.

It is clear that the favoured application of architectural acoustics in spaces intended to receive an audience, especially conference rooms, significantly improves the exchange of oral information where learning processes involve intensive verbal communication. Therefore, in this doctoral research we are interested in qualitatively improving the acoustic conditions of existing conference rooms based on the use of economical and sustainable methods and materials.

Starting from a state of the art on experiences of sustainable acoustic rehabilitation of rooms, we have identified the qualitative requirements of listening rooms, as well as sustainable rehabilitation methods that provide environmental, social and economic benefits.

To carry out this work, an experimental in-situ measurement study using an acoustic model was undertaken to define the acoustic characteristics of two materials, straw and allies. These two natural fibres have several specific advantages, including their abundance, renewal capacity, recyclability and high resistance. Numerical simulation for the study of acoustic corrections has enabled us to demonstrate the effectiveness of the use of the materials studied in significantly improving the acoustic conditions of the studied conference rooms.

In terms of conclusion, this research has allowed us to establish guidelines and recommendations that integrate the notion of sustainable acoustic quality in the design and rehabilitation of conference rooms.

Key words: acoustic quality, listening comfort, acoustic rehabilitation, conference room, sustainable materials

الخلاصة :

الصوتيات في الجزائر مجال لم يستثمره الباحثون كثيرًا. فهم مهتمون أكثر بالصوتيات المادية. لا تزال الصوتيات المعمارية تشكل لغزًا في بلدنا ، على الرغم من أنها تتعلق بالتحكم في معايير الراحة والاستماع في المباني. الخصوصية الأخرى هي الجودة الصوتية للغرف التي لا تزال موضع قلق للفيزيائيين وكذلك للمهندسين المعماريين وأجيال من الباحثين.

من الواضح أن التطبيق المفضل للصوتيات المعمارية في المساحات المخصصة لاستقبال الجمهور، وخاصة قاعات المؤتمرات، يحسن بشكل كبير تبادل المعلومات الشفوية حيث تتضمن عمليات التعلم اتصالًا شفهيًا مكثفًا. لذلك ، في بحث الدكتوراه هذا ، نحن مهتمون بتحسين النوعي للظروف الصوتية لقاعات المؤتمرات الحالية بناءً على استخدام الأساليب والمواد الاقتصادية والمستدامة.

بدءًا من أحدث التجارب في إعادة التأهيل الصوتي للمستدام للغرف ، حددنا المتطلبات النوعية لغرف الاستماع ، بالإضافة إلى طرق إعادة التأهيل المستدامة التي توفر فوائد بيئية واجتماعية واقتصادية.

لتنفيذ هذا العمل، تم إجراء دراسة قياس تجريبية في الموقع باستخدام نموذج صوتي لتحديد الخصائص الصوتية لمادتين، القش والحلفاء. يتمتع هذان النوعان من الألياف الطبيعية بالعديد من المزايا المحددة، بما في ذلك وفرتها وقدرتها على التجديد وقابلية إعادة التدوير والمقاومة العالية. لقد مكنتنا المحاكاة العددية لدراسة التصحيحات الصوتية من إثبات فعالية استخدام المواد المدروسة في تحسين الظروف الصوتية لقاعات المؤتمرات المدروسة بشكل ملحوظ.

من حيث الخلاصة ، سمح لنا هذا البحث بوضع مبادئ توجيهية وتوصيات تدمج فكرة الجودة الصوتية المستدامة في تصميم وإعادة تأهيل قاعات المؤتمرات.

الكلمات الأساسية: الجودة الصوتية ، راحة الاستماع ، إعادة التأهيل الصوتي ، غرفة الاجتماعات ، المواد المستدامة

**CHAPITRE I : CHAPITRE
INTRODUCTIF**

Introduction

قال تعالى: ((إِنَّ السَّمْعَ وَالْبَصَرَ وَالْفُؤَادَ كُلُّ أُولَئِكَ كَانَ عَنْهُ مَسْنُونًا))¹ صدق الله العظيم

De la grâce de Dieu, nous nous sommes dotés des cinq sens, le sens de l'ouïe est l'un des sens les plus importants, il est toujours présent chez l'homme, même en dormant il diminue d'intensité mais il est toujours fonctionnel, sinon l'homme sombrera dans un sommeil profond comme le cas de ceux décrit dans sourate Elle Kahf.

فالتعالى ((فَضَرَبْنَا عَلَى آذَانِهِمْ فِي الْكُهْفِ سِنِينَ عَدَدًا))² صدق الله العظيم

Le son est donc une constante; on entend toujours quelque chose. Mais nous ne le voulons pas toujours de cette façon - quand nous voulons du silence, tout son devient soudainement du bruit, un son indésirable. Et même si nous avons la chance de le rendre presque totalement silencieux autour de nous, il y a toujours du son - du son de l'intérieur de nous, notre sang circulant. Ainsi, le son est toujours présent et nos oreilles ne sont jamais éteintes. On n'échappe jamais au son, mais on s'y habitue sans réflexion.

Le son se transmet par des vibrations des particules d'air entre l'émetteur et le récepteur dans notre gamme audible. Le son n'existe pas dans le vide, car la transmission sonore nécessite un milieu matériel (Rudi, Joran., 2008).

Tous les sons ont lieu dans un espace clos ou libre, et cette recherche, ambitieuse d'analyser la transmission de ces derniers dans les espaces clos, les salles de conférence. Il est difficile de définir la relation entre l'espace et le lieu car elle est affectée par le contexte dans lequel elle se produit, un contexte à la fois physique et social. Nous écoutons différemment dans une galerie que dans une salle de concert, comme nous écoutons dans une salle de concert d'une manière différente de celle d'un stade de foot. Comme mentionné ci-dessus, écouter ne concerne pas uniquement l'audition; l'écoute est culturellement déterminée, et elle est située. Une perspective analytique sur la relation entre le son et l'espace consiste donc à se demander si la salle dépend d'un espace, d'un lieu ou d'un environnement spécifique pour lui donner du sens et être appréciée.

La science qui étudie la relation entre **le son et l'espace se nomme** « l'acoustique architecturale ». Cette dernière doit cuirasser l'écoute ou, inversement, apporter une protection contre le bruit quand celui-ci est une cause de gêne. Dans tous les cas, il est

¹ سورة الاسراء الآية 36
² سورة الكهف الآية 11

nécessaire de comprendre comment le son se propage dans l'espace afin d'en maîtriser le cheminement et la réception.

La propagation du son est l'objet de recherches depuis fort longtemps. Dans l'antiquité, des savants, tel Pythagore, étudiaient les cordes vibrantes ; des architectes, tel que Vitruve, réfléchissaient au cheminement du son dans les théâtres. Au moyen âge, l'acoustique occupait une place prépondérante dans l'enseignement scientifique, elle faisait partie du quadrivium³ avec l'arithmétique, la géométrie, et l'astronomie, sans qu'elle connut pour autant d'avancée significative. Au XVII^e siècle, les bases de l'acoustique ont été reprises par des chercheurs comme Galilée, là où Pythagore les avait laissées. Mais c'est seulement dans la seconde moitié du XIX^e que des progrès importants ont été réalisés grâce à **Lord Raleigh** auteur de *Theory of sound*, à **Hermann Von Helmholtz**, le théoricien des résonateurs, et à **C Sabine**. Depuis cette époque, la maîtrise des sons et des bruits s'est améliorée aussi vite qu'ont augmenté les nuisances dues au bruit (Hamayon, Loïc., 2008).

En Algérie, la notion de confort acoustique a été prise en considération par les pouvoirs publics dès 1983 en promulguant la loi N°83-03 du 05 Février 1983, relative à la protection de l'environnement. (Boukadoum Amina., 2012).

La réglementation algérienne, liée au confort acoustique, vise à sensibiliser les personnes à la lutte contre le bruit, d'interdire toute utilisation de dispositifs exhalant du bruit, et qui sont susceptibles de troubler le repos et la tranquillité des habitants, ainsi que l'interdiction des bruits produits à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitation qui peuvent empêcher et gêner la tranquillité du voisinage⁴. Elle vise aussi à fixer les mesures et les méthodes à respecter pour le bruit provoqués par les véhicules automobiles et les moyens de transport, qui sont considérés comme la première source de bruit dans l'environnement⁵ ainsi qu'à

³Le terme **quadrivium** désigne l'ensemble des quatre sciences mathématiques dans la théorie antique : arithmétique, géométrie, musique, astronomie

⁴ Arrêté du 25 février 1964 relatif à la lutte contre le bruit excessif

⁵ Arrêté du 4 avril 1972 relatif à la mesure du bruit produit par les véhicules automobiles et aux conditions imposées aux dispositifs dits "silencieux"

réglementer l'émission des bruits⁶ et définir les méthodes d'isolation phonique des constructions⁷.

En Algérie, comme nous le constatons un intérêt non négligeable est accordé à l'isolation contre les nuisances sonores, à travers la loi 1983, les décrets exécutifs et les arrêtés, par contre l'acoustique des salles a été largement explorée. Nombreuses sont les nouvelles constructions ou les opérations de réhabilitation des salles qui ne prennent pas en compte les principes acoustiques courants qui privilégient une intelligibilité et une clarté de son optimisée.

⁶Décret exécutif n° 93- 184 du 27 juillet 1993, JORA n°50 du 28/07/1993.

⁷ CNERIB, Document technique réglementaire DTR C3.1.1, *Isolation acoustique des parois aux bruits aériens, Règles de calcul*, Alger 2004.

1.1. Problématique.

L'acoustique des salles, constitue un sous-domaine de l'acoustique architecturale, définie comme étant l'articulation entre deux champs disciplinaires, celui de l'architecture et de l'acoustique (Benmaghsoula Zohra., 2017). Elle est le domaine de l'acoustique qui décrit comment le son se propage dans un espace fermé ou semi-fermé. Chaque espace a sa propre «empreinte acoustique» qui affecte la qualité du son, qu'il s'agisse de parole, de musique ou de tout type de bruit. Les spécialistes essaient de comprendre le comportement du son dans les espaces et de les rendre adaptés à différentes fins. Une salle de classe doit être bien conçue pour une transmission claire de la parole du professeur aux étudiants, tandis qu'une salle de concert doit prolonger et enrichir le son d'un orchestre pour le rendre impressionnant.

Tout comme l'acoustique urbaine qui mérite plus que jamais d'être intégrée aux exigences de développement durable et aux stratégies de long terme des collectivités (Djellali Dahmane., 2015), la qualité acoustique dans les salles des équipements culturels que ce soit un théâtre, un opéra, un cinéma ou une salle de conférences doit être conforme aux normes pour assurer un confort d'écoute et un bien être aux utilisateurs de l'espace. Il est clair que l'un des aspects les plus importants des salles qui reçoivent des auditeurs est la capacité à leur fournir un niveau de son agréable et une intelligibilité parfaite.

La qualité acoustique des salles a toujours été un sujet fascinant aussi bien pour les physiciens que pour le public, pour les architectes que pour des générations de chercheurs.

Selon Eckhard KAHLE « *la qualité acoustique d'une salle ne peut pas uniquement être décrite par un jugement de type (mauvais | bon). Il existe des salles qui sonnent très différemment, mais qui peuvent être aussi bonnes l'une que l'autre* » (KAHLE, Eckhard., 1995).

La qualité acoustique d'une salle, ou même de différents emplacements à l'intérieur d'une salle, sera définie grâce à la totalité des aspects perceptifs qui permettront de distinguer les différentes situations acoustiques.

La qualité, dans le sens de préférence subjective, n'est donnée qu'après l'évaluation de tous ces aspects, tenant compte en outre du goût personnel de l'auditeur et de l'adaptation de la salle à un type de musique ou ce lui d'une parole.

L'acoustique des salles vise à offrir la meilleure qualité possible d'écoute à différents lieux dédiés au spectacle ou non : salle de concert, théâtre, opéra, salle de conférence mais aussi aux lieux publics comme des halls d'entrée, des gymnases, des piscines, des réfectoires...

Le problème de la qualité acoustique des salles est multidimensionnel : géométrique (ou physique), objectif (lié au champ acoustique), subjectif, (lié à la perception) (Gramez, Abdelghani., 2010).

Dans les salles de paroles (amphithéâtres, mosquées, salle de conférences, salles de réunion, salles de classe.....) **les paroles entendues par les auditeurs doivent être intelligibles** (Eurich B et al., 2019).

Malheureusement, nombreux sont les architectes et les concepteurs qui construisent des salles de conférence en considérant principalement la forme architecturale pour souligner le message iconographique sans enquêter suffisamment sur la qualité acoustique. Dans de nombreux cas, les concepteurs proposent des géométries elliptiques ou irrégulières en utilisant des matériaux avec des coefficients d'absorption et de diffusivité inappropriés. Ainsi, nous observons la survenue de graves problèmes acoustiques tels que les ondes stationnaires, l'écho de flottement, la focalisation du son ou encore les réflexions tardives intensives (supérieures à 100 ms) qui diminuent sérieusement l'intelligibilité de la parole et diminuent l'efficacité de l'énergie sonore précoce. Il a été constaté par de nombreuses recherches que la répartition inégale des sons dans toute la zone occupée par les auditeurs peut entraîner des problèmes d'audition qui peuvent être résolus par des solutions de réhabilitation acoustique.

Le recours aux méthodes d'acoustique en vue de réhabiliter un lieu d'écoute a toujours été dicté par la nécessité de résoudre des problèmes complexes, liant aspects technique et facteurs sensibles. En effet l'adéquation de la qualité acoustique d'un lieu d'écoute à sa destination (théâtre, opéra, salle de conférence, mosquée....) dépend de la correspondance entre son utilisation effective et son architecture (forme, matériaux, organisation des espaces). Pour les usagers auditeurs et exécutants, cette qualité est liée à un certain nombre d'impressions auditives, de sensations sonores indispensables au confort d'écoute des sources : voix parlée ou chantée, formation musicale restreinte ou étendue, etc. L'ensemble de ces caractères n'est évidemment apprécié et mesuré par des critères objectifs, (répartition de l'énergie sonore, pourcentage de réflexions latérales, réverbération, temps

de décroissance précoce, clarté, intelligibilité) que lorsque la salle existe en vraie grandeur (Adolphe Luc.,1998).

On conçoit ainsi l'importance d'une reconstitution fidèle et fiable des phénomènes acoustiques dans une image de la réalité qui serve à améliorer et valider les solutions proposées.

L'élaboration d'un modèle de salle réhabilitée exige de l'architecte une quantité d'informations graphiques et dimensionnelles qui, variable suivant la précision des résultats attendus, se heurte aux limites imposées par chacune des méthodes proposées par l'acousticien, avec qui il doit collaborer depuis la réflexion sur le programme de la réhabilitation.

La réhabilitation acoustique, est donc une opération très importante qui consiste à l'amélioration et au renforcement de l'isolement et de la qualité acoustique des bâtiments existants pour bénéficier d'un meilleur confort acoustique. **L'obtention d'une bonne réhabilitation acoustique dépend, d'une part, du volume et la forme de la salle et, d'autre part, de la qualité des parois la délimitant, et notamment des matériaux qui peuvent être disposés sur ces parois.** C'est pour mieux développer cette théorie que cette présente recherche a eu lieu. Elle a consisté à une investigation approfondie afin de tester et d'améliorer les conditions acoustiques des salles d'écoutes, et ce, grâce à une analyse de deux salle de conférence que nous avons choisies pour les besoins de l'étude avant et après réhabilitation, il s'agit de **la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad et la salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa.** Parmi les plus grandes salles de conférence de la ville de Constantine, les deux salles ont bénéficié d'une opération de réhabilitation en 2014 lancée dans le cadre de la manifestation « Constantine, capitale de la culture arabe 2015 ». Selon un sondage réalisé auprès des usagés, les deux salles ont connu un changement de comportement acoustique significatif.

Pour la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad les usagés confirme que la qualité du son est devenu meilleurs et que la salle a vraiment connu une amélioration acoustique significative.

Pour la salle **de conférence de la maison de la culture El Khalifa,** Les opinions étaient différentes, les usagers trouvaient toujours du mal pour comprendre les conférences qui s'y déroulent même après réhabilitation.

Nous allons présenter à travers cette recherche une étude critique de la réhabilitation acoustique des deux salles de conférences pour démontrer l'impact de cette dernière sur la qualité acoustique des deux salles.

Pour développer ce qui vient d'être énoncé nous posons les questionnements suivants

Par quel moyen peut-on évaluer la qualité acoustique d'une salle existante ?

Comment procéder à la réhabiliter d'une salle de conférence existante par l'amélioration de sa qualité acoustique?, et ce, tout en utilisant des solutions passives et durables ?

1.2. Hypothèses

L'environnement, l'écologie, le développement durable sont aujourd'hui à la une de toutes les politiques internationales, et leur objectif est d'intégrer la protection de l'environnement à tous les niveaux de la réflexion et de la stratégie du développement durable. On est de plus en plus conscient que l'on doit faire du développement durable une dimension à part entière dans tout ce qui touche l'homme (Debache Benzagouta., 2004)

De ce fait les hypothèses principales de notre recherche relèvent d'une conviction que

- La réhabilitation acoustique des salles existantes doit respecter l'environnement en utilisant des matériaux absorbants durables qui sont des produits qui procurent des avantages environnementaux, sociaux et économiques tout en protégeant l'environnement tout au long de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur élimination finale.

-Une bonne maîtrise du volume de la salle de conférence par l'utilisation des réflecteurs améliore d'une manière significative la qualité acoustique de cette salle.

1.3. Objectifs de la recherche

L'objectif principal de la présente recherche est la réhabilitation acoustique des salles existantes par l'utilisation de matériaux durables afin d'améliorer leurs performances définies par des paramètres de la qualité acoustique (TR60, G, C80, D50, STI).

La thématique de ce travail constitue une importante préoccupation pour les concepteurs, architectes, physiciens, décideurs et planificateurs. Elle s'inscrit dans le cadre d'une démarche de développement durable permettant non seulement de maîtriser le confort acoustique des salles de conférences mais aussi d'utiliser des matériaux écologiques et économiques. D'autre part, les traitements sonores sont utilisés lorsqu'on souhaite améliorer la qualité du son dans un environnement pour les convives d'entendre et de comprendre les conversations autour de leurs tables dans un restaurant, pour les étudiants pour mieux assimiler les cours donnés par leurs enseignants, pour tout le public de profiter de l'ampleur de la musique dans une salle. Lorsque les sons sont réfléchis, ils provoquent une augmentation des niveaux généraux d'écho et de réverbération dans un espace. Lors du traitement correct des salles, l'écho et la réverbération sont réduits et pour traiter acoustiquement les pièces, deux méthodes sont disponibles: l'absorption et la diffusion du son. Les meilleures stratégies de traitement combinent ces deux techniques. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre démarche en testant en plus des matériaux nouveaux disponibles localement et écologiques pour une amélioration de l'acoustique de la salle de conférence et en même temps pour diminuer la consommation énergétique et éviter la pollution de l'environnement.

Méthodologie d'approche

La nature du sujet impose souvent la méthodologie d'approche appropriée à une meilleure maîtrise des différents éléments thématiques. L'étude et la compréhension de la réhabilitation acoustique durable en tant que norme architecturale et physique complexe, nous ont dicté, conformément au postulat avancé plus haut, à adopter une démarche graduelle en partant de l'aspect général et théorique vers l'aspect détaillé et pratique.

Après avoir **formulé ou posé** la problématique liée au thème abordé, le travail a débuté par la constitution d'un corpus théorique qui a consisté à rassembler une bibliographie conséquente se rapportant au sujet traité.

Ces données nous ont permis d'élaborer une première partie théorique qui aborde les notions de base sur l'acoustique architecturale, l'acoustique des salles et plus précisément l'acoustique des salles de conférences, ainsi que celles relatives à la réhabilitation acoustique durable ainsi qu'aux différentes stratégies de correction acoustique des salles de parole.

La partie empirique est consacrée à l'investigation basée essentiellement

- Sur une étude expérimentale, par une campagne de mesure à l'aide d'une instrumentation (source omnidirectionnelle, amplificateur et microphone omnidirectionnel) menée sur le premier cas d'étude (salle de conférence Malak Hadad)
- Suivie par une étude paramétrique, en simulant à l'aide du logiciel Olive TreeLab Suite, les performances acoustiques des salles étudiées qui servira en premier lieu à confronter les résultats de l'étude expérimentale avec ceux de la simulation, tout en permettant d'évaluer les préférences acoustiques des salles de conférence étudiées avant et après la réhabilitation.
- une deuxième étude expérimentale menée sur une maquette acoustique maquette conçue et réalisée à échelle réduite de la salle de conférence qui déduira les coefficients d'absorption des matériaux proposés pour la correction des deux salles de conférences. Les matériaux proposés sont l'Alpha, largement répandu au vaste sud de l'Algérie et la paille qui est un produit agricole issu de la culture de céréales, des matériaux locaux, largement abondants avec des prix dérisoires et pas nocif pour la santé. Le seul cout que présentent ces matériaux de revêtement c'est leur mise en forme sous forme de panneaux acoustiques, mais leur cout reste largement intéressant par rapport aux matériaux importés.
- Enfin une simulation numérique, toujours par le biais du logiciel Olive TreeLab Suite, qui permettra de montrer l'impact des corrections proposées sur la qualité acoustique des deux salles de conférences objets du cas d'étude.

Structure de la thèse :

Cette thèse est composée de deux parties :

La première est dédiée à une introduction générale qui expose notre problématique et met au clair nos hypothèses et nos objectifs. Elle compte trois chapitres théoriques, le premier aborde des notions générales sur l'acoustique architecturale, le second précise les exigences de l'acoustique des salles de conférences (salle de parole) et le troisième chapitre présente un état de l'art qui fera l'objet d'une synthèse des recherches, travaux et écrits sur l'acoustique des salles, la réhabilitation acoustique et les matériaux écologiques.

La deuxième partie est consacrée à l'expérimentation et la simulation développées sur deux chapitres

Le chapitre IV, présente une analyse acoustique des deux cas d'études avant et après la réhabilitation à travers une étude expérimentale, englobant mesures acoustiques et maquette numérique et une simulation numérique avec le logiciel Olive Tree Lab Suite, afin de définir les défaillances et les problèmes sonores des salles étudiées. Le chapitre V présente des propositions pour améliorer la qualité acoustique des deux espaces et les possibilités d'atteindre une bonne performance acoustique en utilisant des matériaux écologiques et disponibles localement. Nous terminons notre travail de thèse avec une conclusion générale et des pistes pour des recherches futures (Fig1.1).

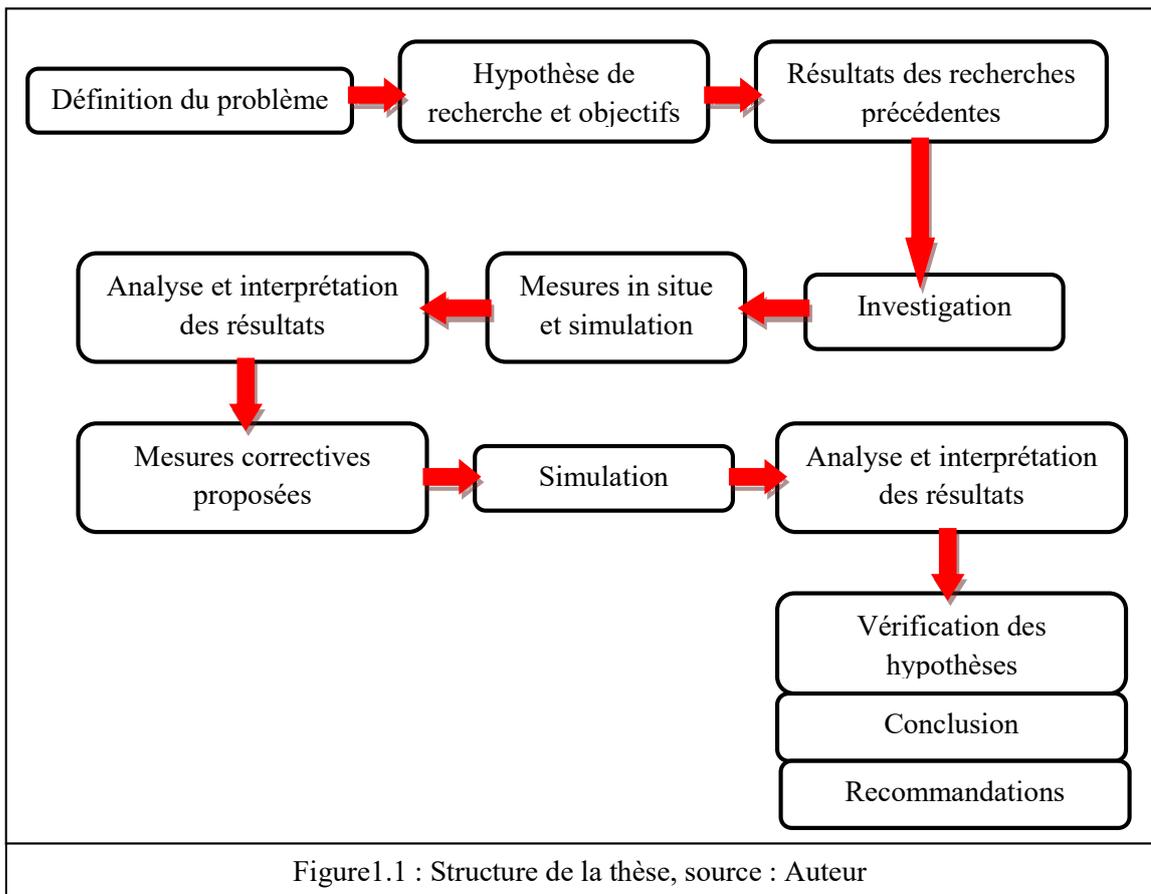


Figure1.1 : Structure de la thèse, source : Auteur

CHAPITRE II : GENERALITES
SUR L'ACOUSTIQUE
ARCHITECTURALE

Introduction

L'acoustique, en tant que science physique du son, occupe une place singulière dans les champs de la science moderne. Elle est le domaine de la science qui a pour buts d'étudier les problèmes physiques, physiologique et psychologique liés à l'émission, la propagation et la réception des sons et des bruits.

L'application favorisée de l'acoustique architecturale est bien entendue la construction des salles de spectacle, de conférence et de studios d'enregistrement, mais cette technique est aussi utilisée dans la conception d'autres bâtiments comme les lieux de travail, les maisons d'habitation pour lesquels la qualité acoustique peut avoir d'importantes implications en matière de santé et de bien être.

Ce chapitre a pour objectif, d'une part, de dévoiler les phénomènes acoustiques qui régissent l'univers sonore qui nous entoure, et d'autre part, de se familiariser aux différentes techniques de calculs utilisées lors de la conception des espaces (Jedidi Malek et Soussi Chokri ., 2013) . Ce chapitre présente aussi les notions fondamentales de base de l'acoustique nécessaires à la compréhension des phénomènes de propagation des ondes et de leur origine, ainsi qu'une description des paramètres servant à définir le confort acoustique.

2.1. Son et bruit

2.1.1. Définition du Son

Le son est un phénomène vibratoire, natif du mouvement périodique d'un système matériel autour d'un point d'équilibre (Hamayon, Loïc., 2008).

Il est donc la sensation auditive engendrée par une onde acoustique qui se propage dans un milieu. L'onde acoustique résulte d'une vibration de l'air due à une suite de pression et de dépression. Tout son résulte de la vibration d'un corps. Dans l'air, la vibration des molécules se transmet de proche en proche depuis la source jusqu'à l'organe de réception qui peut être un appareil de mesure ou l'oreille humaine.

Le son nécessite une source, un support de transmission et un récepteur. La source est simplement un objet qui est amené à vibrer par une source d'énergie externe. Le support de transmission est la substance qui transporte l'énergie sonore d'un endroit à un autre, le milieu est généralement l'air, bien qu'il puisse s'agir d'eau ou de toute substance solide telle que du métal ou du bois (Foreman, John., 2012)

2.1.2. Type du son

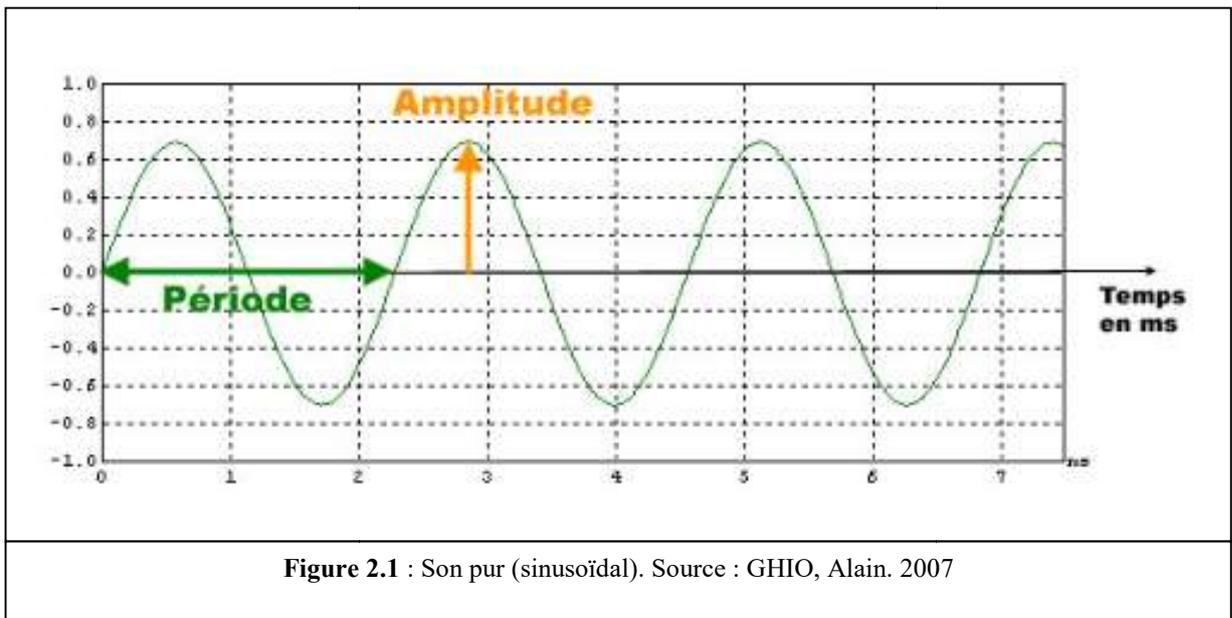
2.1.2.1. Son pur

Un son pur est une sensation auditive provoquée par une onde de pression purement sinusoïdale.¹La distance qui sépare les états identiques de deux ondes contiguës est la longueur d'onde λ . La distance qui sépare les états identiques de deux ondes contiguës est la longueur d'onde λ (Fry, Alan., 1988).

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 : $\lambda = c/f$

Ainsi, la célérité du son dans l'air étant de l'ordre de 340m/s 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 (Fig2.1).

¹Remarque : Le son pur, très désagréable, n'existe pas dans la nature.



2.1.2.2. Son complexe

C'est le son émis sur beaucoup de fréquences à la fois, et pour le présenter un couple de grandeurs n'est plus suffisant (Tran, Bui Vran., 1996). Dans ce cas on doit recourir à la notion de « spectre sonore ».

2.1.3. Spectre sonore

Le spectre sonore d'un son complexe est la courbe qui présente la relation soit entre l'intensité acoustique I et la fréquence f , soit entre le niveau physique L et la fréquence f ou bien entre la pression acoustique P et fréquence f de ce son. (Fig2.2)

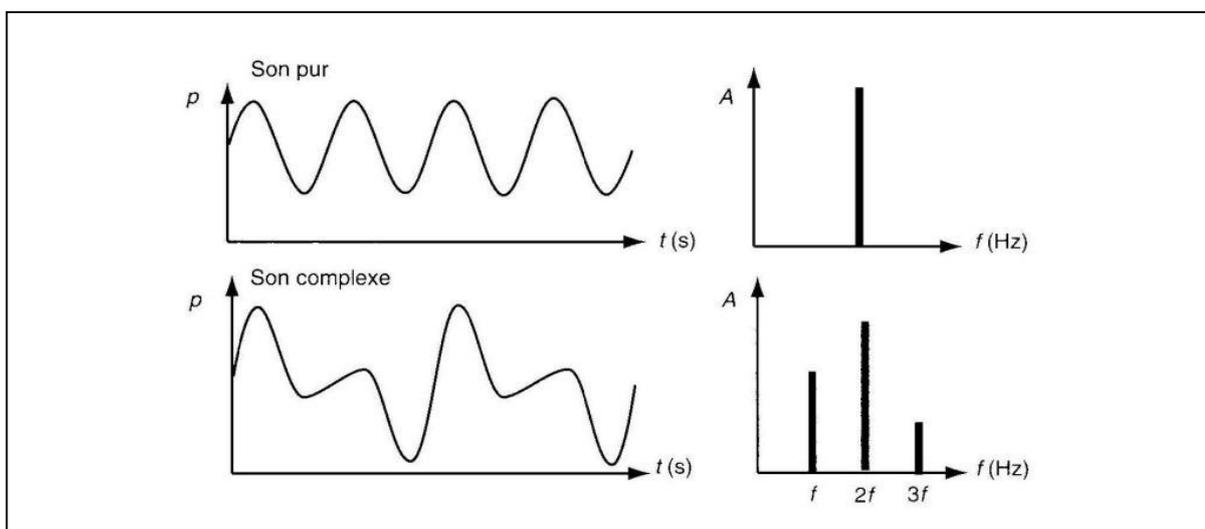


Figure 2.2 : Spectre d'un son pur et d'un son complexe. Source : Mazzuoli-S L., (2007)

2.1.4. Définition du bruit

Physiquement, le bruit est défini comme le mélange complexe de sons de fréquences différentes. Ce mot est également employé sous deux acceptions (éclairées par le contexte) :

Phénomène acoustique produisant une sensation auditive désagréable. Tout phénomène acoustique produisant une sensation auditive, désagréable ou non (Hamayon Loïc., 2013)

2.1.5. Type du bruit

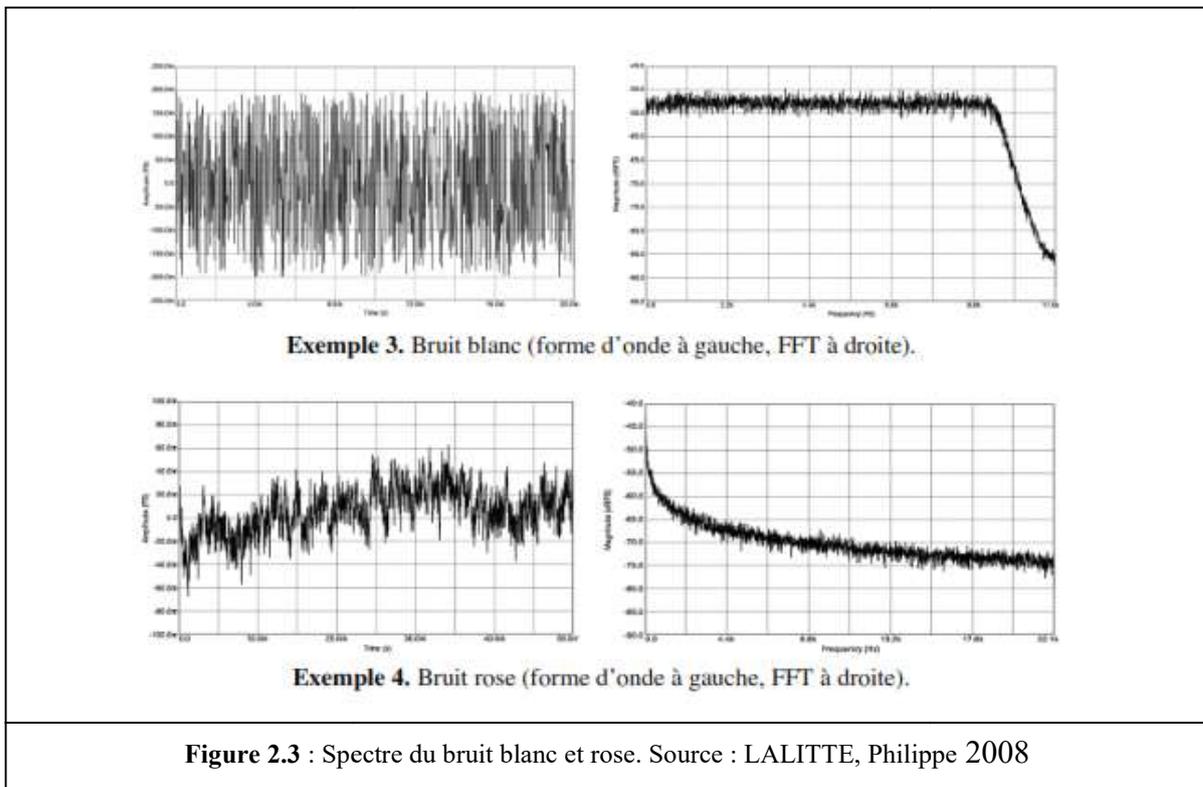
2.1.5.1. Bruit blanc

Bruit qui contient toutes les fréquences audibles au même niveau de pression sonore. Une bande d'octave dans les aigus contient plus de fréquences, et donc plus d'énergie, qu'une bande d'octave dans les graves.

2.1.5.2. Bruit rose

Bruit normalisé qui a une énergie constante par unité d'intervalle logarithmique, c'est-à-dire que l'énergie contenu dans chaque bande d'octave ou de tiers d'octave est constante. Les bandes d'octaves sont centrées sur 125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz.

Ce bruit normalisé est sensé simuler les bruits émis à l'intérieur des bâtiments ainsi que les bruits émis par le trafic aérien (Fig2.3).



2.2. Ondes sonores

2.2.1. Définition

En général les ondes mécaniques peuvent se produire sur n'importe quelle fréquence, mais si elles se produisent sur les fréquences comprises entre 16 Hz et 15000 à 20000Hz l'oreille humaine peut les percevoir. Dans ce cas les ondes mécaniques s'appellent ondes sonores ou bien ondes acoustiques.

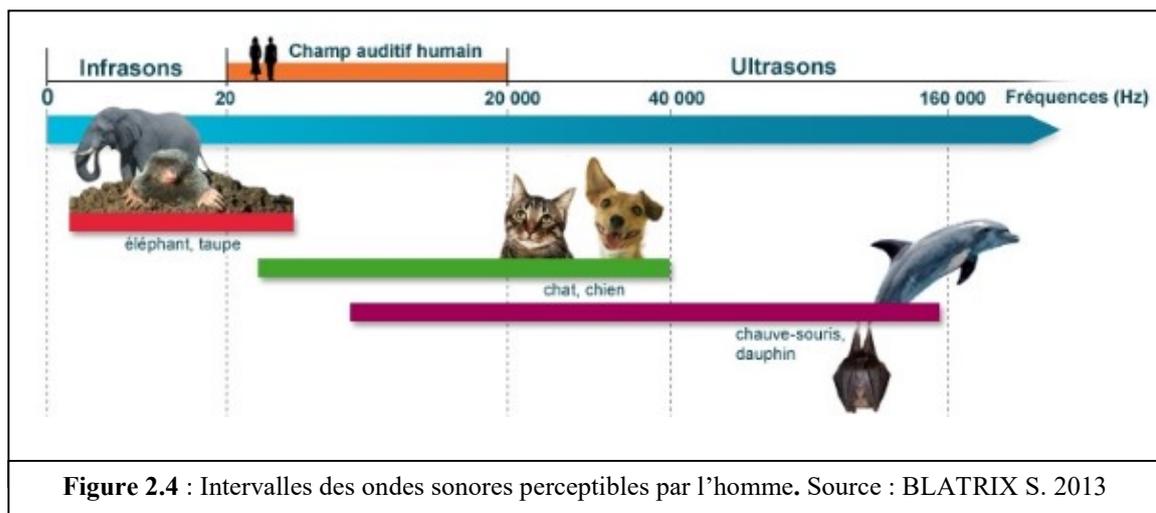
2.2.2. Intervalles intéressants

Si les ondes mécaniques se produisent dans l'intervalle des fréquences inférieures à 16 Hz, elles ne sont pas perceptibles pour l'homme, et s'appellent infra-sons ou bien ondes infrasonores. Si les ondes mécaniques se produisent dans l'intervalle des fréquences supérieures à 16.000 Hz, elles ne sont pas plus perceptibles pour l'homme, et s'appellent ultra-son ou bien ondes ultrasonores (Fig2.4).

Les architectes et les ingénieurs de génie civil s'intéressent aux fréquences de 125 à 4000 Hz, quelquefois de 100 à 6400 Hz. Selon eux les sons intéressants sont classés en trois groupes :

- _ Graves : 100 à 400 HZ
- _ Mediums : 400 à 1600 Hz
- _ Aigus : 1600 à 6400 Hz

La voix humaine émet des sons de 100 à 1000 Hz pour un homme et des 250 à 1000 Hz pour une femme



2.2.3. Caractéristiques énergétiques des ondes sonores

2.2.3.1. Pression acoustique

Les vibrations acoustiques dans l'air se traduisent en un point par des fluctuations rapides de la pression autour de la pression atmosphérique P_0 (pression statique). On a donc :

$$P_{\text{total}} = P_0 + p(t)$$

Où $p(t)$ est la pression acoustique. L'oreille n'est sensible qu'aux fluctuations de pression, c'est-à-dire à $p(t)$. Les ordres de grandeurs de P_0 et $p(t)$ sont très différents : la pression statique P_0 est (sous conditions atmosphériques classiques) égales à 1.013.105 Pa, alors que les fluctuations acoustiques dépassent rarement quelques dizaines de Pa.

La pression efficace P_{eff} entre les instant t_1 et t_2 est définie par :

$$p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

Dans le cas d'un son pur (une seule fréquence), on montre que la pression efficace est :

$$p_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

2.2.3.2. Intensité acoustique

L'intensité du son est très utile pour étudier les propriétés énergétiques d'un champ sonore. Par conséquent, il a fait l'objet de beaucoup d'attention dans le passé.

L'oreille humaine peut percevoir les variations périodiques de la pression atmosphérique à condition que ces variations soient très rapides, c'est-à-dire qu'elles se reproduisent au minimum 20 fois par secondes. Cette variation de pression a pour origine une source sonore qui libère une énergie donnée par unité de temps. Cette énergie, exprimée en watts (W) et appelée «puissances acoustique», est symbolisée par les lettres W ou P (Miroslaw, Meissner., 2013).

Depuis la source sonore, l'énergie repartit dans l'espace pour arriver à nos oreilles. On détermine ainsi l'intensité acoustique I (ou puissance surfacique moyenne) exprimée en watts par mètre carré (W/m^2), qui est la quantité d'énergie traversant une surface de un mètre carré par seconde².

² L'intensité que peut percevoir l'oreille humaine varie de $10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$ à $1 \text{ W}/\text{m}^2$.

2.2.3.3. Niveau sonore

Le niveau sonore ou niveau de pression acoustique (L_p) caractérise l'amplitude du son. Le niveau sonore s'exprime en Pascal (Pa). L'échelle de perception de l'oreille humaine étant très vaste, on utilise dans la pratique une échelle logarithmique pour caractériser l'amplitude sonore (Michel, Chagué., 2001).

Cette échelle réduite s'exprime en décibel (dB). Le niveau sonore permet de définir la puissance d'un son.

$$L_p = 10 \log \frac{Pe^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{Pe}{P_0} \quad \text{Où :}$$

p : pression acoustique efficace (Pa)

P_0 : pression acoustique de référence, égale à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Elle correspond à la pression minimale perceptible par l'oreille en l'absence de bruit de fond à la fréquence de 1000 Hz.

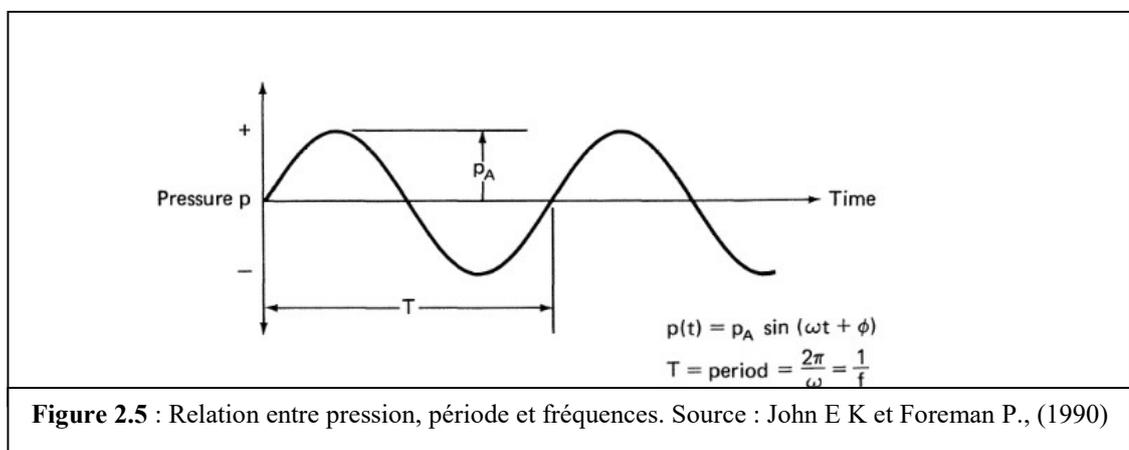
2.2.3.4. Fréquence sonore

La fréquence f est le nombre de cycles par unité de temps. La variation de pression est périodique, une variation complète de pression étant appelée cycle. Le temps T pour un cycle complet s'appelle la période d'oscillation de pression. La fréquence de changement de pression f est définie comme le nombre de cycles par unité de temps (Fig2.5) (cycles par seconde ou Hertz, abrégé en Hz)

$$f = \frac{1}{T}$$

A la fréquence f est liée la sensation de hauteur des sons :

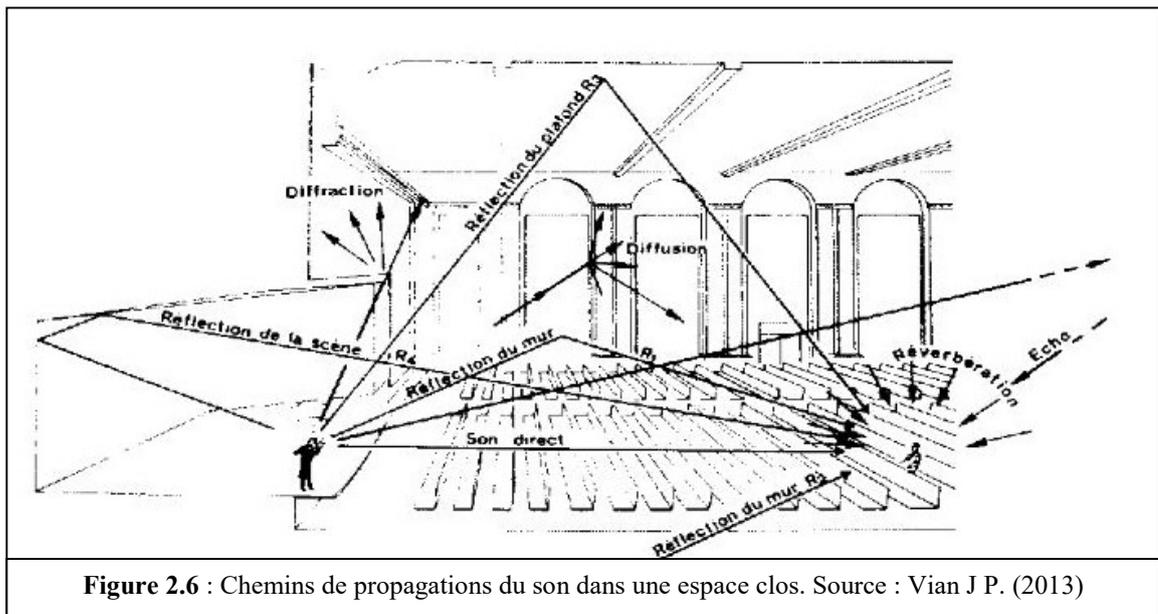
Aux basses fréquences correspondent les sons graves, aux fréquences élevées correspondent les sons aigus (Ouertani, Aida., 2004).



2.3. Comportement du son dans un espace clos

Lorsqu'un spectateur est assis dans un espace clos, les sons émis depuis la scène lui parviennent par différents chemins acoustiques. Il perçoit tout d'abord le son qui se propage de façon directe. Ensuite, il reçoit ce même son, mais décalé dans le temps par rapport à l'onde directe du fait qu'il s'est réfléchi sur les parois et a donc parcouru un trajet plus long.

Le spectateur reçoit donc une succession d'ondes sonores comme suit (Fig2.6) :



2.3.1. Diffusion

La diffusion du son est le résultat de tous les changements de directions des ondes sonores provoqués simultanément par des phénomènes de réflexion, de réfraction et de diffraction.

Réflexion : changement de direction de l'onde sonore arrivant sur une paroi sous incidence donnée.

Réfraction : changement de direction de l'onde sonore dû aux variations de la vitesse de propagation dans le milieu.

Diffraction : changement de direction de l'onde sonore provoqué par des obstacles (arêtes ou surfaces courbes).

2.3.2. Réverbération acoustique

La réverbération est le phénomène de prolongation du son dans un espace fermé, elle se comprend soit par l'extinction du régime libre de l'acoustique ondulatoire, soit par les réflexions tardives formant un continuum, de l'acoustique géométrique.

Pour qualifier le phénomène, Sabine introduisit la notion de temps ou de durée de réverbération T_r , intervalle de temps nécessaire pour que le niveau de pression l_p décroisse de 60 dB après l'interruption de la source (Mario, Rossi., 2007).

La pression acoustique décroît de la sorte au millième de sa valeur, alors que les grandeurs de puissance, telles que la densité d'énergie et l'intensité acoustique, décroissent au millionième.

Auditivement, cela correspond à l'impression de disparition.

2.3.3. Théories et formules de réverbération

Historiquement, le physicien américain W. Sabine était le premier à entreprendre l'étude du champ réverbère. Ses travaux aboutirent à l'établissement d'une formule permettant de calculer la durée de réverbération d'une salle (Chaigne, Antoine., 2001).

A l'aide de cette formule, il était donc désormais possible de définir au cours d'un projet de salle, la nature et la répartition des matériaux nécessaires à l'obtention d'une durée de réverbération adéquate.

La méthode de Sabine ayant été jugée, Eyring, Millington, et plus récemment Pirolle, proposèrent tour à tour une nouvelle formule.

2.3.3.1. Formule de Sabine

W.C. Sabine, jeune professeur de physique à l'université de Harvard, a été appelé pour rectifier une nouvelle salle de cours, le Fogg Art Museum, copie déjà d'une autre salle de cours, le Sanders Theatre. Plus tard il sera aussi consultant acoustique pour la Boston Symphony Hall. Non seulement il comprit très rapidement que le problème qualitatif de la salle de cours était un temps de réverbération excessif (supérieur à cinq secondes), mais, par l'introduction des coussins absorbants, il trouva la correspondance quantitative entre la surface d'absorption, le volume et le temps de réverbération d'une salle (Kahle Eckhard., 1995). Par cette relation, la formule de Sabine, s'écrit dans une formulation d'aujourd'hui :

$$TR = \frac{0,16V}{A}$$

Où V est le volume de la salle en m^3 et A l'aire d'absorption équivalente de Sabine, exprimée en m^2 .

L'absorption équivalente totale de la salle est définie comme la somme des absorptions des surfaces partielles qui la constituent : $A = \sum S_i \alpha_i$

α_i étant le coefficient d'absorption de l'élément de parois considéré.

2.3.3.2. Coefficient d'absorption α

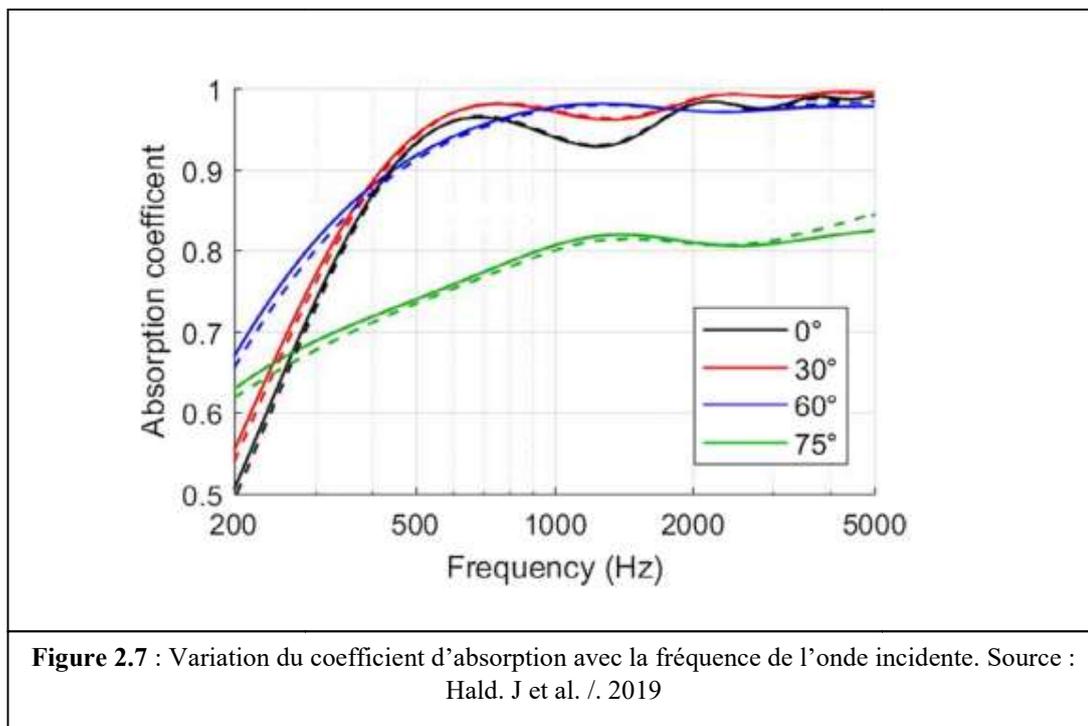
La faculté d'absorption d'un matériau est caractérisée par le coefficient α , tel que :

$$\alpha = \frac{W_{\text{absorbée}}}{W_{\text{incidente}}}$$

L'énergie absorbée est une fraction de l'énergie incidente, par conséquent :

$$0 < \alpha < 1$$

Le coefficient d'absorption α d'un matériau varie avec la fréquence de l'onde incidente (Fig2.7). En pratique il est donné par bande de fréquence (octave ou tiers d'octave) sous forme de tableau ou de graphique (Hald J et al., 2019).



2.3.3.3. Aire d'absorption équivalente A

Les parois d'une salle sont rarement homogènes, ne serait-ce que par la présence des ouvertures (porte ou fenêtre). Pour calculer la quantité d'énergie absorbée par une cloison, il faut donc déterminer un coefficient d'absorption moyen α_m représentatif de l'ensemble des constituants (www.conseils-acoustique.com – info@conseils-acoustique.com).

Soit une cloison constituée d'éléments de surface S_1, S_2, \dots, S_n et $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ les coefficients d'absorption correspondants.

Le coefficient d'absorption moyen α_m est tel que :

$$S\alpha_m = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n$$

$$\alpha_m = (S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n) / S$$

Le facteur $S\alpha_m$ est appelé « aire d'absorption équivalente ». Il correspond à la surface A de matériau parfaitement absorbant nécessaire pour obtenir la même absorption que la surface S .

$$S\alpha_m = A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n$$

En utilisant le symbole \sum pour indiquer qu'il s'agit de la somme des facteurs $S\alpha$, A devient :

$$A = \sum S\alpha$$

3.3.4. Mesure en laboratoire du coefficient d'absorption α d'un matériau

- **Méthode de la chambre réverbérante** : La mesure du coefficient d'absorption α est réalisée dans une chambre réverbérante (Fig2.8).

Le principe consiste à relever les temps de réverbération du local d'essai avant et après introduction d'un échantillon de matériau et d'en déduire, par calcul, la variation de l'aire d'absorption équivalente (Chagué, Michel., 2001).

Soit T_0 le temps de réverbération à vide de la chambre :

$$T_0 = 0.16 \frac{V}{A_0} = 0.16 \frac{V}{S_0\alpha_0}$$

V : volume de la chambre réverbérante ;

A_0 : aire d'absorption équivalente des parois ;

S_0 : surface des parois de la chambre réverbérante ;

α_0 : Coefficient d'absorption moyen des parois (à vide).

L'échantillon de matériau étant placé dans la chambre, le temps de réverbération devient :

$$T_1 = 0.16 \frac{V}{A_1}$$

Soit S_1 la surface de l'échantillon et α_1 le coefficient d'absorption recherché.

L'échantillon occupe une partie de la surface initiale, l'aire d'absorption équivalente devient :

$$A_1 = (S_0 - S_1) \alpha_0 + S_1 \alpha_1$$

$$A_1 = S_0 \alpha_0 - S_1 \alpha_0 + S_1 \alpha_1 = A_0 + S_1 (\alpha_1 - \alpha_0)$$

Soit:
$$S_1 \alpha_1 = A_1 - A_0 + S_1 \alpha_0$$

$$S_1 \alpha_1 = 0.16 \frac{V}{T_1} - 0.16 \frac{V}{T_0} + S_1 (0.16 \frac{V}{S_0 - T_0})$$

D'où
$$\alpha_1 = 0.16 \frac{V}{S_1} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) + 0.16 \frac{V}{S_0 T_0}$$

Les mesures sont effectuées sur les 18 bandes tierces d'octave comprises entre 100 Hz et 500 Hz. Pour tenir compte d'éventuels problèmes d'homogénéité du champ acoustique, les temps de réverbération sont relevés en divers emplacement du local d'essai. Les valeurs destinées aux calculs correspondent aux moyennes arithmétiques des différentes séries de résultats.

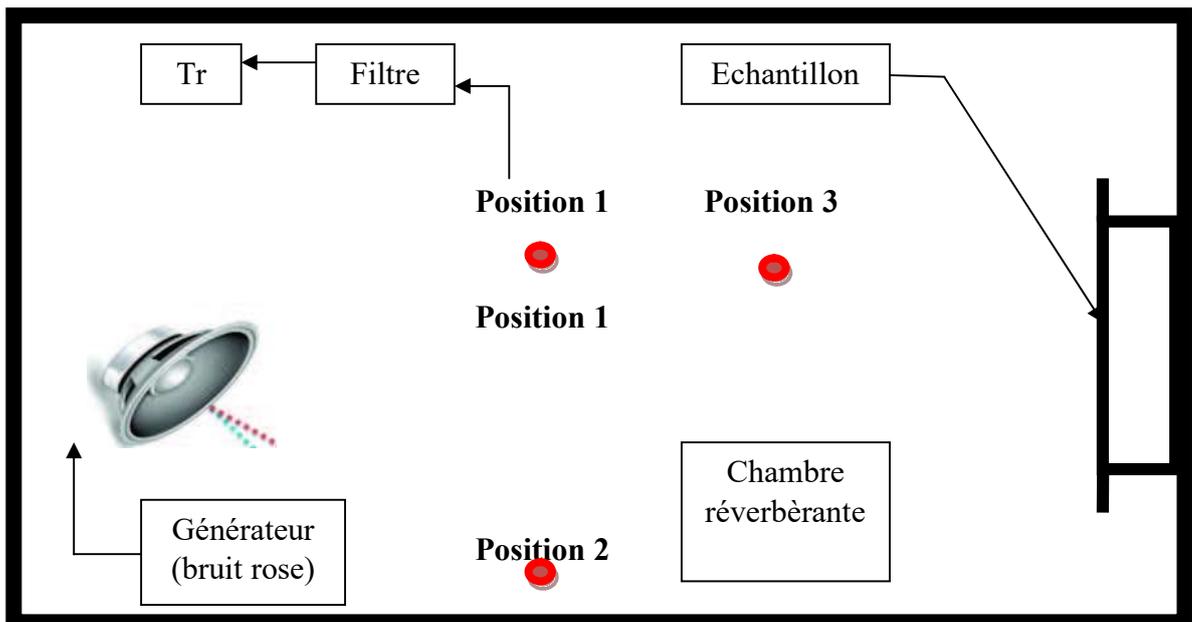
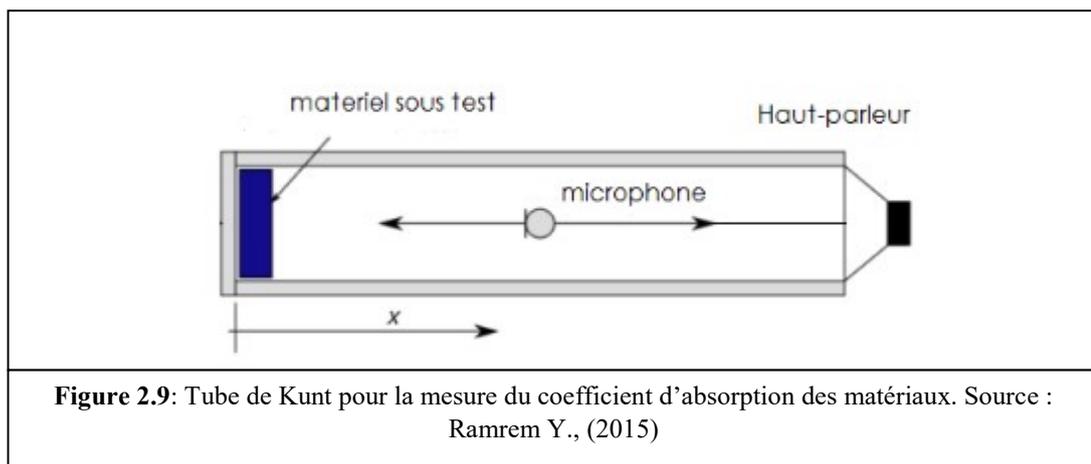


Figure 2.8 : Mesure du coefficient d'absorption α d'un matériau, méthode de la chambre réverbérante.
Source : Chague, M. (2001)

Remarque : il est à noter que nous allons utiliser cette méthode dans la partie de l'investigation.

- **Méthode du tube de K :** Cette méthode mesure le coefficient d'absorption des matériaux à incidence normale. L'avantage de cette méthode c'est qu'elle est rapide et simple, elle nécessite un petit échantillon. Seulement les résultats ne répondent pas réellement à la réalité, puisque les ondes qui arrivent sur les surfaces absorbantes sont très rarement à incidence normale. Cette méthode est applicable seulement pour les matériaux poreux. La méthode comme le montre la figure (Fig2.9), consiste à utiliser un tube cylindrique long auquel on peut faire glisser une sonde à microphone pour mesurer les maximas et les minimas des amplitudes de pression le long du tube. Un haut-parleur cylindrique épousant la forme circulaire du tube excite le tube à travers un oscillateur sinusoïdal, produisant des ondes stationnaires à l'intérieur du tube. Une partie du son sera réfléchiée et une autre est absorbée (Ramrem Youssef., 2015).



L'onde incidente peut-être représenté par :

$$d_1 = a \sin(\omega t - kx)$$

a : l'amplitude max de l'onde émise

L'onde réfléchiée est représenté par :

$$d_2 = f_a \sin(\omega t + kx)$$

f_a : l'amplitude max de l'onde réfléchiée

Le déplacement résultant à n'importe quel point sera :

$$d = d_1 + d_2 = a \sin(\omega t - kx) + f_a \sin(\omega t + kx) = a \sin(\omega t) \cos kx + a(1 - f) \cos(\omega t) \sin kx$$

Les valeurs des pressions max et min seront observé respectivement à des distances:

$0, \lambda/2, \lambda, 3/2\lambda, 2\lambda$ etc...

Et $\lambda/4, 3/4\lambda, 5/4\lambda, 7/4\lambda$ etc...

Posons $A_1=a(1+f)$ et $A_2=a(1-f)$, on aura
$$f = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$$

L'énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude
$$r = f^2 = \left[\frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \right]^2$$

r : fraction de l'énergie réfléchie

Le coefficient d'absorption s'écrit alors :
$$\alpha = 1 - r = 1 - \left[\frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \right]^2 = \frac{4A_1A_2}{[A_1 + A_2]^2}$$

Le diamètre du tube influe sur la fréquence puisqu'il introduit une fréquence de coupure. La fréquence maximale pour un tube de $\varnothing = 100\text{mm}$ et de 1.6 KHz alors que pour un tube de 25mm, elle est de 6.5 KHz. La valeur du coefficient d'absorption varie considérablement avec la fréquence.

2.3.4. Autres formules

La littérature sur l'acoustique des salles indique que les chercheurs ne sont pas entièrement satisfaits des formules existantes pour calculer le temps de réverbération TR. La formule de Sabine suppose que l'énergie sonore diffuse également à travers une pièce (de manière homogène et isotrope). En réalité, cette condition est rarement remplie, car les grandes surfaces d'une pièce se caractérisent par diverses absorptions.

Pour cette raison les chercheurs ont développé d'autres méthodes et d'autres formules, parmi ces formules on cite :

2.3.4.1. Formule d'Eyring

Eyring affirme que la formule de Sabine n'est pas admissible en cas d'absorption importante dans une salle. Dans son travail, il souligne que la formule de Sabine devrait être utilisée pour les salles «réelles» et assure que le temps de réverbération dépend de la forme de la salle. Eyring présente une théorie révisée et dérivée, une formule de l'équation TR qui est plus générale que la formule de Sabine. La formule d'Eyring est basée sur le moyen de propagation sans entrave entre réflexions caractérisée par un champ sonore diffus (Passero C et Zannin P., 2010).

Le temps de réverbération est donné par la relation :

$$Tr = 0.16 \frac{V}{-\text{Slog}(1-\alpha_m)}$$

α_m : coefficient d'absorption moyen.

2.3.4.2. Formule de Milligton

Elle est basée sur l'hypothèse de la propagation homogène en revanche l'absorption est supposée discontinue et non homogène (Nowoświat A et al., 2016).

Le temps de réverbération est donné par la relation.

$$Tr = 0.16 \frac{V}{-\sum S_i \text{Slog}(1-\alpha_i)}$$

2.3.4.3. Formule de Pujolle

La formule de Pujolle est basée sur la théorie des sources images. Cette théorie permet de calculer avec précision le libre moyen I_m en fonction de la forme de la salle (Passero C et Zannin P., 2010).

$$I_m = \frac{1}{6}(\sqrt{L^2 + 1^2} + \sqrt{1^2 + h^2} + \sqrt{h^2 + L^2})$$

(L, I, h : dimension de la salle)

Le temps de réverbération est donné par la relation :

$$T_r = \frac{6I_m}{c \log(1-\alpha_m)^{-1}}$$

(c : célérité ; α_m : coefficient d'absorption moyen.)

2.3.4.4. Choix d'une formule

La diversité des formules s'explique par le fait qu'elles sont basées sur des hypothèses ou des méthodes de calcul différentes. Le but recherché par leurs auteurs respectifs étant d'améliorer les résultats pour différents cas de figures (Chague Michel., 2001).

Dans notre recherche nous allons utiliser la formule de Sabine unanimement adoptée pour sa simplicité. Son emploi dans les calculs de traitement acoustique est obligatoire du fait que les coefficients d'absorption des matériaux sont toujours indiqués en α Sabine (coefficients déterminés par la méthode de la chambre réverbérante à l'aide de la formule de Sabine).

2.3.5. Absorption acoustique

L'absorption acoustique se définit par la propriété qu'ont certaines parois, de ne renvoyer par réflexion vers le local d'émission qu'une onde d'amplitude atténuée par rapport à celle de l'onde incidente. Lorsque cette amplitude de l'onde réfléchi est nulle, on dit que l'on a affaire à une paroi parfaitement absorbante. Lorsqu'au contraire, l'atténuation de l'amplitude de l'onde est nulle, on dit que l'on a affaire à une paroi parfaitement réfléchissante (Types de matériaux absorbants L'absorption acoustique est essentielle, tant dans la construction que dans l'urbanisme. Sans le prélèvement énergétique que constitue l'absorption acoustique, l'ambiance sonore d'une salle de concert, d'un atelier, d'une salle de classe, d'un logement, d'un bureau, d'une piscine, d'une salle de conférence ou d'une rue passante, serait celle résultant de l'accumulation de toute l'énergie acoustique émise dans chacun de ces locaux depuis leur création : elle serait à la fois inintelligible (car totalement cacophonique) et intolérable (car le niveau dépasserait le seuil de douleur de l'oreille).

Le rythme d'acoissement de ces dépenses d'énergie mécanique a été tel, au cours des dernières dizaines d'années, que l'homme subit maintenant en permanence des agressions sonore d'un niveau considérable, qu'il est naturellement conduit à limiter. Il est donc essentiel d'avoir une connaissance précise de l'absorption acoustique des divers matériaux de construction et des mécanismes qui leur confèrent ces caractéristiques³.

2.3.6. Matériaux absorbants

Comme il est dit ci-dessus, l'absorption des ondes sonore par les parois, constituées de différents matériaux et éléments, est très importante pour la conception acoustique. On distingue 3 types de matériaux et élément absorbants :

³ En présence d'un matériau de construction donné, ceci permettra de décider à bon escient si la fonction d'absorption peut être remplie (d'une façon qui dépend bien entendu de destination ou de la localisation de l'ouvrage) par le matériau de construction lui-même, ou si elle doit donner lieu à un traitement spécial faisant appel à d'autres matériaux remplissant cette fonction de façon spécifique.

2.3.6.1. Matériaux poreux et fibreux

Le matériau de ce type est constitué de cellules d'air communicantes entourées de matière (Fig2.10) (laine de verre, laine de roche, amiante, copeau de bois, fibre végétale, ouate minérale etc.....)

L'énergie des ondes sonores incidentes, une fois pénétrée dans les cellules, y fait vibrer les particules aériennes. De son côté, cette vibration provoque des frottements entre les particules aériennes et les parois des cellules. De cette manière une fraction d'énergie sonore se transforme en énergie thermique et se dissipe au sein du matériau (Mamtaz H et al., 2017) Plus est élevé la fréquence des ondes sonores pénétrante plus est élevé la fréquence de vibration des particules aériennes dans les cellules plus important le frottement et donc plus est grande la dissipation d'énergie sonore.

C'est pourquoi l'absorption des matériaux de ce type est plus importante pour les fréquences élevées que pour les fréquences basses (Tran, Bui Vran., 1996).

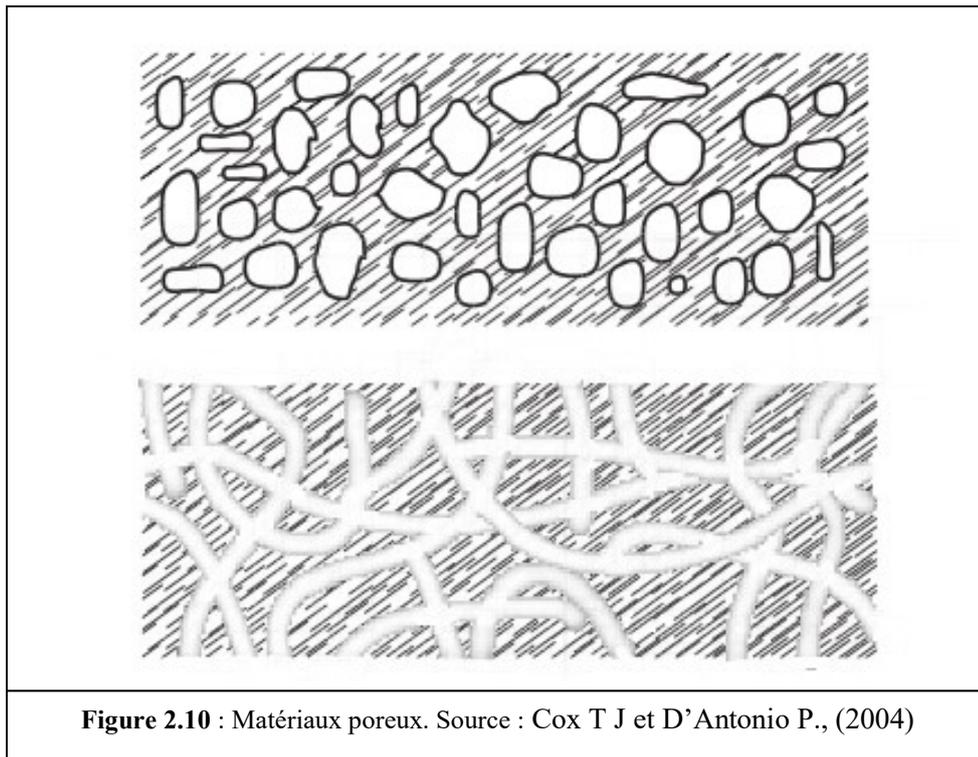


Figure 2.10 : Matériaux poreux. Source : Cox T J et D'Antonio P., (2004)

2.3.6.2. Résonateurs

Les principaux types de résonateurs se basent sur le principe de résonateur de Helmholtz (Fig2.11) dans lequel un certain volume d'air peut vibrer comme un ressort avec une fréquence propre déterminée (Cox Trevor J, D'Antonio Peter., 2009).

Si les ondes sonores incidentes ont la même fréquence que la fréquence propre du volume d'air il se produit le phénomène de « résonance » (d'où vient le terme « résonateur »). Alors une fraction de l'énergie de ces ondes se dissipe dans le résonateur en faisant vibrer le volume d'air en énergie mécanique et thermique (Fig2.12). La fréquence propre du résonateur peut être déterminée par la formule suivante (Wang Z B et Choy Y S., 2019).

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(L+0.8D)V}}$$

Où :

- f_0 la fréquence propre du résonateur (Hz).
- c la célérité du son (m/s).
- S la section du col (m^2).
- L la longueur du col (m).
- D le diamètre du col (m).
- V le volume du corps (m^3)

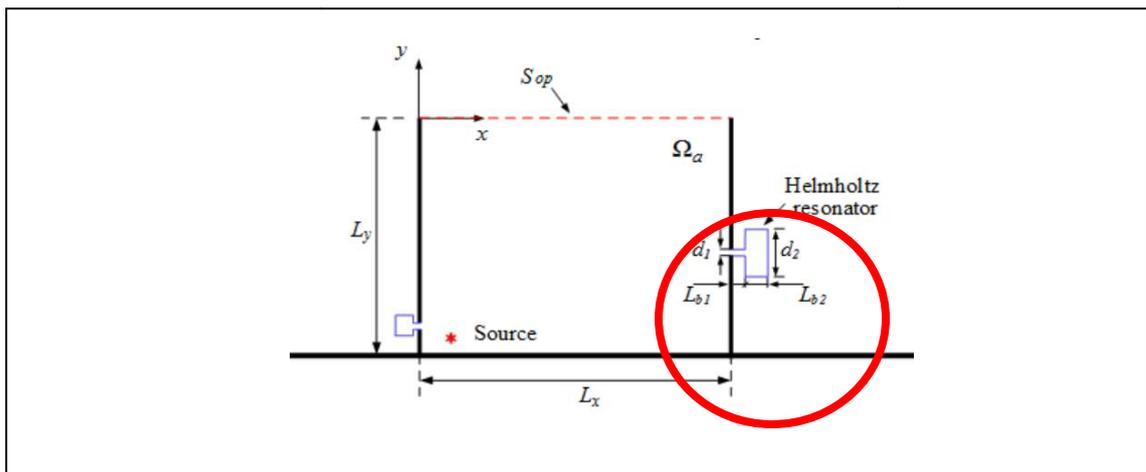


Figure 2.11 : Résonateur de Helmholtz appliquée dans une salle. Source : Z.B. Wang, Y.S. Choy. 2018

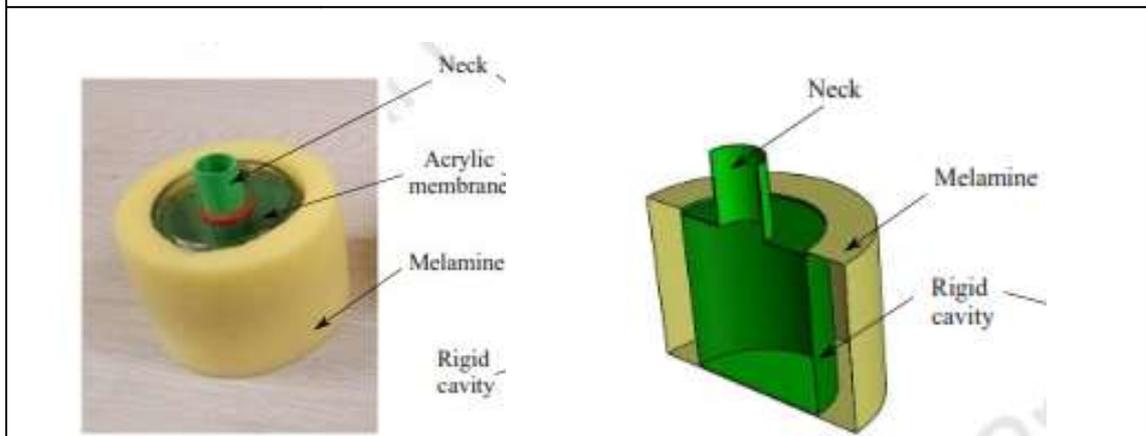


Figure 2.12 : Eléments composants d'un Résonateur de Helmholtz. Source : Abbad A.,(2019)

Les résonateurs sont employés depuis fort longtemps (Fig2.13). L'architecte romain Vitruve (I^{er} siècle av. JC) (Fig2.14) y fait référence dans le livre « De theatri vasis », chapitre v, de son traité de architectura. Plus tard, entre XI^e et XVIII^e siècles, des vases acoustiques en terre cuite ou en verre faisant fonction de résonateurs ont été encastrés dans les murs d'églises construites dans toute l'Europe. Ces vases étaient parfois remplis de cendre afin, de modifier leur volume et d'amortir les vibrations. Helmholtz n'a pas donc inventé le résonateur qui porte son nom. En revanche, il en a décrit le fonctionnement.

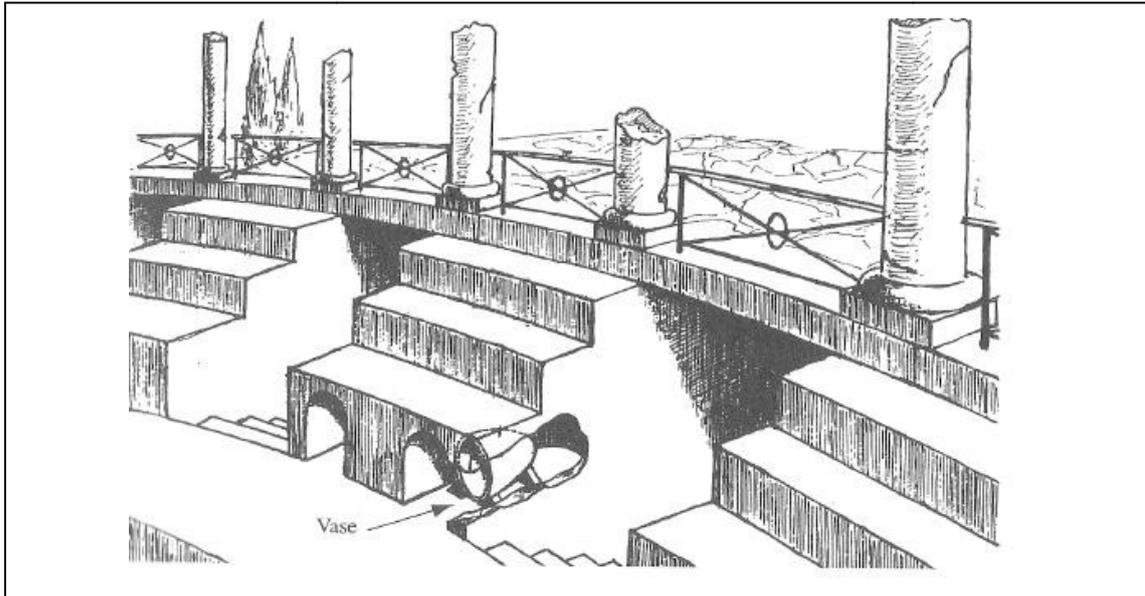


Figure 2.13 : Exemple des vases acoustiques dans les théâtres antiques. Source : René Floriot 1964

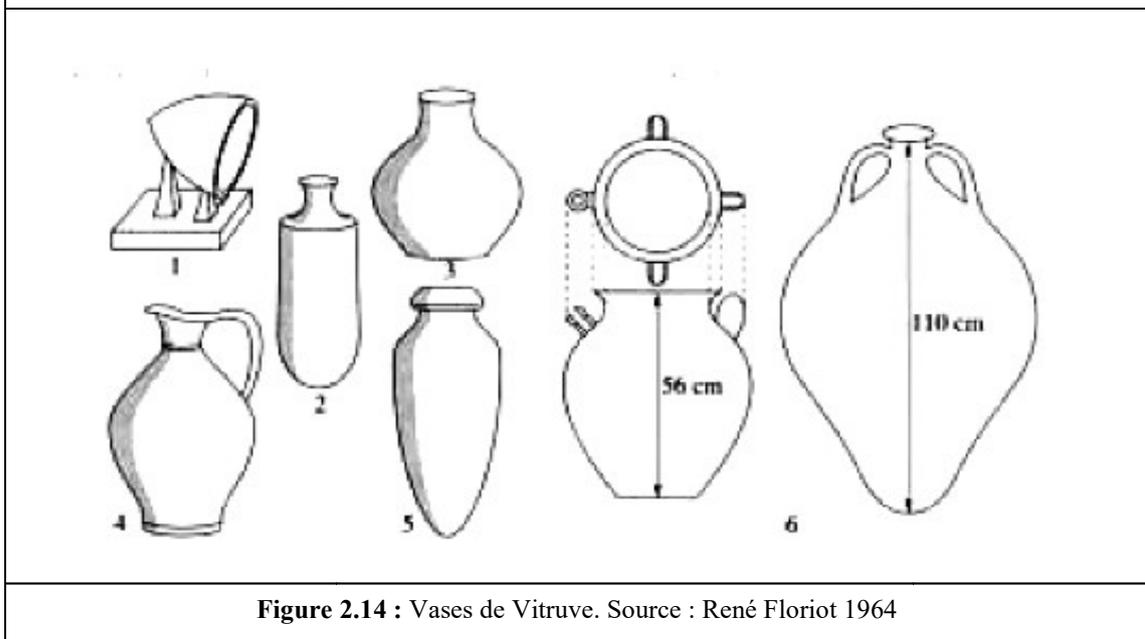


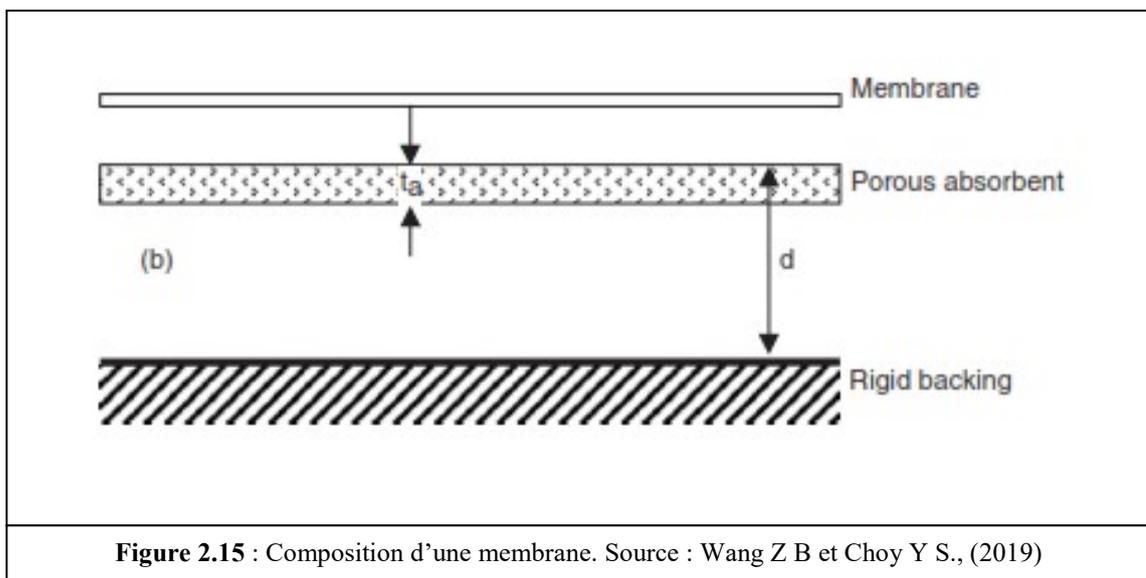
Figure 2.14 : Vases de Vitruve. Source : René Floriot 1964

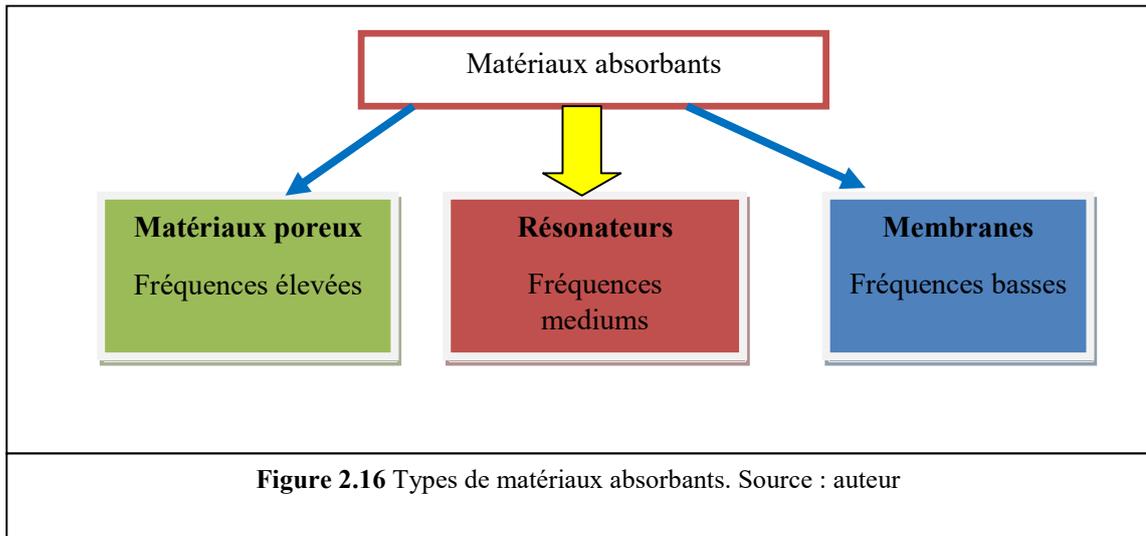
2.3.6.3. Membranes

Les membranes, également appelées « diaphragmes » ou « panneaux fléchissants », se composent de panneaux montés sur un cadre, placé à quelque centimètres d'une paroi et emprisonnant une lame d'air entre eux-mêmes et la paroi (Fig2.15).

Lorsque les ondes acoustiques arrivent sur le panneau, celui-ci se déforme et comprime la lame d'air qui, agissant comme un ressort, renvoie le panneau en arrière. Comme pour le résonateur étudié précédemment, il se crée une vibration. Quand la fréquence des ondes acoustiques est la même que la fréquence de vibration du panneau, il y a résonance. De ce fait, la vitesse du mouvement de l'air situé derrière le panneau augmente, donc le frottement, et une partie de l'énergie acoustique est transformée en chaleur. Une autre partie en mettant la plaque en mouvement, est transformée en énergie mécanique, laquelle est transformée en chaleur par les frottements internes de déformation.

L'absorption la plus importante des membranes se situe aux fréquences graves. La plage d'absorption d'une membrane est augmentée quand la lame d'air est amortie par un matelas fibreux ou poreux (Fig2.16). De nombreuses études ont montré que ces matériaux présentent des antirésonances accordables avec des valeurs de perte de transmission beaucoup plus élevées que la loi de masse correspondante (Wang Z B et Choy Y S., 2019).





Conclusion

Ce chapitre a dévoilé l'ensemble des principes théoriques qui définissent les phénomènes et les éléments du son dans l'espace architectural. En fournissant des explications sur les relations qui subsistent entre la perception délicate du son et sa quantification mesurée ; afin d'éclairer notre démarche pour la caractérisation objective de la qualité acoustique des espaces architecturaux.

Nous avons aussi étudié le comportement du son dans un espace clos en précisant les différentes méthodes de propagation du son: diffusion, réverbération et absorption.

En fin nous avons précisé les différents types de matériaux absorbants en expliquant la particularité et la spécificité de chaque type.

**CHAPITRE III : EXIGENCES
ACOUSTIQUES DANS LES SALLES
DES EQUIPEMENTS CULTURELS**

Introduction

La qualité acoustique des salles a toujours été un sujet fascinant aussi bien pour les physiciens que pour le public, pour les architectes que pour des générations de chercheurs.

La diversité des personnes intéressées et exposées au problème et la complexité du sujet ont fait que la science de l'acoustique, bien plus que la plupart des autres sciences, a toujours conservé une aura d'énigme, d'inexplicable et qu'un grand nombre de préjugés persistent: le nombre.

Nous allons à travers ce chapitre essayer de clarifier et simplifier les éléments les plus essentiels dans le domaine de l'acoustique des salles et plus précisément des salles de la parole.

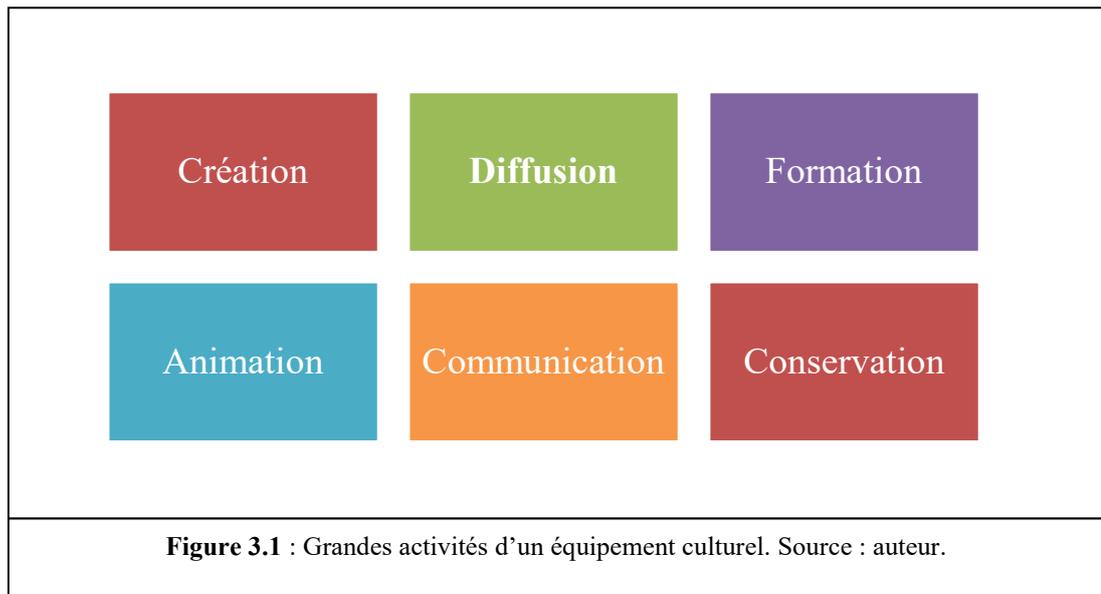
3.1. Equipement culturel

3.1.1. Définition

Ensemble des organismes et installations qui, en dehors de la scolarisation, contribuent au développement des connaissances générales relatives à toutes les branches du savoir.

Il met en relation des œuvres, des créations, afin de favoriser la conservation du patrimoine, la création et la formation artistique et plus généralement, la diffusion des œuvres de l'art et de l'esprit dans un bâtiment ou un ensemble de bâtiments spécialement adaptés à ces missions.

L'équipement culturel regroupe un ensemble de biens de consommation et de services culturels localisables, où se mêlent les dimensions d'éducation et de loisirs (<https://journals.openedition.org/cyberge0/4988>). C'est un équipement collectif public ou privé destiné à l'animation culturelle, dans lequel se mêlent les dimensions d'éducation et de loisirs : salles de spectacle, d'expositions, bibliothèques, médiathèques, musées, centres culturels (Mazri, Mouna., 2007). Les équipements culturels, prennent une importance singulière par leur contribution à l'aménagement d'un milieu de vie agréable et peuvent, à ce titre, être considérés comme des indicateurs de la qualité de vie (Ricard Brigitte, Garon Rosaire., 2005). L'équipement culturel, comprend de nombreuses fonctions culturelles qui varient en fonction de sa destination, parmi ses fonctions nous citons : la Diffusion, la Création, la Conservation, la Formation, la Communication et l'Animation (Fig3.1).



3.1.2. Exemples d'équipements culturels

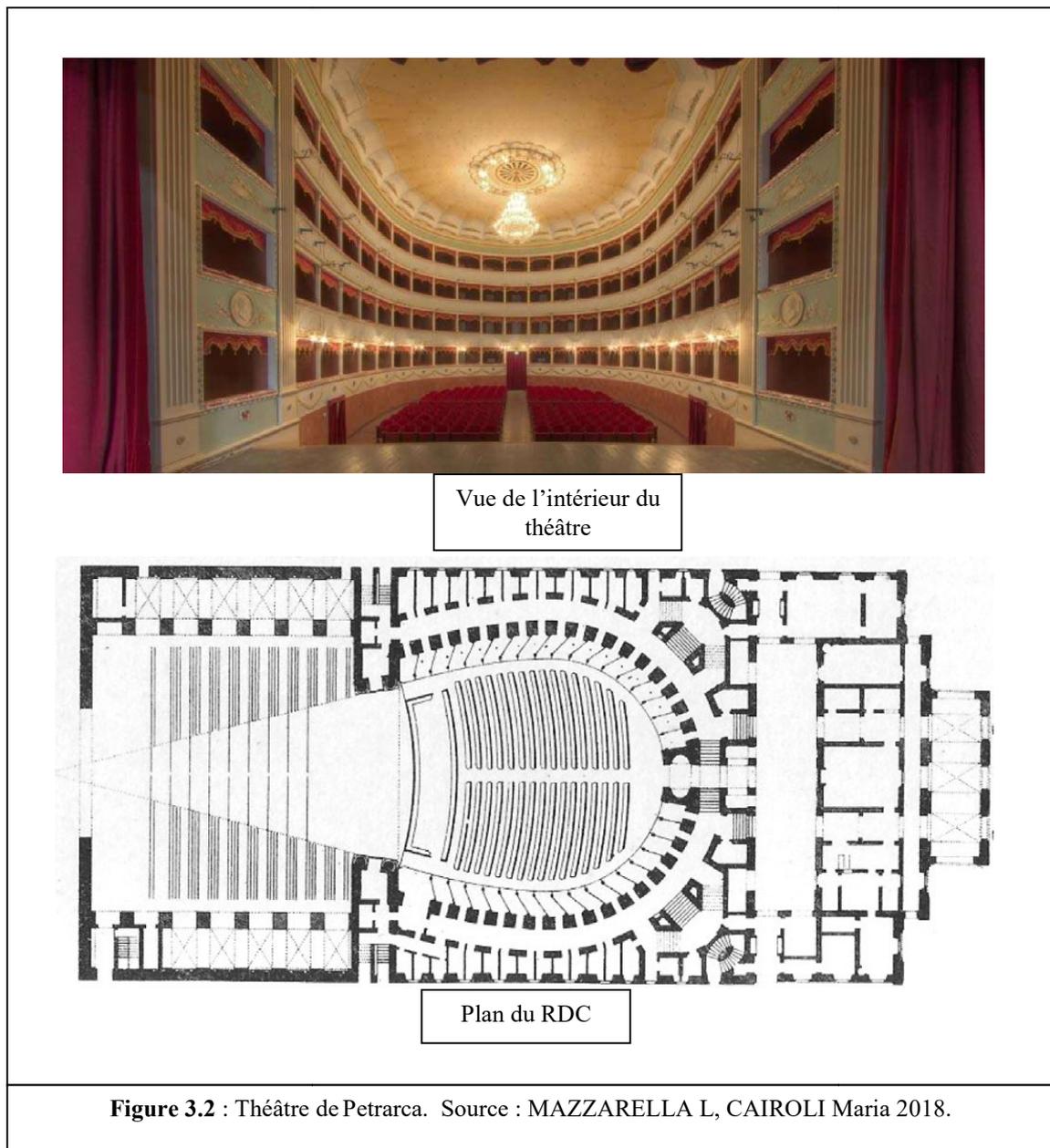
Comme il a été mentionné plus haut, les bâtiments culturels sont divers et varient selon leur fonction. L'animation est l'une des fonctions culturelles les plus importantes, elle a un caractère architectural particulier. Nous citons ci-dessous les plus importants de ces équipements:

3.1.2.1. Théâtre

Le théâtre est un lieu où l'on touche l'essence de tous les liens sociaux du contexte éthique des interactions humaines. Il reste un point central de la culture. Il réunit les problèmes, les conflits, les attitudes humaines et les différentes façons de comprendre le monde (André, Anne., 1998).

Il tire son origine du grec theatrón, qui veut dire « lieu où l'on regarde ». Le théâtre est une branche de l'art scénique, un genre de spectacle qui a à voir avec l'interprétation, la représentation, la mise en scène, par lequel sont exécutés des représentations dramatiques en la présence d'un public (Fig3.2).

Cet art regroupe le discours, les gestes, les sons, la musique et la scénographie.



3.1.2.2. Cinéma

Une salle de cinéma est un lieu où est organisée la projection de films de cinéma. Un cinéma peut désigner le regroupement au même endroit de plusieurs salles, qui projettent généralement des films différents à plusieurs horaires (multiplexe) (Fig3.3).

La taille d'une salle de cinéma est très variable et peut aller de quelques dizaines de places à un millier¹.

¹ Ministère de la culture, Direction des Etudes Prospectives de la Documentation et de l'Informatique. Normalisation des infrastructures et équipements culturels, 2008, p : 150.

Les types de salles peuvent aussi être variés :

- De 2 à 8 salles : complexe
- De 8 à 20 salles : multiplexe
- Plus de 20 salles : mégaplexe
- Cinéma de quartier
- Cinéma d'Art et d'Essai
- Ciné théâtre
- Cinéma en plein air
- Cinéma en drive-in

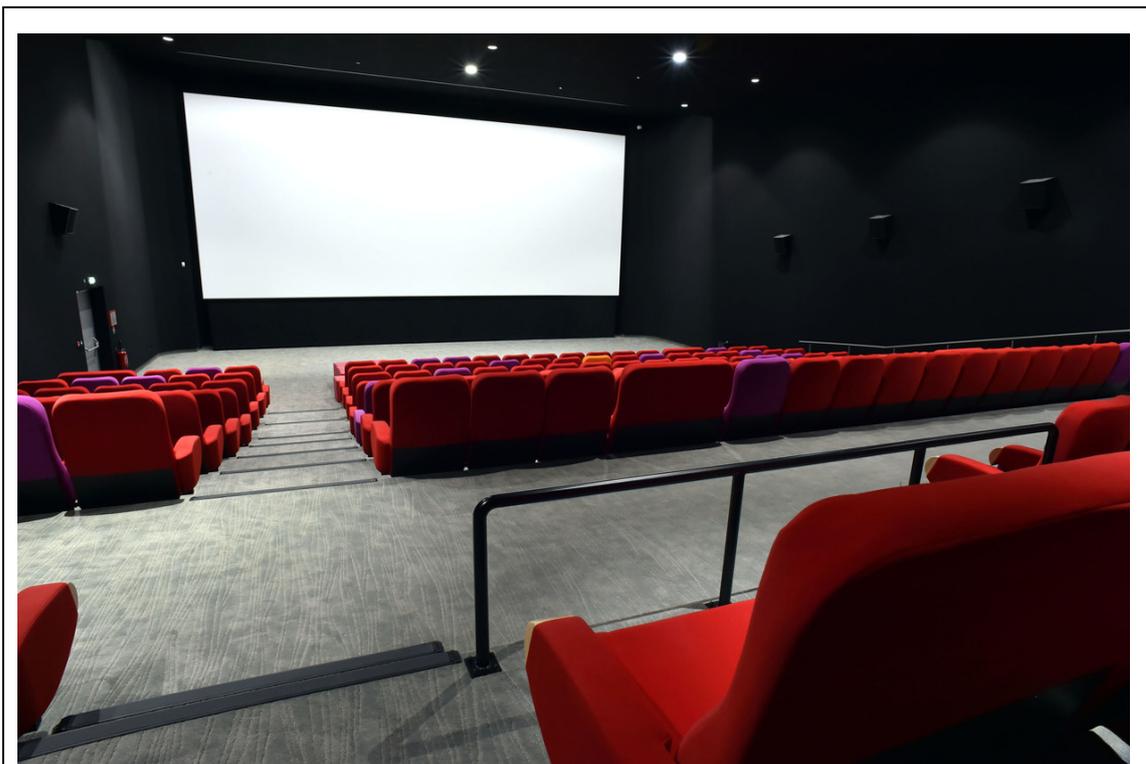
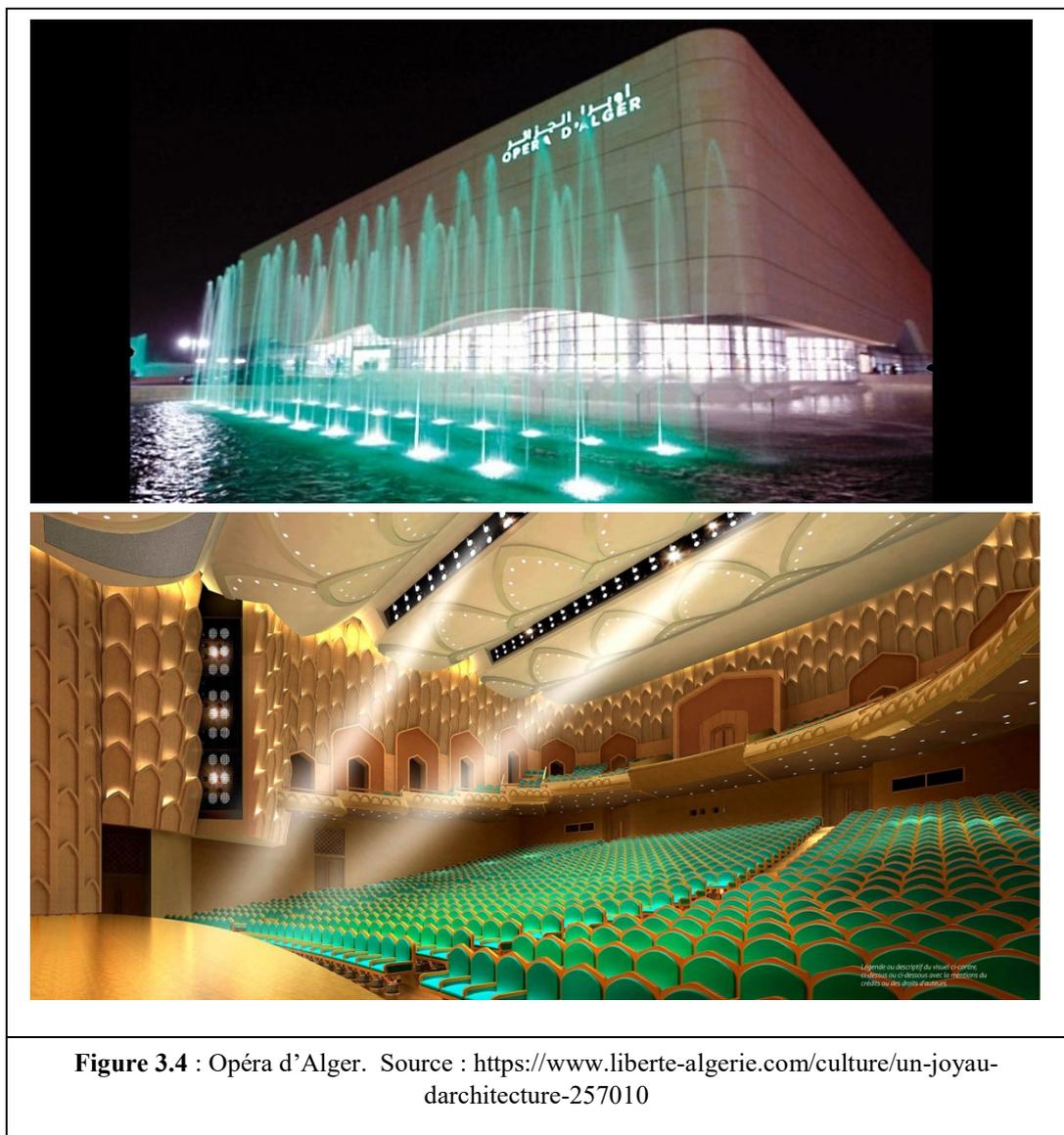


Figure 3.3 : Salle du Ciné Rex Montbrison. Source : <https://www.rex-montbrison42.fr/les-salles/>.

3.1.2.3. Opéra

L'opéra (et plus généralement l'art lyrique) peut être défini comme un objet géographique possédant acteurs, réseaux, fonctions singulières, lieux et territoires matérialisés dans le temps Polysémique (Bianconi, Lorenzo, Pestelli Giorgio., 1992), **le terme "opéra" fait référence à la salle et son architecture qui abrite les spectacles lyriques et également à la forme artistique**, c'est à dire à la qualité des œuvres qui y sont données (Lamantia, Frédéric., 2006)

L'art de L'Opéra a connu un développement et un grand intérêt en l'Algérie surtout avec la construction de l'opéra d'Alger, qui est un joyau architectural, elle est la fierté du pays et de tout le continent africain (Fig3.4).



3.1.2.4. Salles de spectacle à grande capacité

Les salles ZENITH sont des équipements conçus pour accueillir des spectacles de grande audience, de chanson, variétés, rock, jazz, etc.

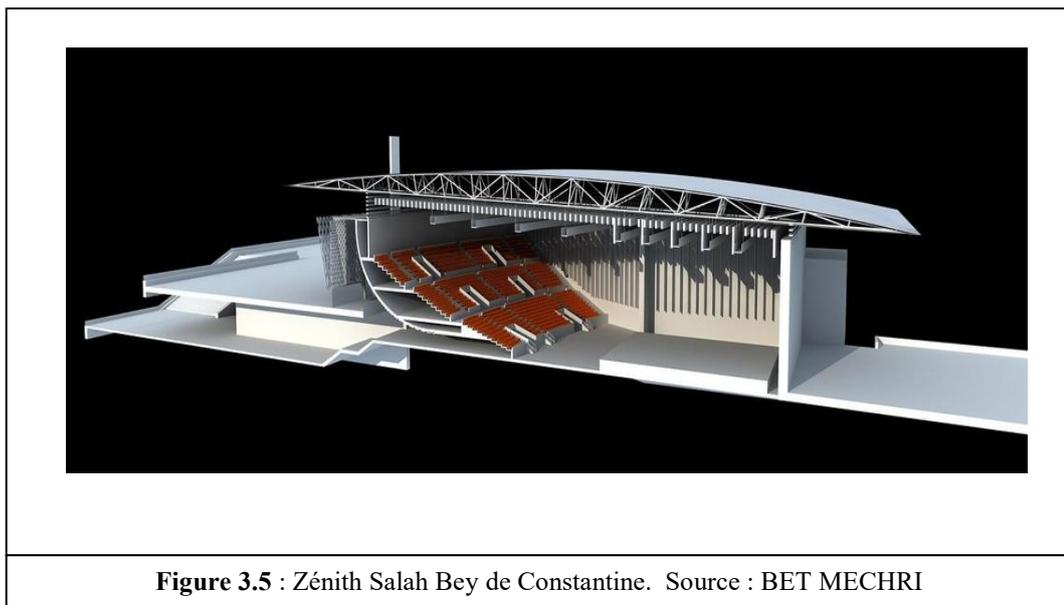
Le nom « Zénith » est une marque déposée. L'utilisation du nom Zénith est soumise au respect d'un cahier des charges qui garantit les conditions optimales de réalisation et de gestion de la salle (Aris D et al., 2009).

Pour obtenir le label ZENITH, les salles doivent pouvoir recevoir au moins 3 000 spectateurs. Occasionnellement, elle peut recevoir d'autres manifestations (autres types de spectacles, sports, expositions, réunions diverses, etc.).

En Algérie et spécialement à Constantine la salle de spectacles Ahmed-Bey de Constantine a été construite en 2015 à l'occasion de la manifestation "Constantine, capitale de la culture arabe"(Fig3.5).

D'une contenance de 3.000 places, la nouvelle salle de spectacles, une véritable prouesse architecturale, alliant la beauté à la fonctionnalité, truffée d'équipements de haute technicité, est sans conteste la structure-phare du moment dans le pays².

Première du genre en Algérie, la salle, réalisée à la cité Zouaghi, sur les hauteurs d'Aïn El Bey, donne à admirer une silhouette imposante qui séduit au premier coup d'œil avec sa façade entièrement vitrée et sa couverture d'aluminium en pente (Fig3.6).



² Information donnée par le bureau d'étude: BET MECHRI.

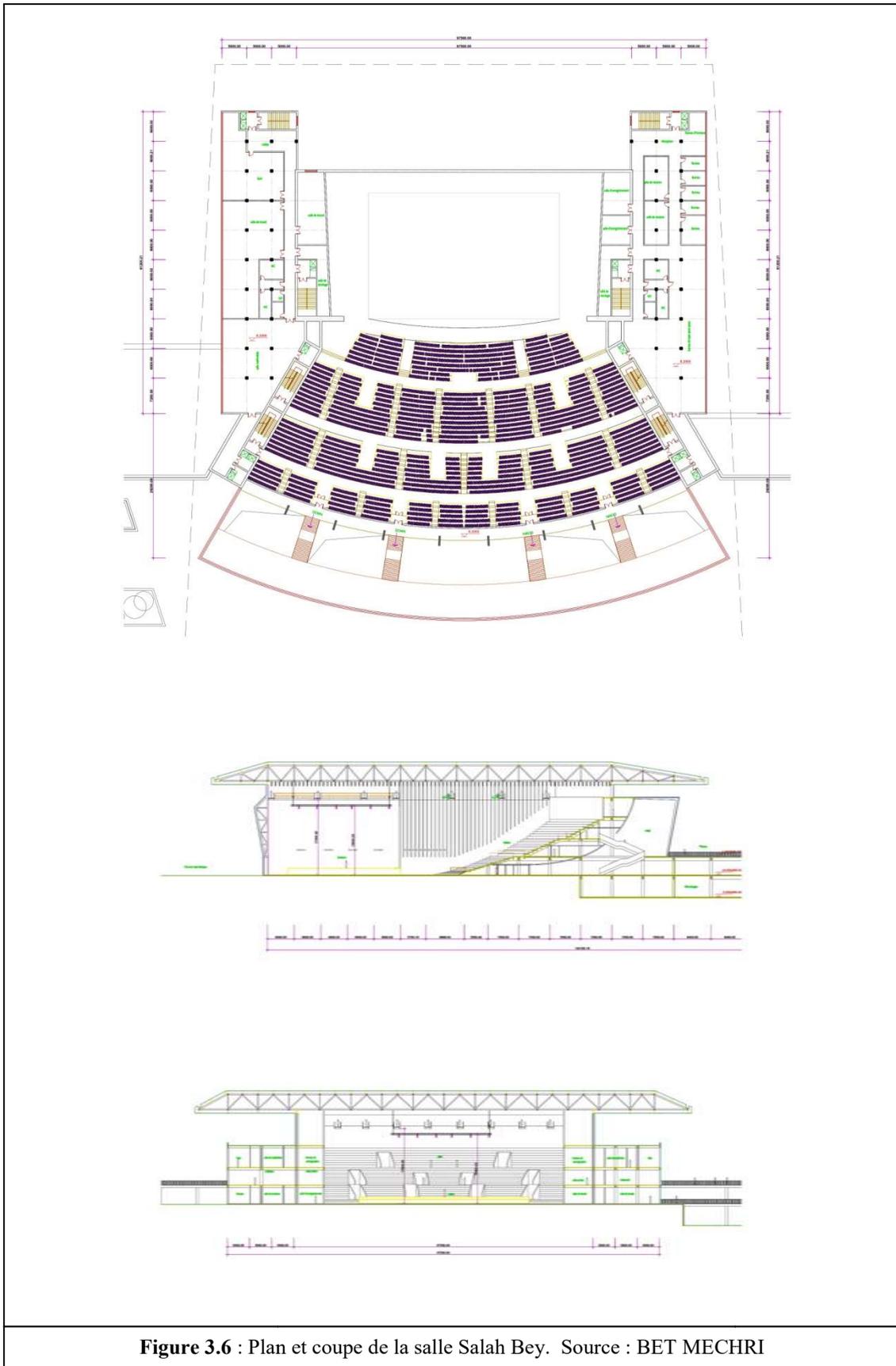


Figure 3.6 : Plan et coupe de la salle Salah Bey. Source : BET MECHRI

3.1.2.5. Salle de conférence

C'est une salle où se déroulent des activités culturelles, artistiques, professionnelles, et même politique. En général on trouve ce type de salles dans les centres culturels, les palais de culture, les maisons de culture, les grands musés et les palais de congrès (Fig3.7).

La salle de conférence est un lieu de parole par excellence où l'échange d'informations orales ou les processus d'apprentissage impliquent une communication verbale intensive (Gramez Abdelghani, Boubenider Fouad., 2017). Comme nous l'avons déjà indiqué, nous examinerons d'une manière détaillée les caractéristiques acoustiques de ces salles.

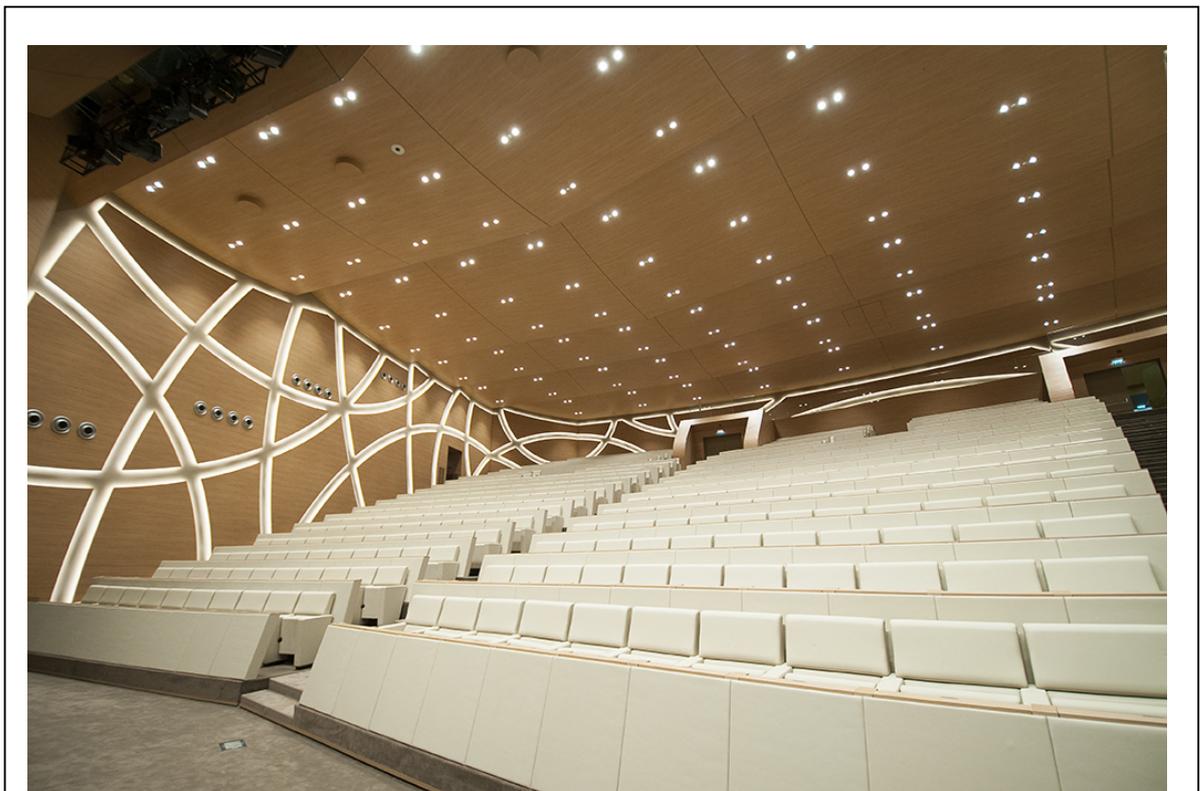


Figure 3.7 : Le Centre International des Conférences d'Alger. Source : Studio Fabris 2016

3.2. Acoustique des salles

3.2.1. Définition

Selon Eckhard KAHLE « *la qualité acoustique d'une salle ne peut pas uniquement être décrite par un jugement de type (mauvais | bon).*

Il existe des salles qui sonnent très différemment, mais qui peuvent être aussi bonnes l'une que l'autre » (KAHLE, Eckhard., 1995). Il faut donc rassembler le plus d'informations possible pour une définition plus précise.

La qualité acoustique d'une salle, ou même de différents emplacements à l'intérieur d'une salle, sera définie grâce à la totalité des aspects perceptifs qui permettront de distinguer les différentes situations acoustiques.

La qualité, dans le sens de préférence subjective, n'est donnée qu'après l'évaluation de tous ces aspects, tenant compte en outre du goût personnel de l'auditeur et de l'adaptation de la salle à un type de musique ou ce lui d'une parole.

L'acoustique des salles vise à offrir la meilleure qualité possible d'écoute à différents lieux dédiés au spectacle ou non : salle de concert, théâtre, opéra, salle de conférence mais aussi aux lieux publics comme des halls d'entrée, des gymnases, des piscines, des réfectoires...

Mario Rossé précise que *« l'acoustique des salles vise à obtenir pour tout espace les propriétés acoustiques optimales tant au point de vue du confort d'écoute qu'à celui des conditions de production, c'est à dire de musique ou de la parole. »* (MARIO, Rossi.,2007).

On conçoit aisément que les propriétés requises soient très différentes pour une salle de concert, un studio de radio fusion destiné à la musique de variétés ou encore pour un auditoire.

3.2.2. Aperçu historique.

L'acoustique des salles est le domaine scientifique et technologique qui vise à comprendre et maîtriser la qualité sonore des bâtiments.

Dans l'Égypte du 13^{ème} siècle avant Jésus Christ, les peintures de Nacht de la nécropole de Thebs (Fig3.8), nous montrent les premières connaissances acoustiques et la relation de l'homme à la musique. De la même manière dans les pages de l'ancien testament, on trouve une description détaillée des rideaux de poiles de chèvres qui est accrochée dans le tabernacle, se plie et absorbe le son ce qui nous rappelle les studios d'enregistrement d'aujourd'hui (Fig3.9).

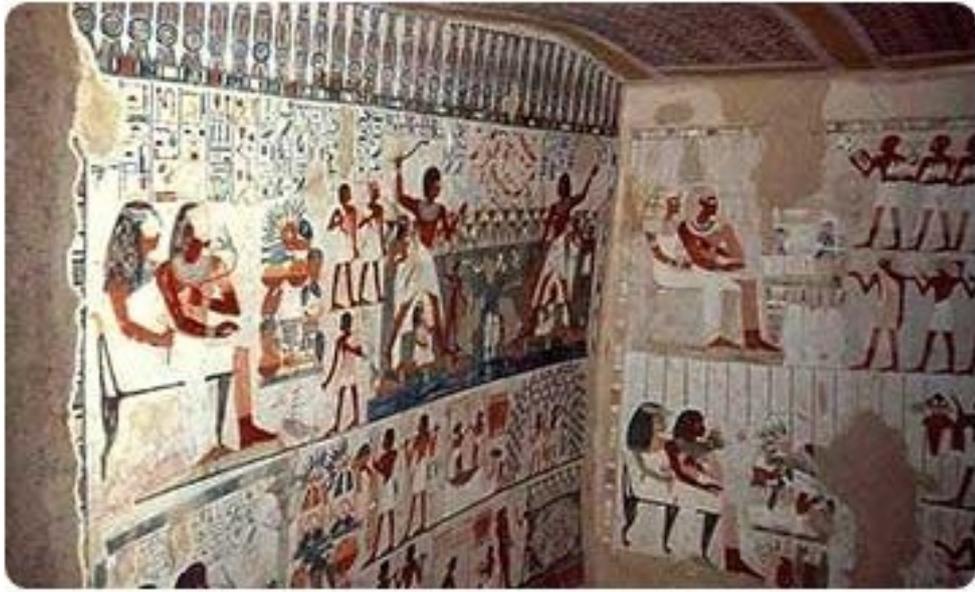


Figure 3.8: les peintures de Nacht de la nécropole de Thebs. Source : Alain Guilleux et al 2016

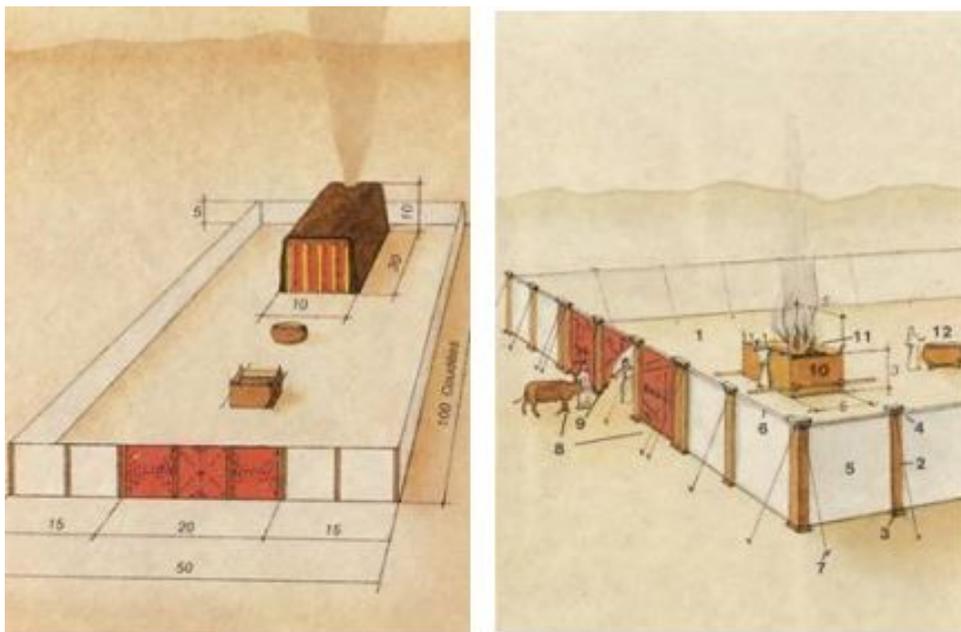


Figure 3.9: Rideaux de poiles de chèvres accrochés dans le tabernacle. Source : *Georges André*

Cependant c'est en Grèce antique que naissent les fondements géométriques liés aux phénomènes optiques ; Archimède pose le principe de l'inverser du carré de la distance pour l'intensité acoustique et lumineuse.

C'est avec le théâtre grec que les liens entre acoustique et optique se matérialisent, les gradins sont disposés de manière semi circulaire sur le plan horizontal et s'élèvent avec une pente variable qui s'approche d'une image idéale d'une zone sphérique ; l'écoute par réception du son directe sans tenir des réflexions et réfractions est magnifique. Un des exemples les mieux conservés du théâtre gréco-hellénistique est celui construit à Epidaurus (Fig3.10) dans le nord-est du Péloponnèse en 330 av. J.-C (Long, Marshall., 2005).

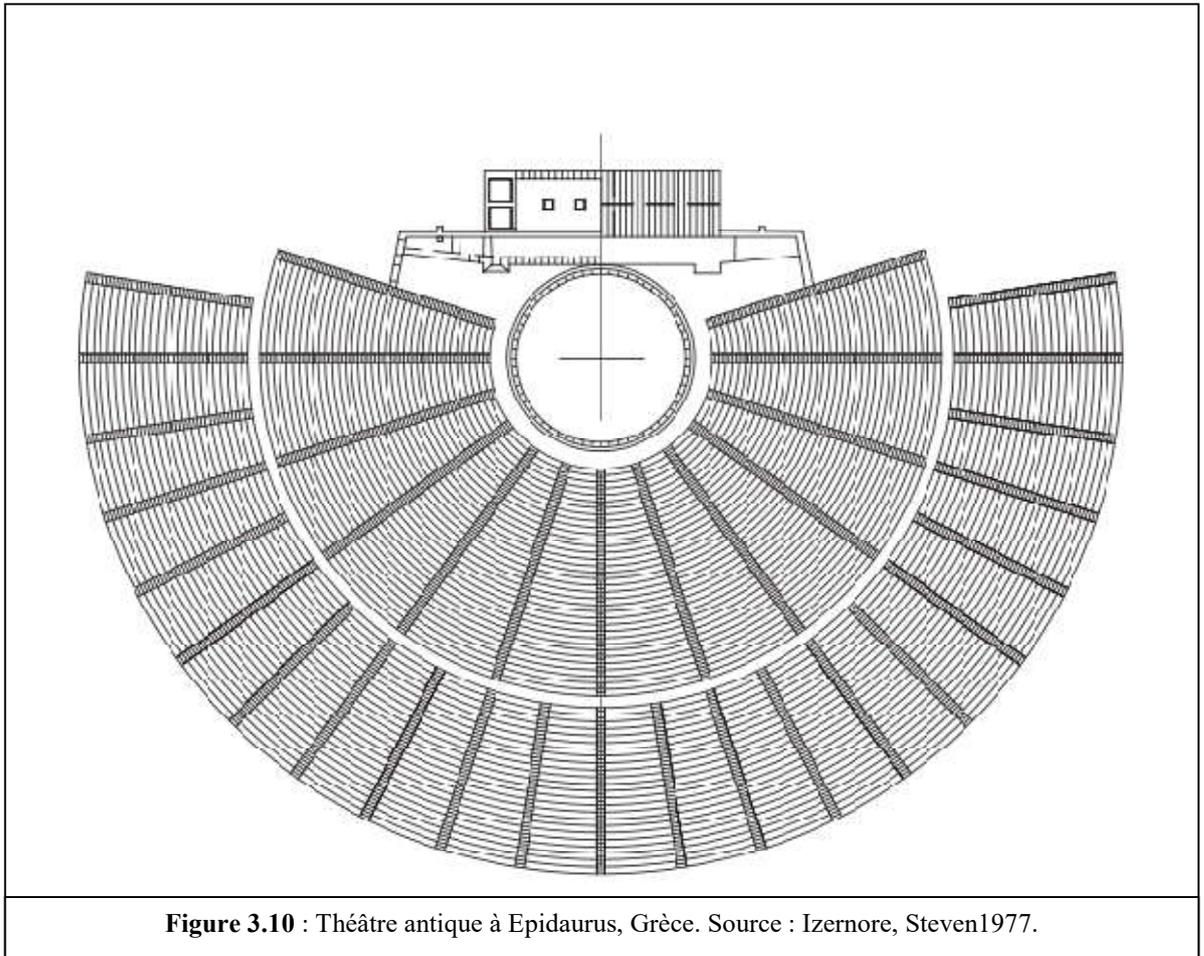


Figure 3.10 : Théâtre antique à Epidaurus, Grèce. Source : Izernore, Steven1977.

L'héritage grec est ensuite repris par les Romains, augmenté et théorisé par l'Ucrèce Piétri décrit avec clarté le concept de **réverbération, de transmission et de détraction du son.**

Les amphithéâtres romains ont suivi le modèle grec ancien, mais ont limité l'arc des sièges à 180⁰ (Long, Marshall., 2005). Ils ont également ajouté une scène derrière les acteurs, une zone de jeu surélevée et des auvents suspendus (valeria) (Fig3.11) au-dessus pour ombrager les spectateurs (Fig3.12).

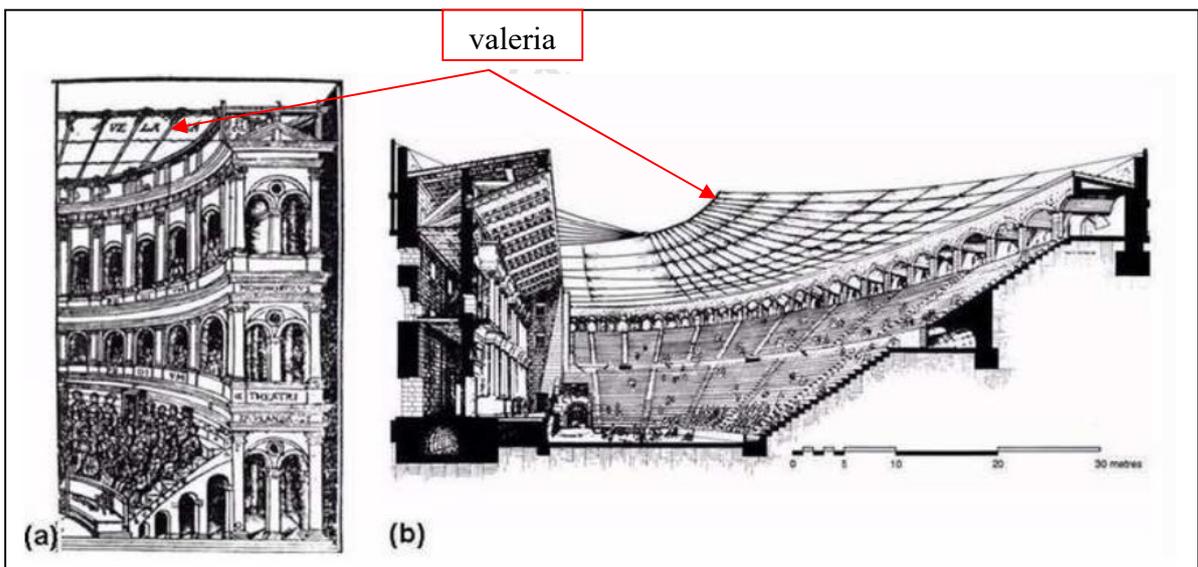


Figure 3.11 : Auvents suspendus (valeria). Source: Francesca Romana d'Ambrosio and all, 2015.

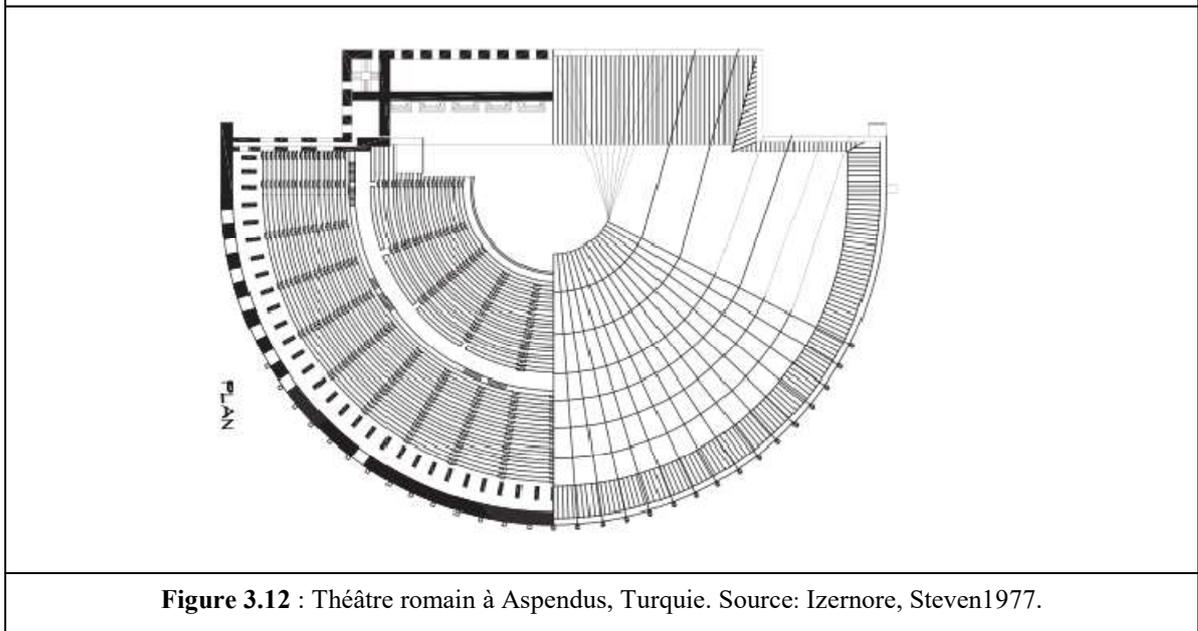


Figure 3.12 : Théâtre romain à Aspendus, Turquie. Source: Izernore, Steven 1977.

Quand à Vitruve il aborde le concept d'interférence de réverbération et d'écho. Il a aussi utilisé des vases acoustiques en terre cuite verre faisant fonction de résonateurs ce qui a donné une nette amélioration de la qualité acoustique surtout dans les églises. (Voir chapitre II page 22)

Ce n'est que des siècles plus tard que Léonard de Vinci souligne la similitude entre la propagation des ondes dans l'eau et du son dans l'air, il étudiait aussi l'écho et en déduit que le son peut avoir une vitesse finie.

Plus tard Newton donne une première approximation de la vitesse du son (330 m/s), pour ce qui est de la propagation du son dans une enceinte. Ce n'est qu'en 1895 que Sabine établit la relation mathématique qui lie le temps de réverbération et la géométrie d'une salle et son absorption ($T_0=0.16\frac{V}{A_0}$) c'est avec cette formule que commence véritablement l'acoustique architectonique telle que nous la connaissons aujourd'hui, et qui sera définie dans le sous chapitre ci-dessous.

3.2.3. Type de salle

Du point de vue de l'acoustique, les salles sont divisées en trois catégories : salles de la parole, salles de la musique et salle de destinations mélangées.

Nous rappelons que notre recherche se penche essentiellement sur l'étude de la qualité acoustique des salles de parole bien précisément sur les salles de conférence lieu de parole et d'écoute par excellence.

3.2.3.1. Salle de la parole (Speech room)

La parole dans n'importe quelle langue se compose de voyelles et de consonnes. Les sons vocaux, y compris les voyelles, sont produits par l'air provenant des poumons qui sont poussés à travers les cordes vocales vibrantes. Ce son à large bande est filtré par des cavités résonantes dans la gorge, la bouche et le nez pour lui donner un spectre qui caractérise en partie la voix de l'individu. Le mouvement de la langue et des lèvres permet de produire différents sons de voyelles. Il s'agit d'un moyen efficace de générer du son, de sorte que les voyelles sont constamment plus bruyantes (de 12 db en moyenne) que ceux des consonnes (Barron, Michael., 2010).

La parole implique une large gamme de fréquences, de moins de 125 Hz à plus de 8000 Hz. La voix masculine contient évidemment plus d'énergie dans les basses fréquences que la voix féminine. Cela se produit en raison d'une ouverture plus longue dans les cordes vocales masculines.

Dans les salles de paroles (amphithéâtres, mosquées, salle de conférences, salles de réunion, salles de classe.....) **les paroles entendues par les auditeurs doivent être intelligibles** (Eurich B et al., 2019).

3.2.3.2. Salle de la musique

Dans les salles de musique (salles de concert, opéra...) les sons musicaux entendus par les auditeurs doivent avoir les qualités essentielles telles que l'intimité, la vivacité, la chaleur, la clarté et l'équilibre. Ceci nous amène à remarquer que les critères d'évaluation de la qualité acoustique d'une salle de parole et d'une salle de musique ne sont pas les mêmes. Chaque salle a ses propres exigences acoustiques. Anselmet, F et Mattei, P précisent que dans une salle de conférence (salle de parole) le temps de réverbération doit être suffisamment faible pour que, l'or d'un discours, le niveau sonore de chaque phénomène ait suffisamment décru avant que le suivant ne soit prononcé par le conférencier. Si ce n'est pas le cas, le discours devient inintelligible. Typiquement pour une salle de parole la durée de réverbération doit être de l'ordre de la seconde, par contre pour une salle de musique classique, cette durée doit être voisine de 1.5 seconde (Fig3.13) (Anselmet, Fabien. Mattei, Pierre-Olivier., 2015).

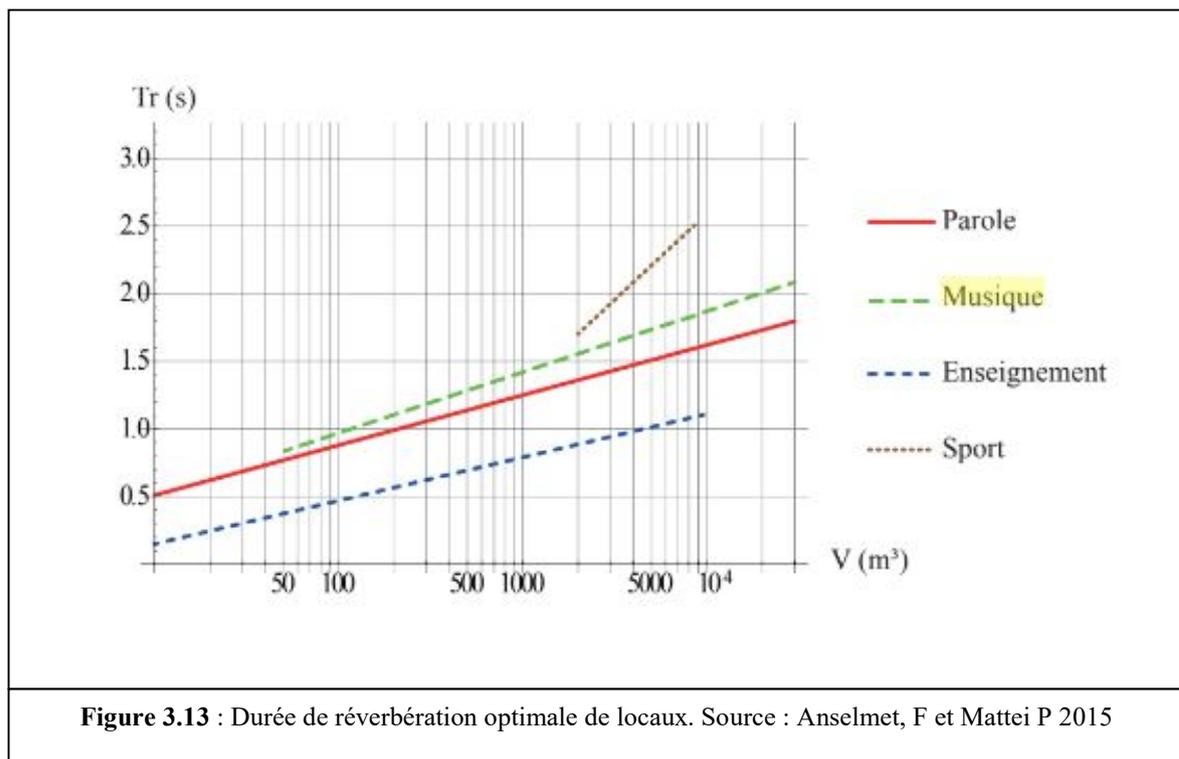


Figure 3.13 : Durée de réverbération optimale de locaux. Source : Anselmet, F et Mattei P 2015

3.2.3.3. Salle de destination mélangée

Ce sont des salles où on trouve à la fois la parole et la musique à l'instar des (théâtres dramatiques, théâtres lyriques, salles polyvalentes,...), les sons entendus par les auditeurs doivent avoir en même temps toutes les qualités mentionnées dans les deux cas ci-dessus (Tran, Bui Vran., 1996).

3.3. Critères de la qualité acoustique d'une salle de conférence

Le problème de la qualité acoustique des salles est multidimensionnel : géométrique (ou physique), objectif (lié au champ acoustique), subjectif, (lié à la perception) (Gramez, Abdelghani., 2010). Dans les trois domaines « architectural, objectif et subjectif » il existe un nombre considérable de paramètres proposés pas différents chercheurs (plus de 30 critères d'évaluation de la qualité acoustique) (FILIPPINI, Mikael., 2004).

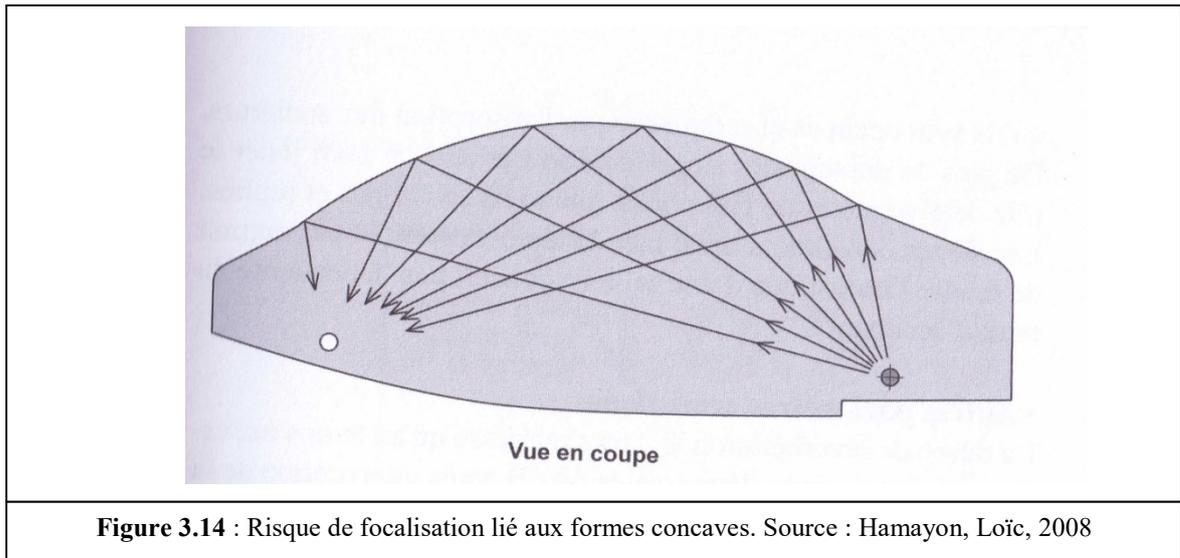
Le spécialiste de l'acoustique Leo L. Beranek a défini en 1962 dix-huit critères permettant de caractériser un local dans son ouvrage fondamental (Music. Acoustics and architecture) (Beranek, Leo L., 1962).

Parmi les nombreux critères qui ont été proposés dans la littérature nous retenons particulièrement :

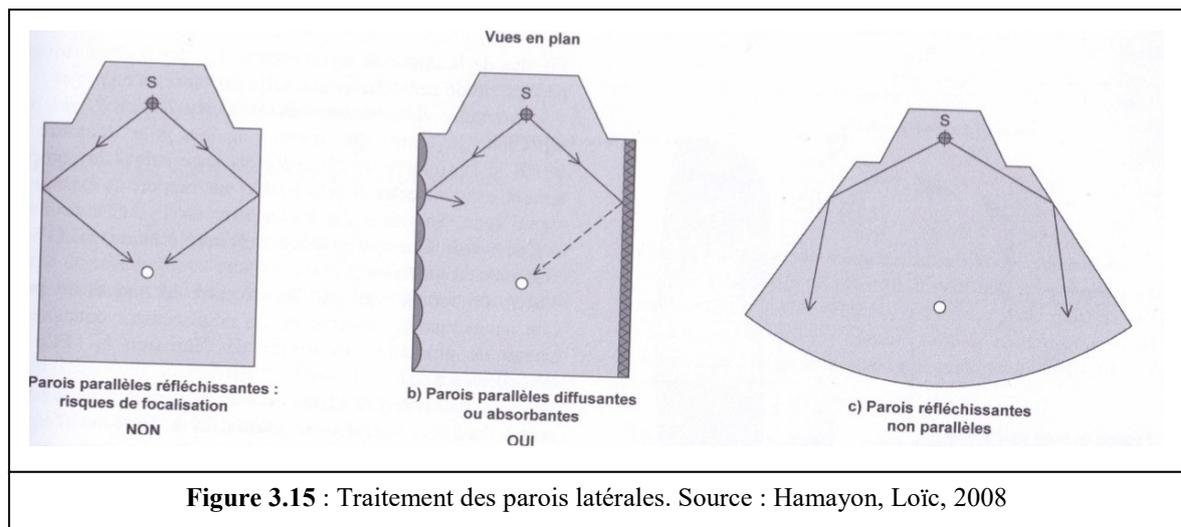
3.3.1. Forme architecturale

Selon HAMAYON, Loïc les bonnes salles, d'un point de vue acoustique, ont des formes variées. Il n'est donc ni possible ni souhaitable de préconiser certaines d'entre elles. En revanche, **il faut absolument éviter** :

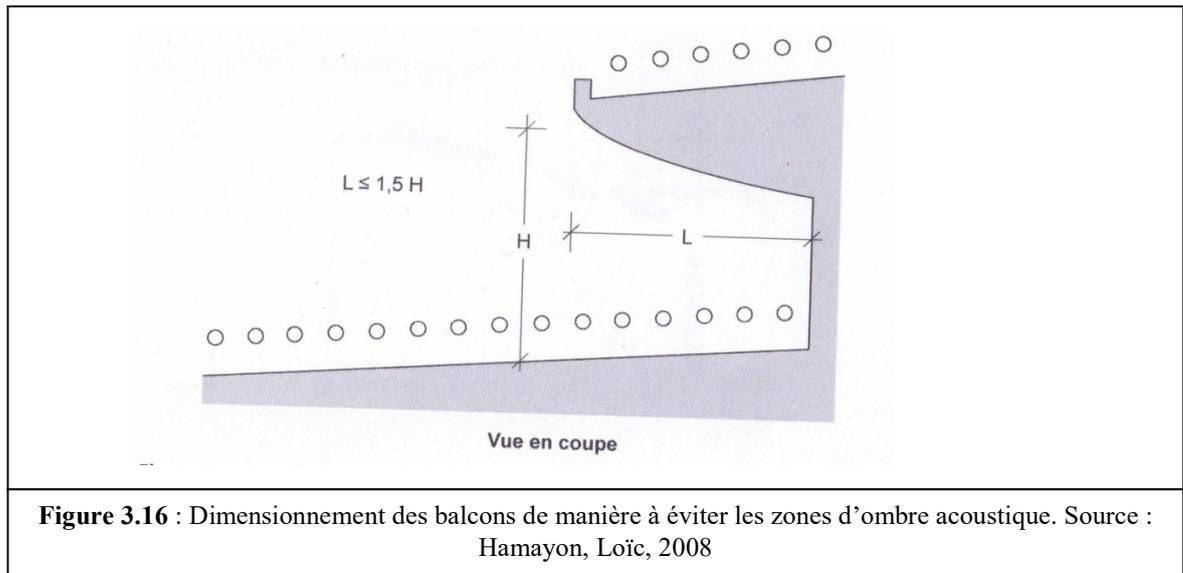
- **Les formes concaves**, que ce soit en fond de la salle ou en plafond (Fig3.14), car il ya des risques de focalisation. Si une forme concave est imposée, par exemple en fond de la salle, elle doit être traitée avec des matériaux absorbants et diffusants.



- **Les grandes surfaces réfléchissantes parallèles:** (Fig2.15) les parois parallèles devant être absorbantes ou diffusantes. Si des parois doivent être réfléchissantes, il faut faire en sorte qu'elles ne soient pas parallèles.

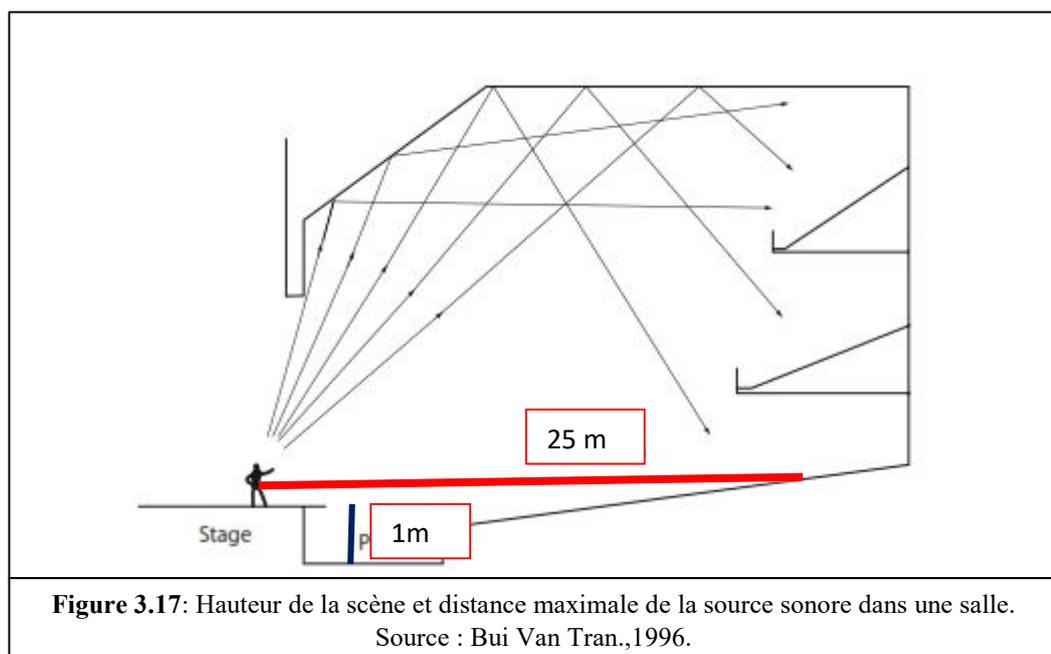


- **Les zones d'ombre acoustiques sous les balcons :** en veillant à ce que la longueur du balcon soit inférieure ou au plus égale à une fois et demie la distance séparant le sol de la sous-face du balcon (Fig3.16).

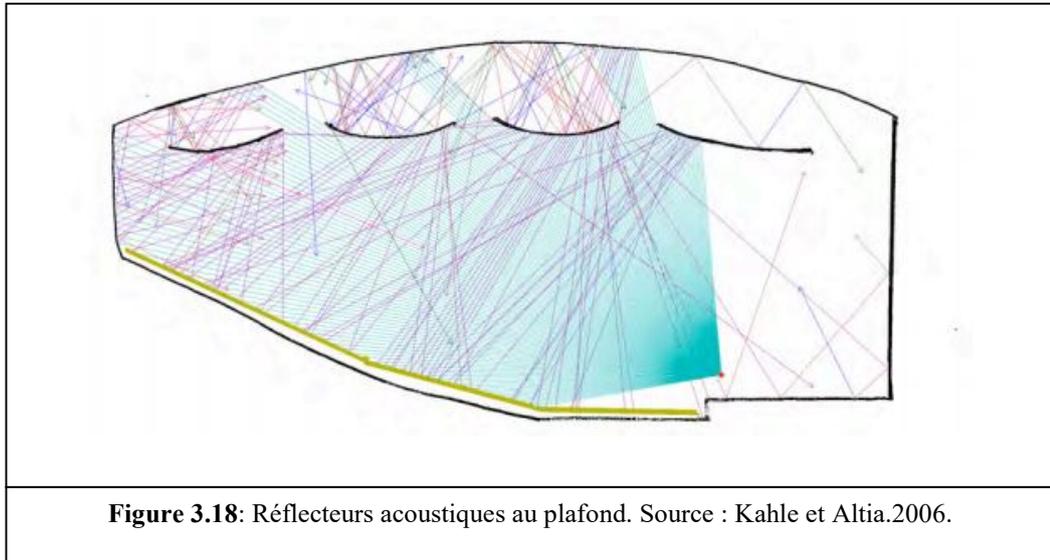


La forme architecturale doit être aussi conçue de telle manière que les auditeurs de toutes les places voient et **entendent** bien les sources sonores placées sur la scène. Pour cela, il faut assurer les facteurs suivants :

- La distance maximale de la source (dans la projection acoustique des salles, la source conventionnelle se trouve habituellement sur l'axe symétrique de la scène, à 1 mètre de hauteur et 1 mètre du bord de la dernière) à la place la plus éloignée ne dépasse pas la valeur critique, **prise habituellement 25 m pour les salles de parole** et 40 m pour les salles de musique (Fig3.17).



- La pente du sol et du (ou des) balcon(s) doit être déterminée selon le principe de vision dégagée, c'est-à-dire le rayon visuel de l'auditeur d'un rang quelconque doit être élevé à celui de l'auditeur du rang précédent de 10 à 15 cm.
- Les surfaces réfléchissantes (réflecteurs) doivent être utilisées pour envoyer les sons réfléchis aux places lointaines où l'énergie des sons directs n'est pas suffisante (Fig3.18) (Tran, Bui Vran., 1996).



3.3.2. Temps de réverbération optimal

Le temps de réverbération est le critère acoustique le plus important dans n'importe quelle salle. La meilleure conception phonique est celle qui assure aux oreilles une réception non distordue des sons de la parole. Cela nécessite de maintenir TR_{OPT} à sa limite inférieure acceptée.

Comme précédemment mentionné dans le premier chapitre le temps de réverbération est calculé selon l'équation de Sabine :

$$TR = \frac{0,16V}{A}$$

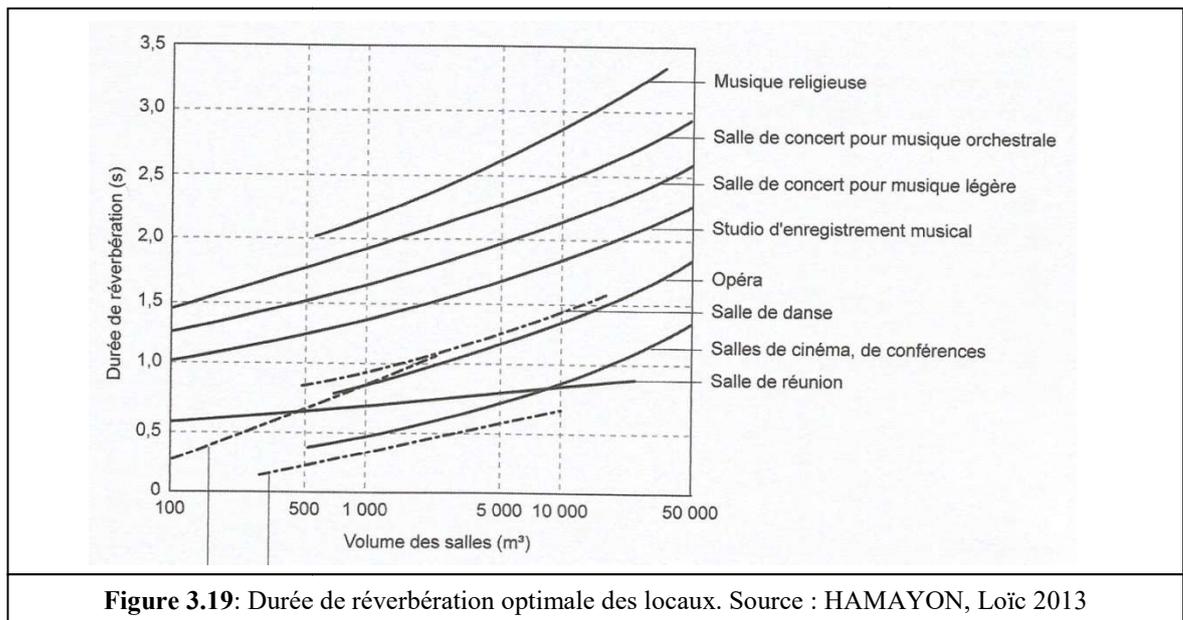
Chaque salle a son temps de réverbération optimal selon son volume et sa destination (Hamayon, Loïc., 2008) (Fig3.19) et (Fig3.20).

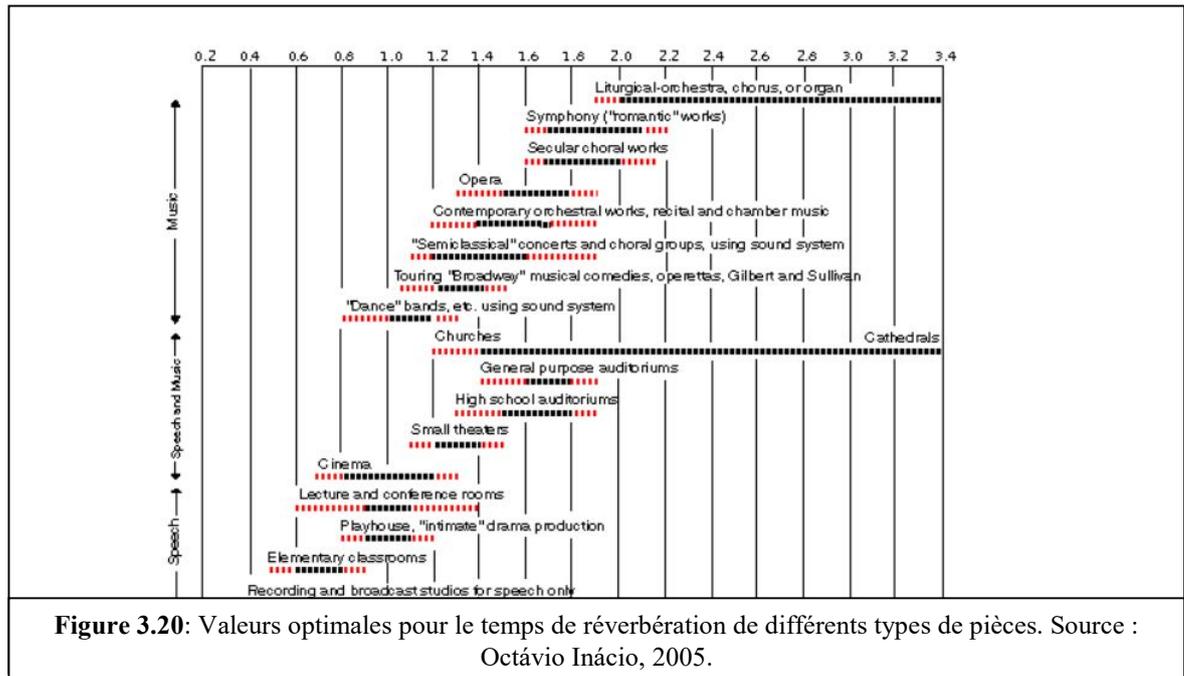
Selon Cavanaugh WJ, Wilkes JA le temps de réverbération optimal d'une salle a une fréquence de 500 Hz est calculé en utilisant la formule suivante : $T_{OPT-500} = 0.3 \log_{10} \frac{V}{10}$ (s). (Cavanaugh William J, Wilkes Joseph A., 1999).

Elkhateeb Ahmed, a défini dans une de ses plus célèbres recherches une formule pour calculer le temps de réverbération optimal dans les bandes de fréquences inférieures à 500 Hz (T). (Elkhateeb, Ahmed., 2005).

$$T_{optOBcf} = n \cdot T_{opt.S} \quad \text{ou} \quad n = \frac{5.6716}{F^{0.2856}}$$

Remarque : plusieurs logiciels acoustiques peuvent calculer le temps de réverbération optimal il suffit juste d'introduire les données numériques de la salle et sa destination, parmi ces logiciels on peut citer : Odeon, Catt acoustic, AcouBAT, Olive Tree Lab SUITE





3.3.3. Le temps de décroissance précoce EDT: (Early Decay Time)

Plusieurs études soulignent la pertinence de l'EDT pour traduire l'impression de réverbération. Il présente aussi une forte corrélation avec la plupart des autres critères, c'est pour cela qu'il est intéressant de le calculer.

Selon la norme ISO 3382³ Le temps de décroissance précoce (EDT) doit être évalué à partir de la pente des courbes de réponse impulsionnelle intégrées (comme le temps de réverbération classique). La pente de la courbe de décroissance doit être déterminée à partir de la pente de la droite de régression linéaire la mieux adaptée de la valeur initiale de 10 dB (entre 0 dB et -10 dB) de la décroissance. Les temps de décroissance doivent être calculés à partir de la pente comme étant le temps nécessaire pour une décroissance de 60 dB (voir annexe I)⁴. Il convient de calculer à la fois l'EDT et le Tr.

L'EDT est subjectivement plus important car il est plus lié à la perception des auditeurs.

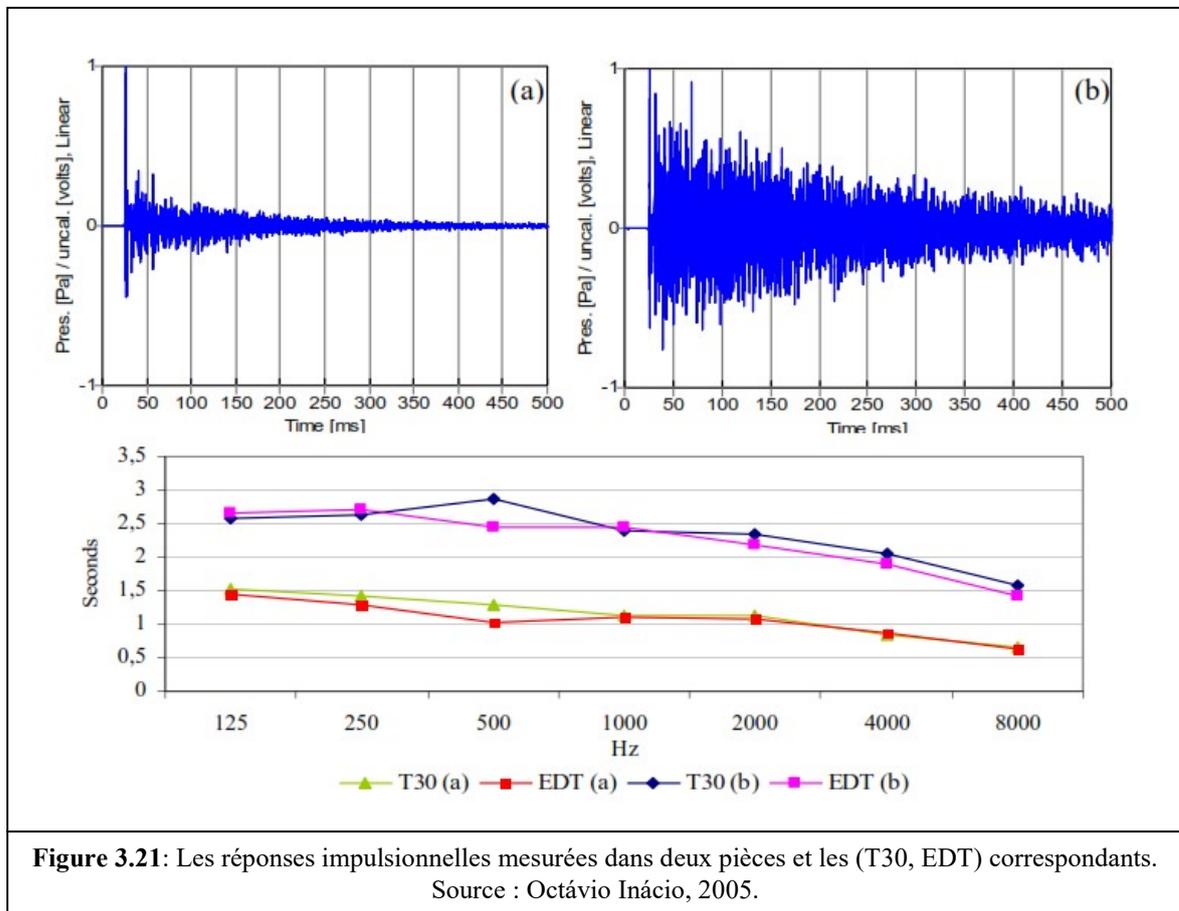
³ La norme ISO 3382 précise les méthodes de mesure du temps de réverbération et d'autres paramètres acoustiques de la pièce dans les salles de spectacle. Il décrit la procédure de mesure, l'appareil nécessaire, la couverture requise et la méthode d'évaluation des données et de présentation du rapport d'essai. Il est destiné à l'application des techniques de mesure numériques modernes et à l'évaluation des paramètres acoustiques de la pièce dérivés des réponses impulsionnelles.

⁴ ISO 3382. *Acoustics Measurement of room acoustic parameters*, BRITISH STANDARD, 2009, p: 15.

Le « bass ratio » est le rapport entre le TR à 125 Hz et le RT à 1000 Hz, il donne une idée de l'importance du RT aux basses fréquences. Pour des salles jugées excellentes par Beranek ce rapport est de 1.26 (Jouhaneau, Jacques., 2000).

3.3.4. Réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle caractérise la réponse en fréquences de la salle. De nombreux critères peuvent se déduire à partir de cette mesure. Pour obtenir la réponse impulsionnelle entre deux points d'une salle, nous devons utiliser une source capable d'émettre une impulsion très brève (Schroeder, Manfred.R., 1979) (coup de pistolet, éclatement de ballon, etc..). En effet une impulsion (signal de durée très courte) couvre un spectre de fréquences très large. Il sera donc très intéressant de la mesurer puisqu'elle nous renseigne sur la manière dont une salle transmet les sons (Filippini, Mikael., 2004) (Fig3.21).



3.3.5. La clarté (C80)

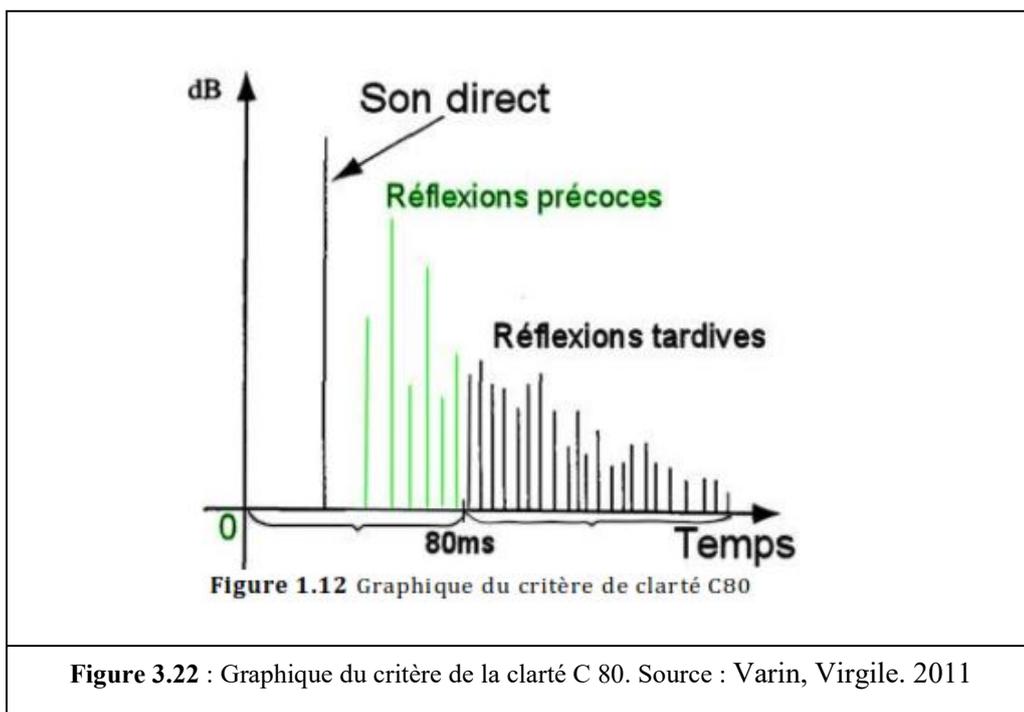
Elle représente le rapport de l'énergie parvenant à l'auditeur durant les 80 premières millisecondes à l'énergie arrivant après ces 80 ms jusqu'à l'extinction du signal exprimée en dB (Farid-Ibrir Dalal, Benzagouta -Samira Debache., 2017).

On suppose habituellement que les réflexions des 80 premières millisecondes qui suivent le son direct sont intégrées à celui-ci. Ces réflexions font partie intégrante du son utile. À l'inverse, le son nuisible est constitué du signal survenant au-delà de 80 ms. Pour mesurer la répartition temporelle de l'énergie, on définit alors **C80** à partir de la réponse impulsionnelle.

$$C_{80} = 10 \lg \frac{(\text{énergie da 0 à 80ms})}{(\text{énergie après 80 ms})} \quad C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_{0.08}^{\infty} p^2(t) dt}$$

$P(t)$ est la réponse impulsionnelle de la pression acoustique de la pièce (Octavio Inácio., 2005).

Par exemple, pour une valeur $C80 = 6\text{dB}$, le niveau de l'énergie réverbérée précoce est supérieur de 6 dB à celui de l'énergie réverbérée tardive (Varin, Virgile., 2011). *(Pour que la clarté soit satisfaisante, C80 doit être compris entre - 6 dB et +6 dB. En dessous de -6 dB, l'ambiance de la salle est trop confuse et de ce fait l'intelligibilité de la parole commence à chuter)* (Fig3.22).



3.3.6. Force sonore G

Aretz, Marc. Orłowski, Raf, définit la force du son G comme étant une mesure du niveau physique du son dans une salle ; elle est étroitement liée à la sensation subjective du volume sonore. C'est pourquoi la force de réverbération doit être équilibrée très soigneusement afin d'obtenir une bonne qualité acoustique tout en évitant un niveau sonore excessif (Aretz Marc. Orłowski Raf., 2009).

Elle est l'écart entre le niveau de pression acoustique L_p observé en un emplacement donné et le niveau de puissance acoustique de l'émission L_w elle est exprimée en dB (Hamayon, Loïc., 2008).

$$G = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_0^2(t) dt} = L_{pE, 10} \text{ dB}^5$$

Où

$$L_{pE} = 10 \lg \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \text{ dB} \quad \text{Et} \quad L_{pE, 10} = 10 \lg \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] \text{ dB}$$

- $p(t)$ est la pression acoustique instantanée de la réponse impulsionnelle mesurée au point de mesure.
- $p_{10}(t)$ est la pression acoustique instantanée de la réponse impulsionnelle mesurée à une distance de 10 m en champ libre.
- P_0 est 20 μPa
- $T_0 = 1 \text{ s}$
- L_{pE} est le niveau d'exposition à la pression acoustique de $p(t)$.

3.3.7. Indice D50. (Deutlichkeit)

Il s'agit d'une comparaison des énergies précoces et tardives de la réponse impulsionnelle pour séparer l'information utile de celle qualifiée de nuisible. Le Deutlichkeit est défini comme le rapport de l'énergie des 50 premières millisecondes après l'arrivée du son direct sur l'énergie totale. Cet indice est lié à l'intelligibilité de la parole et s'exprime en pourcentage (Barney, Federico Cruz., 1999).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

⁵ ISO 3382. *Op. cit.*, p13.

Les valeurs optimales des paramètres cités ci-dessus sont obtenues selon ISO/DIS 3382.

Ces valeurs vont être utilisées dans la deuxième partie pour les comparer avec les mesures in-situ des différents cas d'études.

Tableau 3.1 : Les valeurs optimales des (EDT, C80, G, D50) selon ISO/DIS 3382.

| Subjective listener aspect | Acoustic quantity | Single number frequency averaging ^a Hz | Just noticeable difference (JND) | Typical range ^b |
|---|--|--|----------------------------------|----------------------------|
| Subjective level of sound | Sound strength, G , in decibels | 500 to 1 000 | 1 dB | -2 dB; +10 dB |
| Perceived reverberance | Early decay time (EDT) in seconds | 500 to 1 000 | Rel. 5 % | 1,0 s; 3,0 s |
| Perceived clarity of sound | Clarity, C_{80} , in decibels | 500 to 1 000 | 1 dB | -5 dB; +5 dB |
| | Definition, D_{50} | 500 to 1 000 | 0,05 | 0,3; 0,7 |
| | Centre time, T_S , in milliseconds | 500 to 1 000 | 10 ms | 60 ms; 260 ms |
| Apparent source width (ASW) | Early lateral energy fraction, J_{LF} or J_{LFC} | 125 to 1 000 | 0,05 | 0,05; 0,35 |
| Listener envelopment (LEV) | Late lateral sound level, L_J , in decibels | 125 to 1 000 | Not known | -14 dB; +1 dB |
| ^a The single number frequency averaging denotes the arithmetical average for the octave bands, except for L_J which shall be energy averaged [see (A.17)]. ^b Frequency-averaged values in single positions in non-occupied concert and multi-purpose halls up to 25 000 m ³ . | | | | |

3.3.8. Critères d'intelligibilité.

L'intelligibilité de la parole ou du chant est une composante essentielle de la qualité acoustique d'un grand nombre de salles. Son impact est particulièrement évident en ce qui concerne les salles destinées à la parole : cinémas, théâtres, salles de conférence, etc. Mais elle constitue un élément d'évaluation non négligeable pour des salles à finalité plus musicale dans la mesure où elle peut constituer un très bon indicateur d'homogénéité. Si l'intelligibilité d'une voix est bonne, il est presque assuré que la fidélité de celle-ci soit préservée et l'écoute en sera améliorée (FILIPPINI, Mikael., 2004). La parole d'une salle nécessitant qu'elle soit intelligible, il existe des critères pour la caractériser. Le calcul de l'Indice de Transmission de la Parole STI s'impose de plus en plus comme critère pour caractériser l'intelligibilité du message parlé Cependant.

3.3.8.1. STI : indice de transmission de la parole

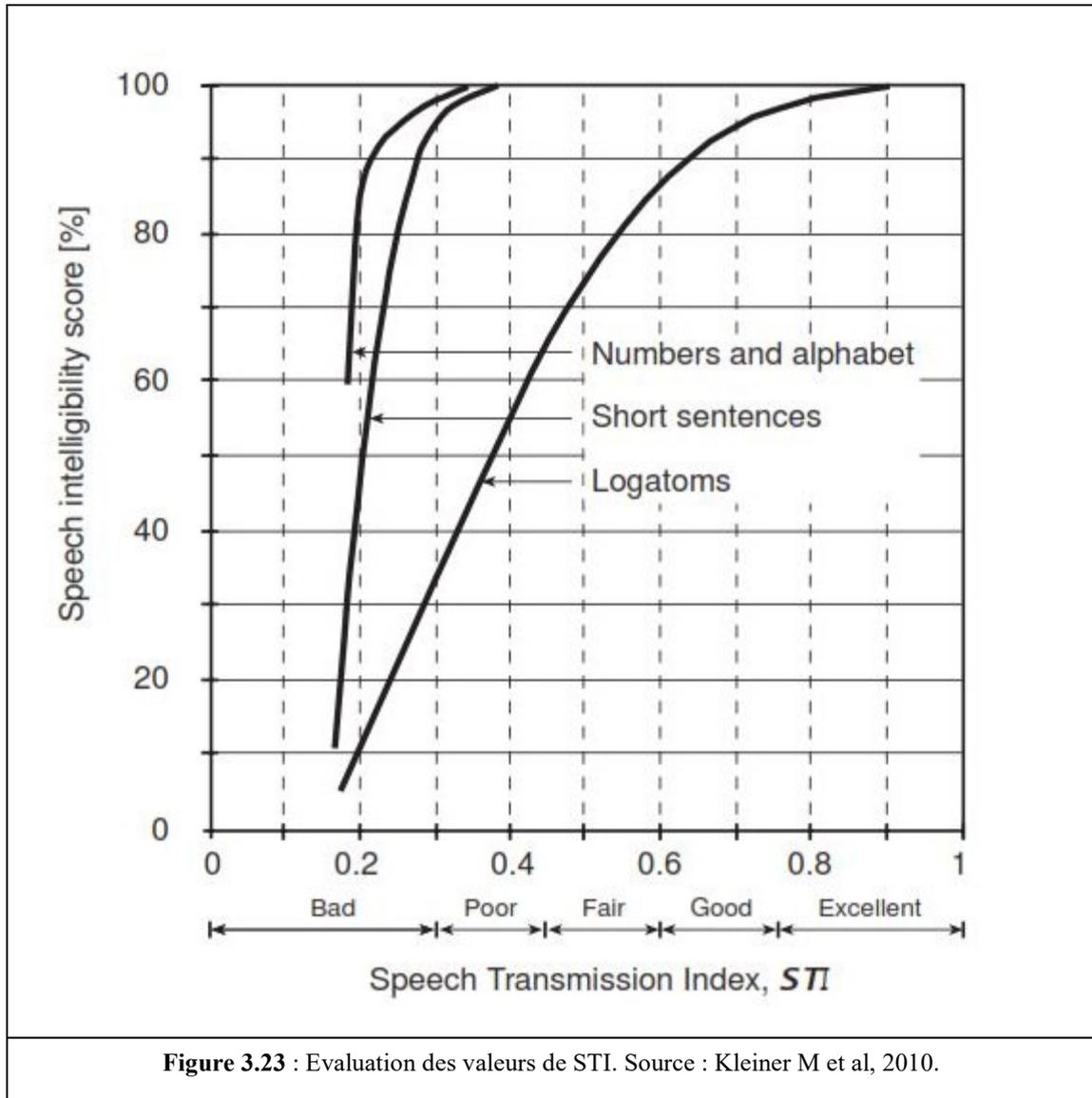
L'indice de transmission de la parole (STI) est l'une des méthodes normalisées les plus utilisées pour prédire objectivement l'intelligibilité de la parole. La méthode STI a fait l'objet de développement et de raffinement depuis son introduction dans les années 1970 (Morales L et al., 2018). Des améliorations continues ont été incorporées dans les révisions successives de la norme IEC60268.16⁶.

L'indice de transmission de la parole (STI) est basé sur les caractéristiques de modulation de la parole et mesure les caractéristiques de modulation d'un signal spécial avant transmission et après réception. Les STI peuvent être utilisées pour étudier l'influence de la parole et de la réverbération. En raison des tests subjectifs approfondis qui ont accompagné le développement des IST, il doit être considéré comme la meilleure mesure jamais obtenue pour l'intelligibilité de la parole (Kleiner M et la., 2010).

A l'aide d'un ordinateur, la valeur STI peut être déterminée à partir d'une mesure de la réponse impulsionnelle d'un système et de la connaissance du spectre du bruit de fond.

En règle générale, les valeurs de STI les plus satisfaisantes pour les salles de paroles sont au-dessus de 0,65. Les valeurs de cet indice sans unité sont comprises entre 0 (complètement inintelligible) et 1 (intelligibilité excellente) (Fig3.23) (Guigou Carter C et al.,2016).

⁶ IEC 60268-16-2011 : Équipement de sonorisation. Partie 16 : Evaluation objective de l'intelligibilité de la parole par l'indice de transmission vocale. Commission électrotechnique internationale, Genève Suisse.



3.3.8.2. RASTI : indice Rapide de la transmission de la parole

Le STI a été simplifiée en le Rapid speech transmission index RASTI (Diaz C Velazquez C., 1995). Le signal émis ne comprend plus que deux bandes de bruit rose d'une octave, l'une à 500 Hz, représentant les voyelles, l'autre à 2000 Hz, représentant les consonnes, toutes deux modulées par un nombre réduit de fréquences modulantes (1,02 ; 2,03 ; 4,07 et 8,14 Hz, respectivement 0,73 ; 1,45 ; 2,90 ; 5,81 et 11,63 Hz). Son avantage et la rapidité de la mesure ; c'est pourquoi il est largement en acoustique des salles, **notamment pour les systèmes de sonorisation de la parole**. Une durée de mesure de 10 à 15 s est un bon compromis entre rapidité et précision (Mario Rossi., 2007).

3.3.8.3. Facteur de perturbation : les échos

Quand notre oreille reçoit deux sons identiques séparés d'un intervalle de temps assez faible, elle ne perçoit généralement qu'une seule image sonore. La limite de cet intervalle est de 50 ms. Au delà l'oreille perçoit deux sons distincts dans le temps, il y a écho. La condition d'apparition de l'écho correspond à une différence de marche de 17 mètres. La présence d'échos peut être nuisible à la qualité acoustique mais tout dépend du type d'utilisation de la salle.

Cependant, il nous est facile de comprendre que la présence d'échos n'est pas souhaitable pour des salles de conférence, de studios d'enregistrement où l'on recherche en particulier une très bonne intelligibilité.

Conclusion

Le domaine de l'acoustique des salles est un domaine très vaste et très complexe, il est ainsi nécessaire de comprendre les développements techniques et scientifiques de ce domaine.

Dans ce chapitre, nous avons brièvement exposé les types des équipements culturels, en se concentrant sur les salles de conférences qui sont l'objet de notre présente recherche. Nous avons présenté en détail les caractéristiques acoustiques requises dans ce type de salles, ce qui détermine la qualité acoustique de ces salles, en se basant sur les normes et les dernières recherches dans ce domaine.

Nous avons également expliqué les critères d'évaluation de la qualité acoustique de la salle de conférence qui se résument en plusieurs points tels que la forme architecturale, le temps de réverbération optimal, la clarté (C80), la force sonore G, l'indice D50 et l'intelligibilité.

Ces aspects ont été abordés dans le présent chapitre afin de fournir une perspective globale des principes fondamentaux de l'acoustique des salles de conférences.

**CHAPITRE IV : REHABILITATION
ACOUSTIQUE DURABLE**

Introduction

La question de la réhabilitation acoustique se trouve depuis plusieurs années au centre des préoccupations des chercheurs et suscite un intérêt grandissant des spécialistes (acousticiens, architectes et ingénieurs.). Elle se trouve ainsi motivée par des considérations multiples. Les spécialistes de différentes nationalités ont consacré leurs efforts pour une bonne prise en charge des équipements qui souffrent de problèmes phoniques et qui gênent la fonction qui s'y déroule.

À travers ce chapitre nous allons définir cette intervention (la réhabilitation) et identifier ses différentes phases. Nous expliquerons la notion de durabilité et son importance par rapport à la réhabilitation acoustique en utilisant des matériaux durables qui sont des produits qui procurent des avantages environnementaux, sociaux et économiques tout en protégeant l'environnement tout au long de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur élimination finale¹.

Nous considérerons aussi les différentes recherches élaborées sur la réhabilitation acoustique et les méthodes développées afin de pouvoir s'en inspirer pour entreprendre notre cas d'étude avec un maximum d'idées et de compréhension.

4.1. Réhabilitation

4.1.1. Définition

Selon le dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement (Merlin Pierre. Choay Coay., 2009) « *la réhabilitation est un ensemble de travaux visant à transformer un local, un immeuble ou un quartier en lui rendant des caractéristiques qui les rendent propres au logement d'un ménage dans des conditions satisfaisantes de confort et d'habitabilité, tout en assurant de façon durable la remise en état du gros œuvre et en conservant les caractéristiques architecturales majeures des bâtiments* ».

Cette opération est considérée comme une amélioration de l'habitat ou tout autre équipement existant, mais est, en réalité, une opération plus poussée. Elle peut en fait comporter la restructuration interne d'un logement, voire même la division d'un immeuble

¹ La surveillance de l'impact des processus de construction sur l'environnement est en réalité très importante car l'industrie du bâtiment est l'un des plus importants du secteur. En outre, il est responsable de 40% de la production totale de déchets

en appartements pour s'adapter à des exigences de taille ; en particulier, l'installation d'un ascenseur, la réfection des toitures, le ravalement et la consolidation des façades les revêtements des murs etc..... (Dekoumi Djamel., 2007).

Pour RehabiMed², le concept de réhabilitation recouvre un vaste spectre d'interventions ayant pour objectif la récupération et la mise à jour d'une fonction perdue ou endommagée. Ce type d'opération peut conduire à une répartition interne des locaux. Le souci majeur étant l'amélioration des conditions techniques et architecturales des équipements.

4.1.2. Type de réhabilitation

4.1.2.1. Réhabilitation lourde

Consiste à maintenir le gros œuvre et à renouveler tout le reste (toiture, plancher, électricité, sanitaires, chauffage...).

4.1.2.2. Réhabilitation légère

C'est une opération correspondant en fait à l'exécution à un moment précis de tous les travaux d'entretien qui n'ont pas été réalisés pendant de nombreuses années (protection du bâtiment contre l'infiltration d'eau, équipement pour répondre aux critères actuels du confort, renforcement de la sécurité électrique...)³

4.1.3. Réhabilitation acoustique

4.1.3.1. Définition

La réhabilitation Acoustique essaye de donner des solutions concrètes aux problèmes générés par un design acoustiquement malade, un nouvel usage, ou variation de ratio de confort. (Daumal F., 1990) Le plus souvent, la réhabilitation acoustique est un élément de réhabilitation totale d'un équipement ou d'un immeuble. Elle doit également être entreprise, au moins partiellement, dans le cadre d'une réhabilitation thermique.

La réhabilitation se fait à travers deux interventions principales : Correction acoustique et isolation acoustique, pour assurer un meilleur confort acoustique du local.

² Méthode RehabiMed pour la réhabilitation de l'architecture traditionnelle méditerranéenne.

³ Décret N° 89 / 684 du 06 novembre 1989

4.1.3.2. Isolation acoustique

L'isolation phonique est l'ensemble des dispositions prises pour réduire la transmission de l'énergie depuis les sources qui la produisent jusqu'aux lieux qui doivent être protégés. Pour maîtriser les propriétés d'isolation acoustique, il faut tenir compte de la surface de la cloison/du mur de séparation, ainsi que du volume et des propriétés d'absorption acoustique de la pièce de réception (Hamayon L., 2008).

4.1.3.3. Correction acoustique

Un environnement, même s'il est parfaitement insonorisé et peu perméable au son, peut maintenir un comportement réverbérant. Le traitement anti-réverbération ou, mieux, la correction acoustique, est une étape nécessaire après l'insonorisation. Le traitement acoustique générique consiste en l'application de panneaux absorbant le son dans les points "cruciaux" ; les matériaux sont absorbants avec des cellules ouvertes capables de bloquer le son et de le dissiper sous forme de chaleur. Leur forme, leur densité et leur épaisseur permettent de "capturer" le son dans les différentes bandes de fréquences.

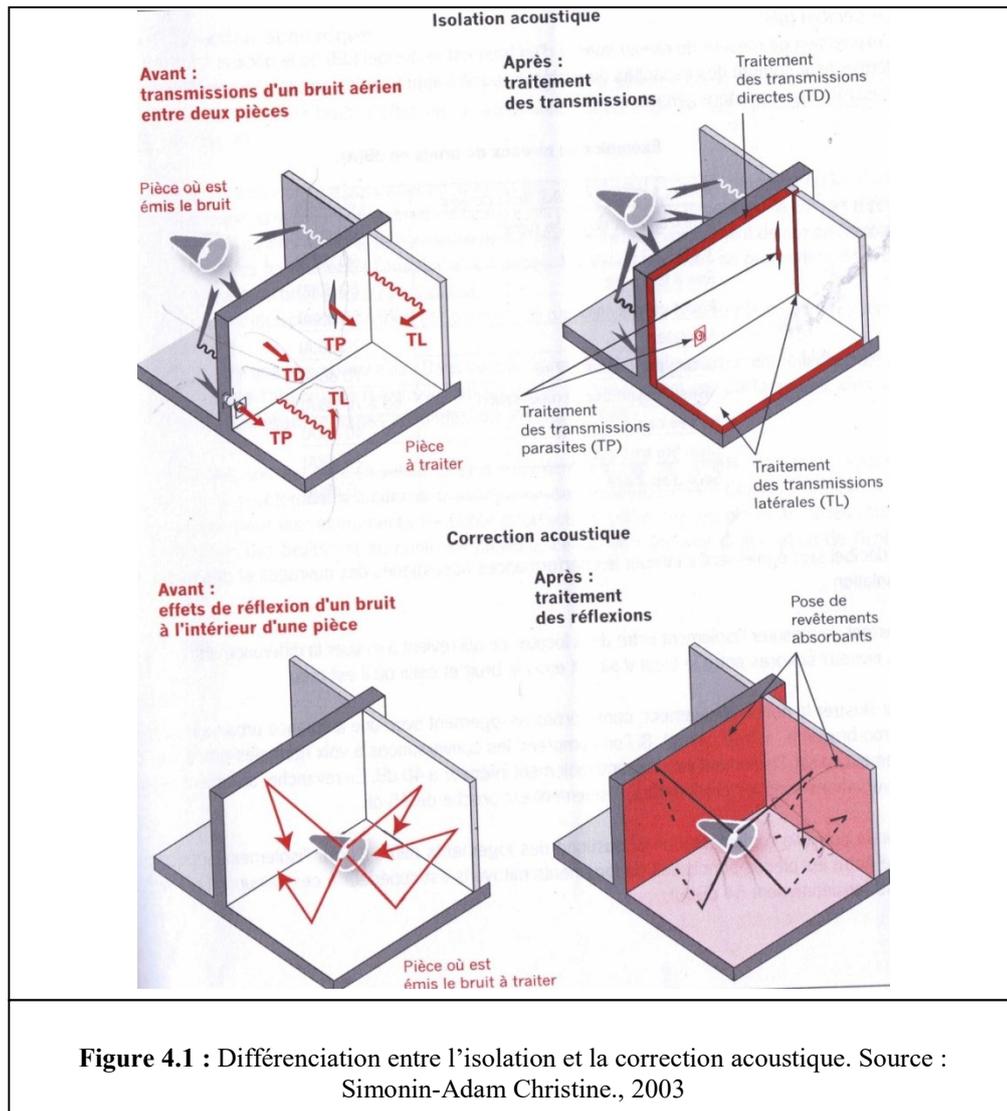
La véritable correction acoustique permet de mesurer les temps de réverbération en fréquence pour une pose ciblée de matériaux insonorisants/réfléchissants, ou des correcteurs acoustiques obtenus par le coefficient d'absorption des matériaux et du mobilier de la pièce...

La correction acoustique a pour objectif d'assurer la qualité acoustique interne d'un local qui peut être :

- Un lieu où l'écoute doit être favorisée, c'est-à-dire où le niveau sonore en provenance de la source doit être renforcé (salle de conférence, salle de spectacle, salle d'enseignement.....) ;
- Un lieu où le niveau sonore doit être diminué (local industriel, atelier, bureau, préau d'école, circulation commune....) ;
- Un lieu acoustique particulier, c'est-à-dire un lieu où, tout à la fois, le niveau sonore doit être diminué et l'écoute à faible distance favorisée (salle de sport, piscine, restaurant...)

L'obtention d'une bonne correction acoustique dépend :- Du volume et la forme du local ; - De la qualité de ses parois, déterminée notamment par les matériaux qui les recouvrent.

La correction et l'isolation correspondent à des actions différentes sur les bruits ; il ne faut donc pas les confondre (Fig.4-1). (Simonin-Adam Christine., 2003).



4.1.4. Processus de réhabilitation acoustique

4.1.4.1. Etat des lieux (Pré-diagnostic)

Cette étape constitue le premier contact de l'architecte et de l'acousticien avec le bien à réhabiliter. La visite du pré-diagnostic marque le début de toute opération de réhabilitation qu'elles soient architecturales, techniques ou acoustiques

(Bouaziz Samia.,2011). Cette phase permet de rassembler tous les documents graphiques ou acoustiques qui pourraient aider à compléter l'évaluation des performances acoustiques du bâtiment pour comprendre ses différentes pathologies et problèmes.

4.1.4.2. Diagnostic acoustique

Un diagnostic acoustique est un audit réalisé, de manière prédictive ou au stade actuel, par un expert du son, afin de mesurer et d'analyser les problèmes liés au bruit.

Le diagnostic acoustique permet une mesure précise (à l'aide de nombreux outils) des niveaux sonores provenant de toute la zone contrôlée mais également de l'environnement extérieur.

Pluie, grêle, bruits de circulation automobile ou ferroviaire, bruits de matériel ou de machines... l'étude prend en compte l'ensemble de l'environnement sonore ambiant.

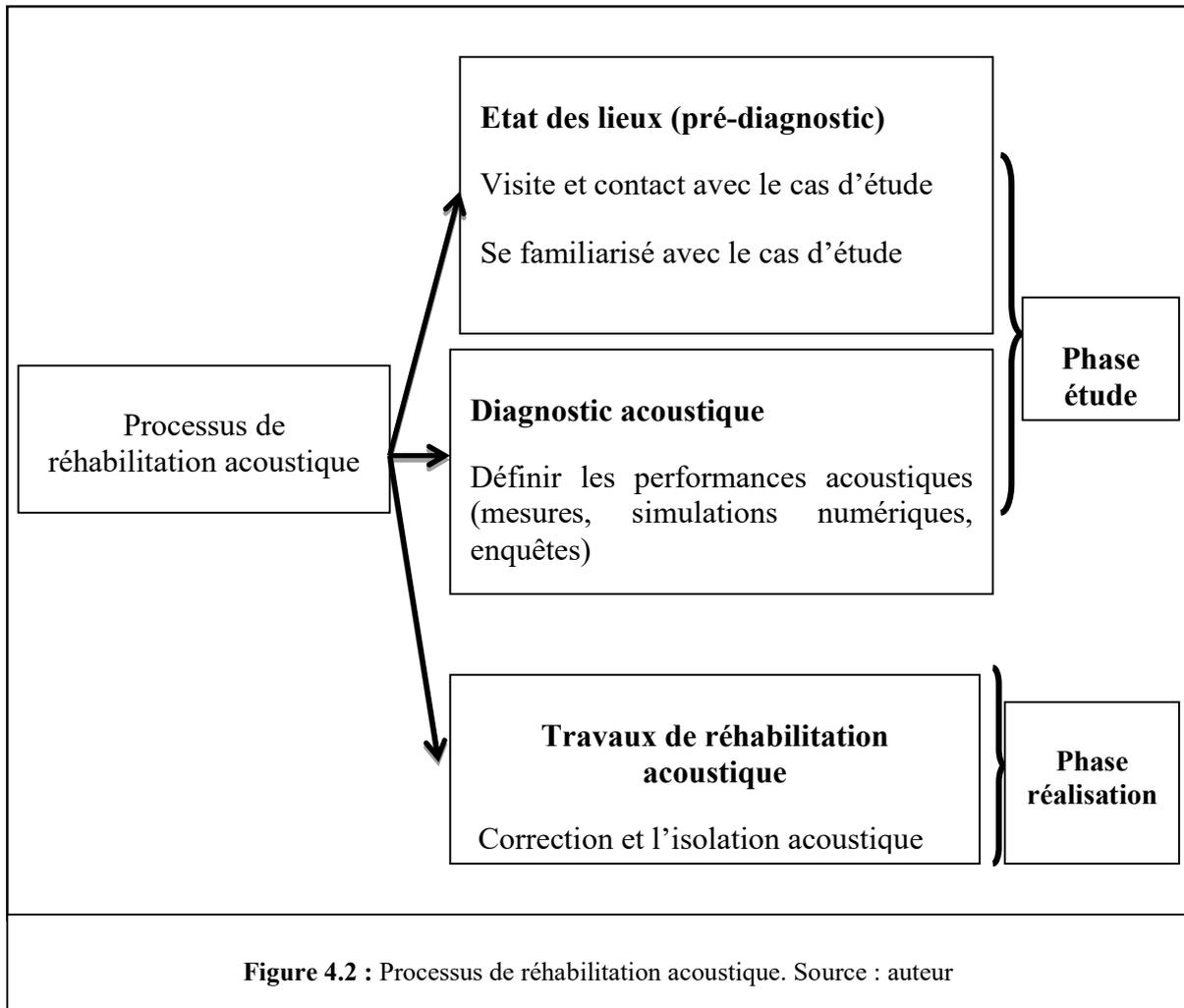
Un acousticien peut donc effectuer un diagnostic acoustique et analyser les bruits et leur propagation afin d'améliorer le confort acoustique d'un bâtiment, d'une infrastructure, d'une pièce... Il doit comprendre le contexte de ce diagnostic acoustique et, pour ce faire, se poser de nombreuses questions une réponse personnalisée à cette analyse. Grâce à cette étude et à ces différents contrôles, l'acousticien sera en mesure de proposer des solutions optimales aux différents types de problèmes identifiés.

Il existe de nombreux outils pour définir les performances acoustiques d'un local parmi ces outils nous citons : les mesures acoustiques, les enquêtes, simulations numériques et sondages.

4.1.4.3. Solutions proposées et travaux de réhabilitation

Afin d'améliorer le comportement acoustique des salles, l'introduction d'une série de mesures correctives est proposée dans deux conditions: écologique et économique.

Les travaux de réhabilitation acoustique se basent essentiellement sur la correction et l'isolation acoustique pour un remède des pathologies définies dans la phase de diagnostique (Fig.4-2).



4.2. Synthèse de la littérature dans le domaine d'amélioration de la qualité acoustique des salles (état de l'art)

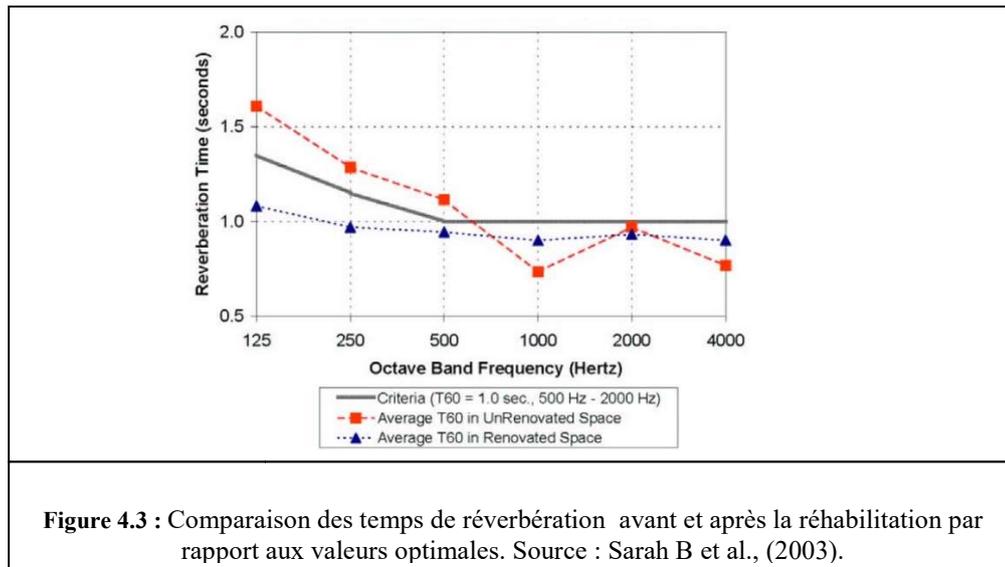
Plusieurs études sous forme d'articles ou de thèses ont été entreprises sur le domaine de l'amélioration de la qualité acoustique des salles existantes, en se basant sur des méthodes expérimentales, mesures in situ et simulations informatiques. Malheureusement les recherches qui étudient les salles de conférences sont très rares du coup nous avons été contraints d'élargir notre champ de recherche aux différentes salles de parole tels que (salle de prière, auditorium, amphithéâtre.....) sachant que ces salles ont les mêmes critères d'évaluation de la qualité acoustique tel qu'il a été rapporté au chapitre II.

Nous allons à travers ce qui suit exposer les résultats les plus récents et pertinents dans ce domaine.

4.2.1. Exemples et recherches sur la réhabilitation durable

Les salles de la parole sont des espaces essentiels dans notre vie contemporaine. Ces salles de conférences, auditoriums, amphithéâtres et salles de prière comprennent un large éventail d'espaces et d'utilisations. L'intérêt porté à l'acoustique de ces espaces s'est considérablement accru ces dernières années. Bistafa Sylvio R et Bradley John S., (2001) Hodgson Murray et Nosal Eva-Marie., (2002), Mir Sabeer et Abdou Adel, (2005)., et d'autres chercheurs encore ont produit une masse considérable de travaux dans ce domaine.

Sarah B et al., (2003) ont étudié et analysé les défauts acoustiques de quatre auditoriums de conférences à l'Université du Texas à Austin (États-Unis). Trois de ces auditoriums étaient identiques (capacité de 138 étudiants) et le dernier était plus petit (capacité de 117 étudiants). Le principal défaut acoustique reproché par de nombreux utilisateurs des espaces était que l'intelligibilité de la parole des étudiants était particulièrement médiocre. L'acoustique médiocre dans l'espace s'est avérée problématique en raison de l'enseignement de type discussion utilisé par plusieurs professeurs qui l'utilisaient. Grâce à de nombreuses techniques telles que la visite de site, le temps de décroissance de la réverbération sur site, la mesure du bruit de fond, l'analyse du diagramme de rayons et l'analyse de la formule de Sabine, les raisons ont été identifiées. Les espaces étaient réverbérants, les échos lisses et les réflexions en slap back rendaient les sources vocales difficiles à localiser. Il y avait un bruit modérément excessif et un bruit de corridor intrusif. Bien que les zones de traitement acoustique (absorbant et diffusif) soient adéquates, elles ne sont pas placées correctement dans la pièce et ne sont pas efficaces. Les auteurs ont proposé certaines recommandations, notamment une isolation phonique et des modifications des murs et du plafond afin de supprimer ces défauts. Certaines de ces modifications ont été mises en œuvre dans une pièce. Ensuite, le T_r et le bruit de fond ont été mesurés à nouveau dans cette pièce. Les résultats (Fig.4-3) ont montré que les modifications ont été couronnées de succès, principalement en raison de l'élimination des schémas de réflexion indésirables, du lissage de la réponse en fréquence pendant la durée de décroissance de la réverbération dans la pièce et de l'introduction de réflexions de plafond avantageuses.



Gagliano Antonio et al., (2015) ont présenté les résultats d'une enquête expérimentale sur la performance acoustique d'une église appelée « Preziosissimo Sangue di Gesù » située à Ragusa (Italie) (Fig.4-4). Dans le but d'identifier les problèmes acoustiques de la salle et trouver des solutions pour améliorer sa qualité acoustique, les auteurs ont procédé à travers les étapes suivantes aux:

- mesurer les indices acoustiques (RT 60, STI, EDT, C 80, D 50) basées sur des expériences.
- modéliser les caractéristiques géométriques et acoustiques de l'église à l'aide du logiciel Catt-Acoustic.
- validation et calibration du modèle informatique
- proposition d'interventions appropriées pour les corrections acoustiques
- évaluation de la qualité du climat acoustique après les corrections

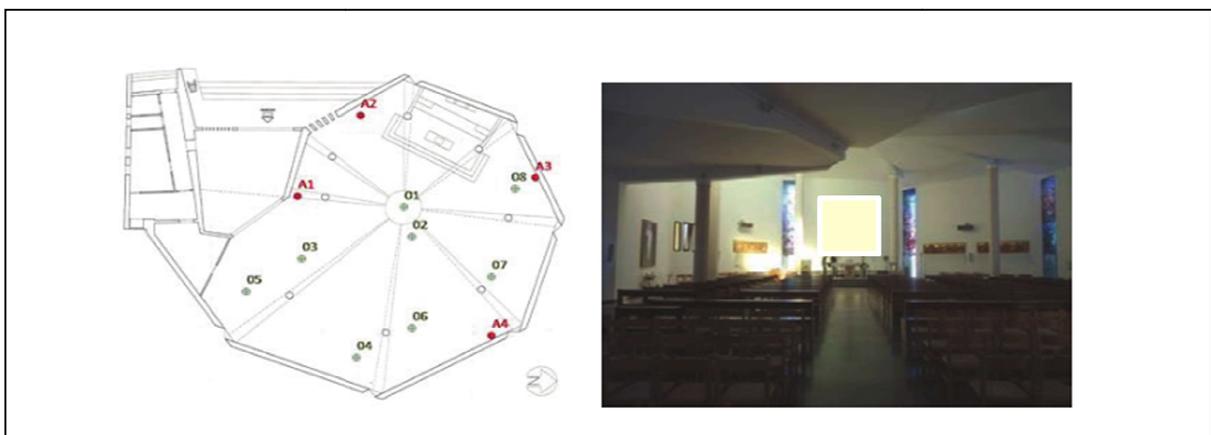
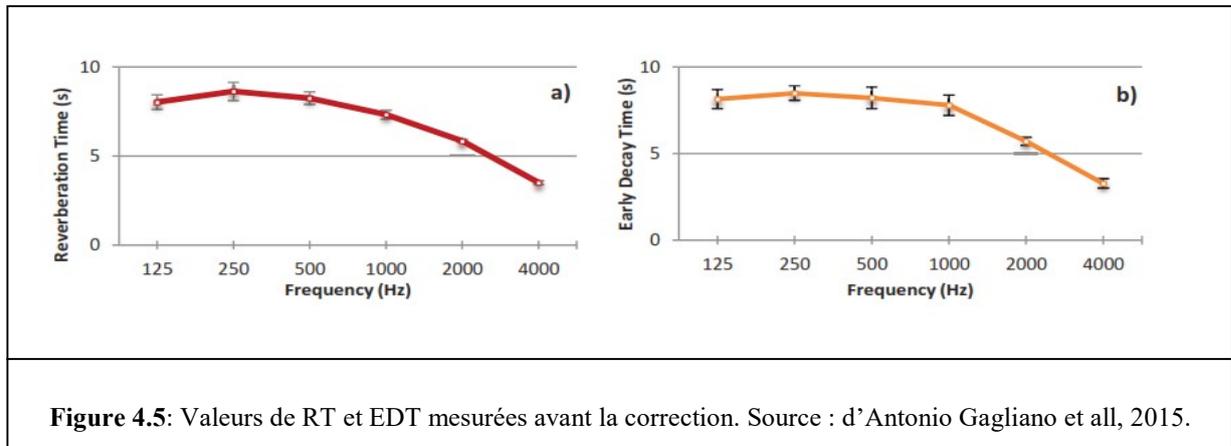


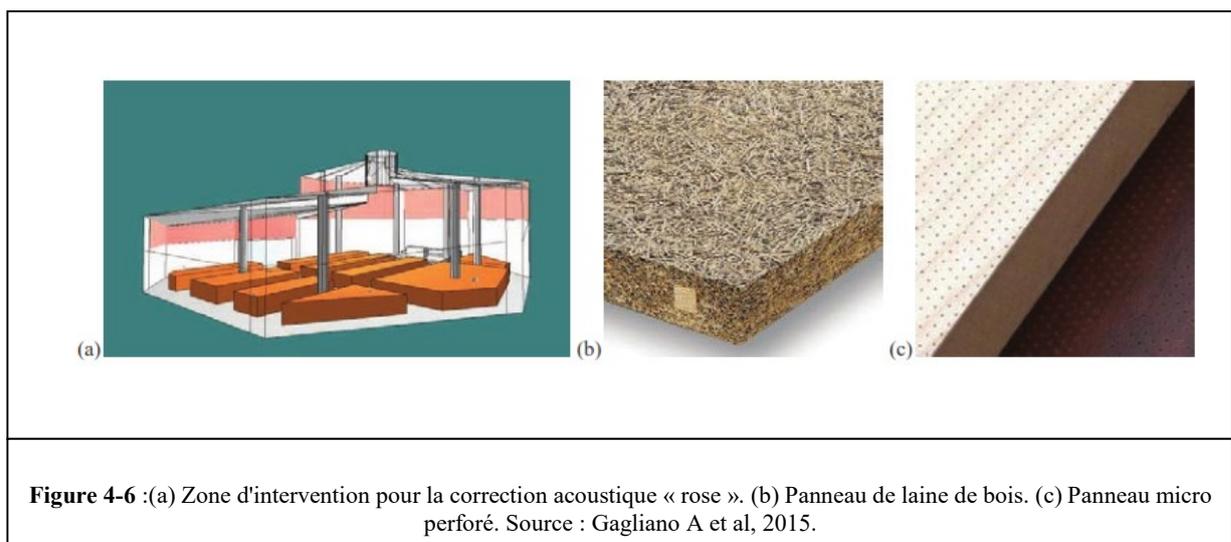
Figure 4.4 : Eglise de Preziosissimo Sangue di Gesù. Source : Gagliano A et all, 2015.

L'étude acoustique réalisée a révélé que le temps de réverbération, la clarté, la définition et l'indice d'intelligibilité de la parole sont très loin des valeurs optimales pour ce type d'équipements, par exemple RT 60 et EDT d'environ 7,3 sec à 1000Hz (Fig.4-5).



Un modèle informatique 3D a été installé dans le logiciel CATT-Acoustic pour simuler le champ acoustique à l'intérieur de l'église. Une fois les surfaces sur lesquelles les matériaux absorbants peuvent être insérés, ont été définies (Fig.4-6a), deux traitements différents sont proposés pour la correction acoustique de la salle : **Le premier est un matériau absorbant poreux en laine de bois (Fig.4-6b). Le second est un panneau micro-perforé, basé sur le principe du résonateur de Helmholtz (voir chapitre I) (Fig.4-6c).**

Les simulations effectuées ont révélé que les deux solutions acoustiques proposées permettent d'obtenir des améliorations significatives pour chaque indice acoustique (ex : RT 60 d'environ 2,5 secondes à 1000 Hz et STI d'environ 40% d'amélioration).



Eldakdoky Soha et Elkhateeb Ahmed., 2017 ont procédé à une recherche sur la base des indicateurs couramment utilisés pour l'intelligibilité de la parole. Ce travail évalue acoustiquement les deux plus grands auditoriums de la faculté d'ingénierie de l'université Helwan du Caire (Fig.4-7), en Égypte, à l'aide de techniques de simulation expérimentale et numérique.

Des traitements de conception ont également été suggérés pour améliorer les performances acoustiques des auditoriums, où l'impact de ces traitements a également été contrôlé à l'aide de la simulation. Les modèles analysés à l'aide du logiciel CATT ont d'abord été validés à l'aide des résultats des travaux sur le terrain menés dans les salles inoccupées. Les résultats ont montré que la qualité acoustique des deux auditoriums était loin des conditions optimales en raison de leurs caractéristiques acoustiques inadéquates et de leur niveau de bruit élevé.

Les résultats des propositions d'amélioration ont montré que la modification de la forme du plafond et l'ajout de matériaux absorbants efficaces aux surfaces arrière réduisaient avec succès le temps de réverbération excessif aux valeurs optimales, augmentaient les réflexions précoces et éliminaient les zones d'ombre. En outre, la réduction des niveaux de bruit de 20 dB due à l'amélioration de l'isolation de la fenêtre a sensiblement amélioré l'intelligibilité de la parole de tous les récepteurs.

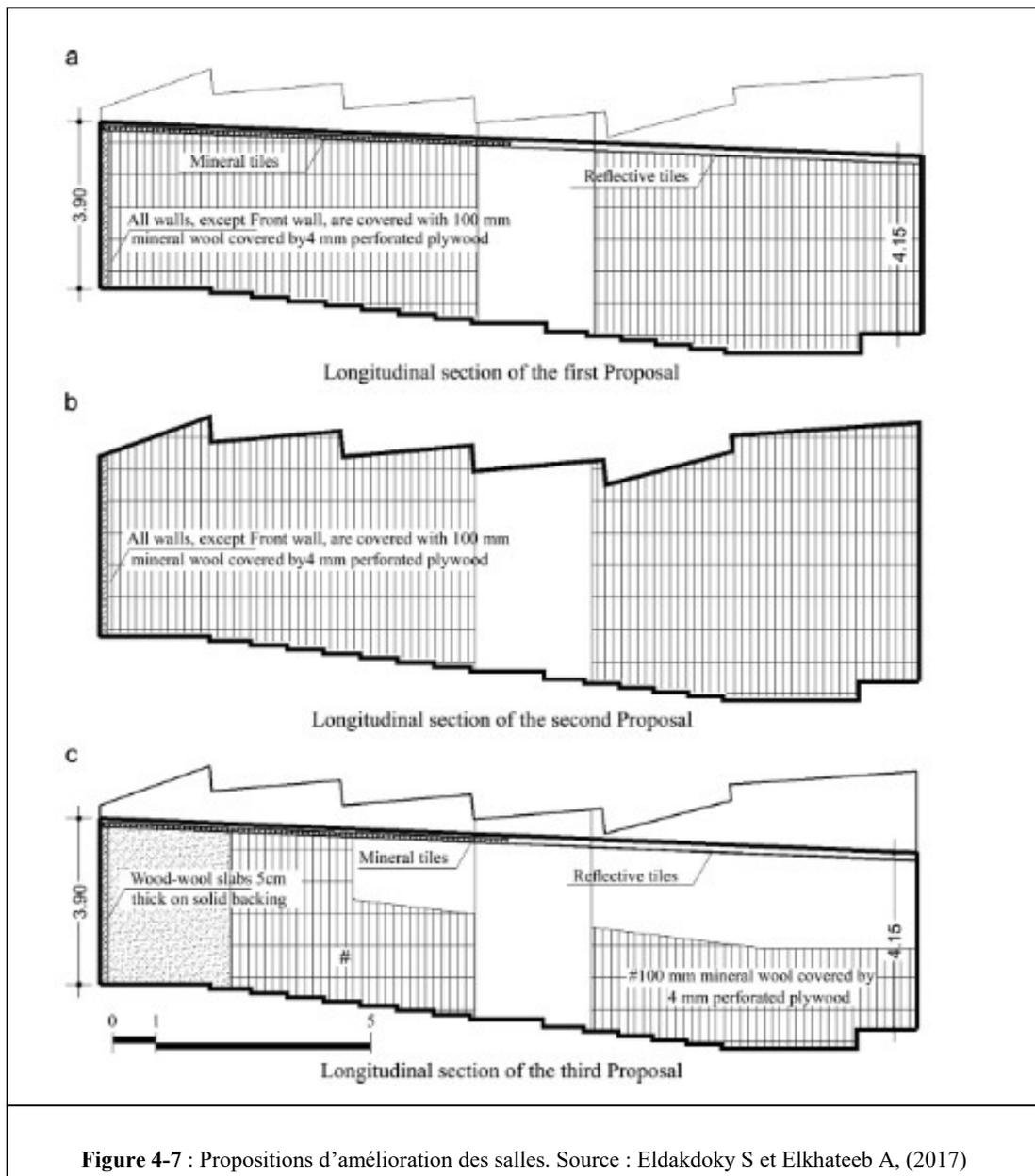


Figure 4-7 : Propositions d'amélioration des salles. Source : Eldakdoky S et Elkhateeb A, (2017)

De même Munteanu C et al., 2017 ont élaboré une étude complexe de la réhabilitation acoustique d'un amphithéâtre appartenant à la Faculté des sciences de Génie électrique de l'Université technique de Cluj Napoca (Fig.4-8) et à la présentation des mesures à adopter pour satisfaire pleinement aux exigences de base des bâtiments et fournir une intelligibilité optimale de la parole aux auditoriums et salles de conférences. Les solutions proposées sont :

- revêtement des murs des salles de conférence avec **des panneaux insonorisants Vicoustic**
- revêtement des murs des salles de séminaires avec **des panneaux Gyptone**

Les solutions proposées pour la réhabilitation acoustique des différentes salles ont conduit à une amélioration remarquable de la qualité sonore.



Figure 4-8 : Amphithéâtres étudiés. Source : Munteanu C et al., 2017.

De leurs cotés Gramez Abdelghani et Boubenider Fouad., (2017) ont évalué le confort acoustique d'une salle de conférence située dans un échantillon d'un équipement récemment construit (Fig.4-9). Les mesures acoustiques et l'évaluation physique du bâtiment de structures légères prises en tant que sujet de cette étude ont révélé que l'aspect acoustique n'avait pas été complètement pris en compte dans la phase de conception. Les principaux facteurs responsables de la gêne acoustique sont analysés. Les facteurs les plus importants sont la position de la machine et sa conception défectueuse (performances acoustiques modestes du mur en terrasse, réverbération, faible volume, performances acoustiques médiocres de la porte s'ouvrant directement sur la salle de conférence, etc.). Certaines recommandations sont par conséquent données et discutées pour remédier à cette situation et améliorer l'acoustique du bâtiment :

- Nécessité de changer la position de la salle de contrôle ou d'utiliser un mur à haute isolation acoustique.
- Besoin de rénover les murs intérieurs de la pièce afin d'augmenter leurs zones d'absorption acoustique et de réduire le niveau des échos,

En fait, cette étude a identifié quelques défauts de conception et proposé des solutions de réhabilitation pour les projets réalisés ou en cours. Cela peut également aider à mettre à jour les spécifications techniques pour les projets futurs.



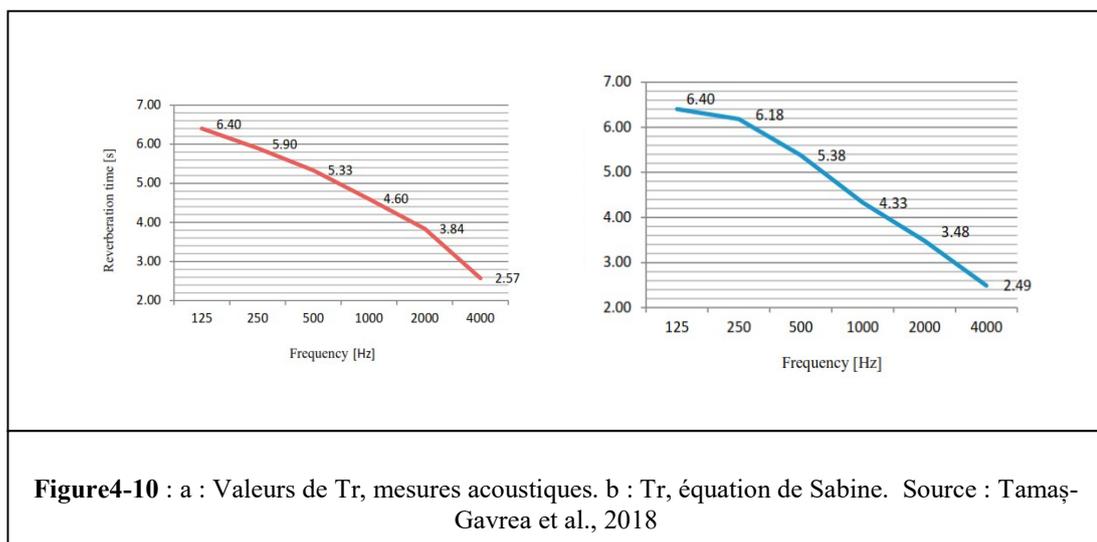
Figure 4-9 : Vue de la salle de conférence. Source: Gramez A et Boubenider F., (2017)

Des recherches similaires sur la base d'enquêtes expérimentales, ont été entreprises par Benmagsoula Zohra., (2017) sur la performance acoustique des salles de prière de deux mosquées (Ibn-el Arabi et Ennour) situées en Algérie (Constantine). Le but était d'identifier les problèmes acoustiques des deux salles pour améliorer leur qualité d'écoute. L'étude acoustique réalisée a révélé que le temps de réverbération est loin des valeurs optimales pour ce type d'équipement, Le T_{r500} Hz (plus approprié pour la parole) pour les deux mosquées « Ennour » et « Ibn-el-arabi » est respectivement de 2,9 s et 3,2s. Plusieurs traitements ont été proposés pour la correction acoustique des deux salles de prière :

- Utilisation d'un tapis LPAD une moquette avec une sous face en caoutchouc et le tapis PAD, également une moquette, mais avec une sous face en mousse de caoutchouc, ce qui en fait un matériau plus absorbant aux fréquences moyennes comparé au tapis LPAD. En effet, le tapis PAD associe la face textile à porosité ouverte (absorbant les fréquences élevées) et la mousse de caoutchouc qui est un matériau poreux épais pour l'absorption des fréquences moyennes.
- Utilisation d'un vitrage « wind glass » pour les fenêtres avec un coefficient d'absorption passant de 0.03500HZ pour le vitrage initial à 0.29.
- Remplacement de toutes les surfaces recouvertes de marbre par du plâtre, qui est un matériau plus absorbant aux fréquences moyennes propres à la parole.

Les simulations effectuées ont révélé que les solutions acoustiques proposées permettent d'obtenir des améliorations significatives du temps de réverbération dans la plage des moyennes et hautes fréquences.

L'étude de Tamaş-Gavrea D R et al., (2018), représentant les recherches les plus récentes dans le domaine de l'amélioration de la qualité des salles existantes, présente une étude acoustique d'une église située dans la municipalité de Cluj-Napoca, Roumanie. Le temps de réverbération, considéré comme le critère le plus important utilisé dans l'appréciation du champ acoustique, a été déterminé par deux méthodes : les mesures théoriques (équation de Sabine) (Fig4-10a) et acoustiques (Fig4-10b). Les résultats obtenus ont montré que le temps de réverbération de la salle est très loin des valeurs optimales.



Pour corriger le problème du temps de réverbération élevée, **des solutions de réhabilitation tenant compte de l'aménagement intérieur de la salle d'audition ont été proposées :**

- Des colonnes ont été plaquées sur 66,25 m² avec des panneaux de gypse à perforations hexagonales, avec une surface perforée de 17%.
- Sur les murs du rez-de-chaussée, ils ont appliqué des panneaux de contreplaqué avec finition mélaminée⁴, avec des perforations rondes de 1,94% sur une surface de 87,10 m², des panneaux de gypse avec 6% de perforations carrées sur une surface

⁴ Un mélaminé ou plus précisément un panneau surfacé mélaminé (PSM) est un panneau dérivé du bois fabriqué par application directe de papiers imprégnés de résine aminoplaste sur au moins une des faces du panneau support. L'adhérence et la réticulation ont lieu à chaud et sous pression sans l'utilisation de colle.

de 17,30 m² et des panneaux de plâtre avec 17% de perforations de forme hexagonale sur une surface de 17,3 m²(Fig.4 -11)

- Au rez-de-chaussée, entre les rangées de bancs, un tapis de 36,35 m² a été placé.
- Un plafond acoustique de 75,00 m² réalisé en plaques de plâtre, avec des perforations rondes de 12% de surface perforée, a été monté dans la zone des balcons.

Les solutions proposées pour la réhabilitation acoustique de la salle ont conduit à une réduction remarquable des valeurs de temps de réverbération dans les deux cas.

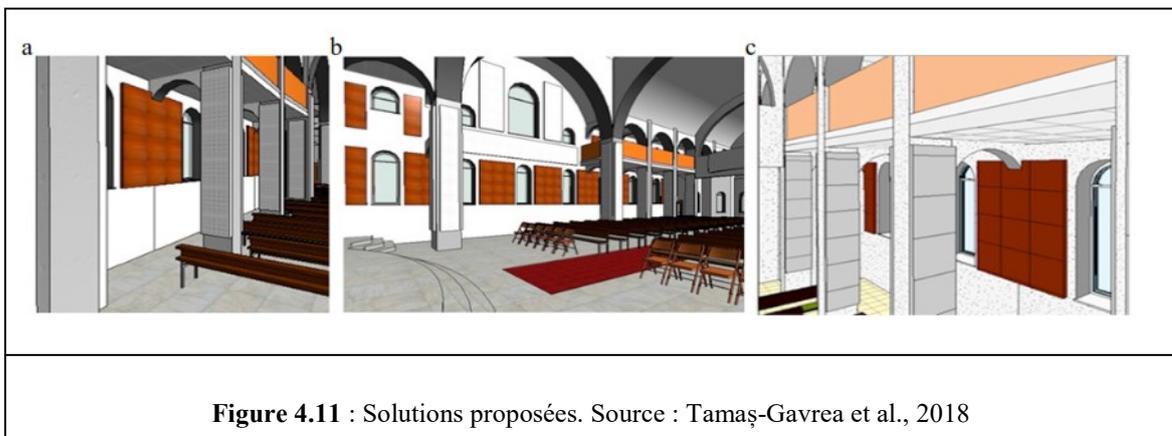


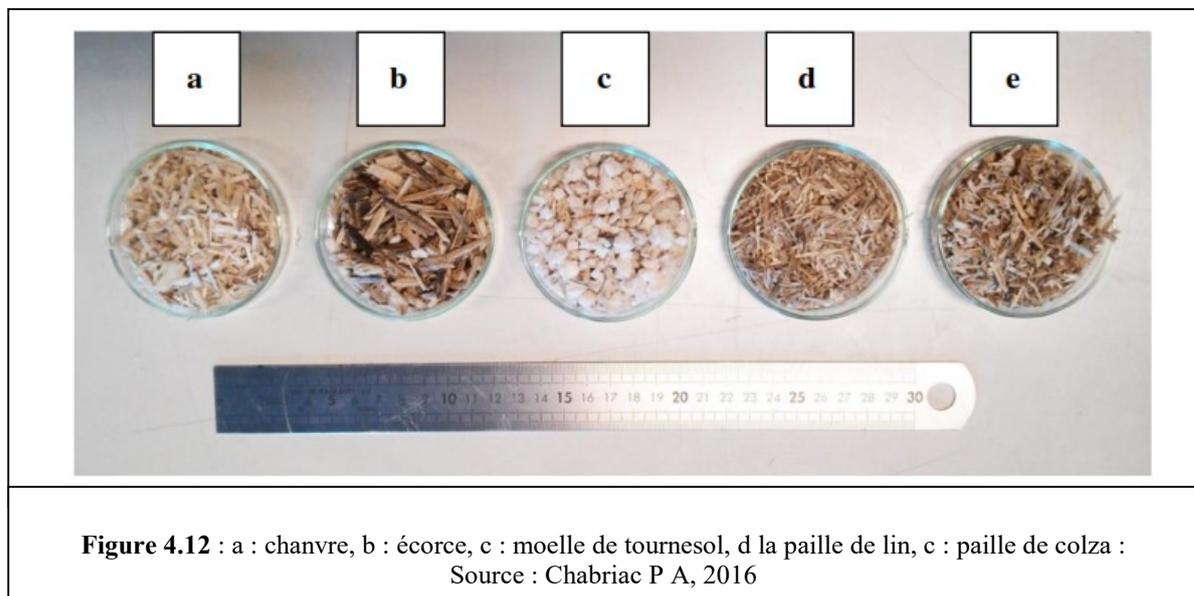
Figure 4.11 : Solutions proposées. Source : Tamaş-Gavrea et al., 2018

4.2.2. Matériaux durables pour réhabilitation

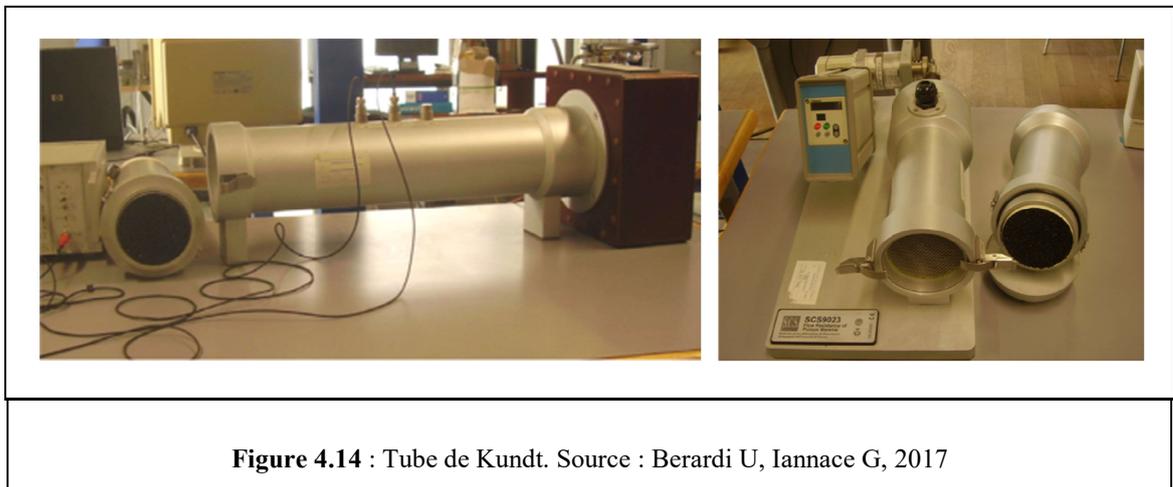
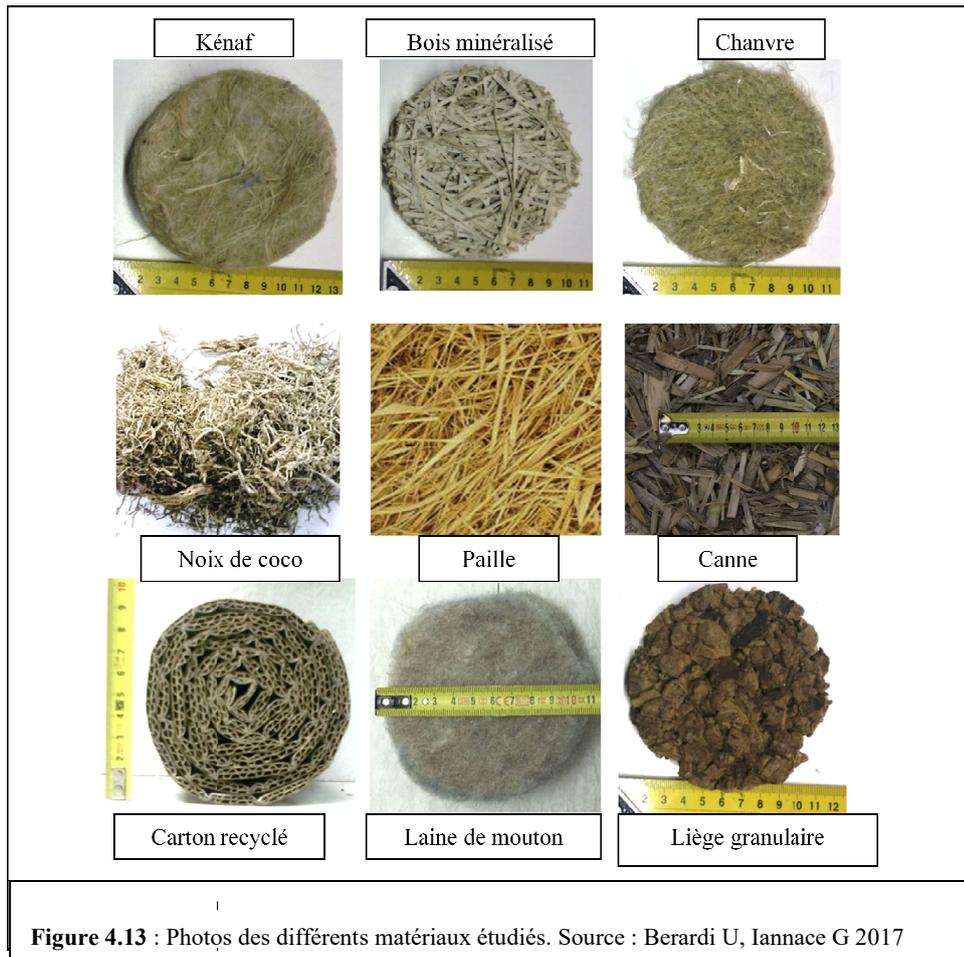
4.2.2.1. Matériaux poreux naturels.

Les matériaux naturels deviennent une option valable pour les traitements d'absorption acoustique ; en particulier les fibres naturelles qui ont reçu une attention croissante en raison de leurs bonnes propriétés d'isolation acoustique et thermique, l'absence d'effets nocifs sur la santé et la disponibilité en grande quantité, (Berardi U et Iannace G., 2015).

De nombreuses recherches ont été réalisées pour définir les propriétés acoustiques de **nouveaux matériaux poreux naturels**. Chabriac P A et al., (2016) ont défini les caractéristiques acoustiques de cinq particules végétales largement disponibles (chanvre, l'écorce, la moelle de tournesol, la paille de lin et la paille de colza) (Fig.4-12). Les résultats montrent que ces matériaux peuvent être utilisés pour l'absorption acoustique et que leurs coefficients d'absorption acoustique sont vraiment intéressants, (leur absorption, pour une épaisseur donnée, peut être équivalente à celles des absorbants acoustiques commercialisés typiques tels que la fibre de verre).



Berardi Umberto, Iannace Gino., (2017) ont défini quant à eux les propriétés acoustiques de neuf (09) matériaux de fibres naturelles (Fig4-13). Les mesures du coefficient d'absorption ont été effectuées à l'aide de la méthode du tube de Kundt (Fig.4-14) selon la norme ISO 10534-2.



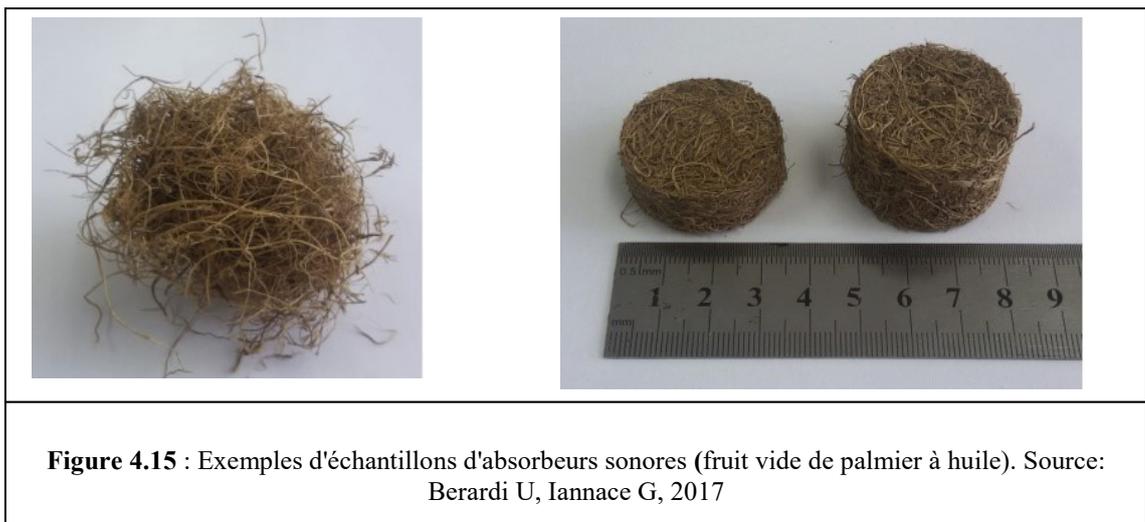
La recherche a permis de déterminer le coefficient α d'absorption de ces matériaux (Tableau 01) pour les inclure dans la modélisation avec des logiciels spécialisés et du cout les utiliser dans la construction.

Tableau 4.1 : Le coefficient d'absorption α des différents matériaux étudiés. Source : Berardi U, Iannace G, 2017

| Material | Density [kg/m ³] | Thickness [m] | Flow resistivity [Rayl/m] | Frequency [Hz] | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------------------------------|----------------------|---|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 |
| Kenaf | Light Dense | 0.06 0.04 0.06 | 2700 (\pm 290) 3500 (\pm 240) 3500 (\pm 240) | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.14 | 0.21 | 0.25 | 0.31 | 0.44 | 0.56 | 0.67 | 0.80 | 0.84 | 0.87 |
| | | | | 0.08 | 0.12 | 0.16 | 0.16 | 0.20 | 0.30 | 0.34 | 0.41 | 0.54 | 0.73 | 0.83 | 0.93 | 0.93 |
| | | | | 0.10 | 0.17 | 0.2 | 0.25 | 0.36 | 0.53 | 0.63 | 0.73 | 0.8 | 0.94 | 0.96 | 0.94 | 0.93 |
| Wood | Fibers Mineralized | 0.06 0.03 | 1600 (\pm 300) 1800 (\pm 450) | 0.20 | 0.26 | 0.29 | 0.31 | 0.57 | 0.75 | 0.79 | 0.86 | 0.75 | 0.64 | 0.71 | 0.91 | 0.91 |
| | | | | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.15 | 0.06 | 0.10 | 0.07 | 0.03 | 0.06 | 0.16 | 0.17 | 0.35 | 0.45 |
| Hemp | | 0.03 | 1400 (\pm 170) | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.11 | 0.16 | 0.18 | 0.21 | 0.32 | 0.40 | 0.47 | 0.61 | 0.67 | 0.75 |
| Coconut | | 0.05 0.10 | 1500 (\pm 200) 1500 (\pm 200) | 0.10 | 0.19 | 0.26 | 0.16 | 0.16 | 0.29 | 0.34 | 0.36 | 0.47 | 0.68 | 0.77 | 0.79 | 0.77 |
| | | | | 0.25 | 0.36 | 0.29 | 0.32 | 0.58 | 0.78 | 0.82 | 0.89 | 0.87 | 0.76 | 0.81 | 0.92 | 0.97 |
| Straw | | 0.10 | 410 (\pm 120) | 0.21 | 0.26 | 0.24 | 0.25 | 0.36 | 0.50 | 0.63 | 0.77 | 0.88 | 0.96 | 0.98 | 0.95 | 0.92 |
| Cane | Mixed Only wooden Only bark | 0.04 0.04 0.04 | 850 (\pm 130) 1000 (\pm 125) 800 (\pm 40) | 0.05 | 0.10 | 0.12 | 0.15 | 0.09 | 0.17 | 0.22 | 0.22 | 0.27 | 0.49 | 0.63 | 0.59 | 0.57 |
| | | | | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 0.10 | 0.14 | 0.25 | 0.49 | 0.64 | 0.48 | 0.42 |
| | | | | 0.10 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.12 | 0.22 | 0.28 | 0.30 | 0.45 | 0.72 | 0.75 | 0.60 | 0.62 |
| Cardboard | | 0.115 | 250 (\pm 50) | 0.10 | 0.13 | 0.19 | 0.19 | 0.39 | 0.53 | 0.47 | 0.45 | 0.56 | 0.50 | 0.55 | 0.61 | 0.75 |
| Sheep wool | | 0.04 | 2100 (\pm 150) | 0.10 | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 0.17 | 0.26 | 0.33 | 0.43 | 0.55 | 0.71 | 0.85 | 0.93 | 0.95 |
| Cork | | 0.03 | 1000 (\pm 150) | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.07 | 0.14 | 0.21 | 0.50 | 0.91 | 0.78 |

Remarque : Januševicius T et al. (2016) ont déjà entrepris une recherche sur la performance acoustique de la paille, et ils ont déduit que la paille pressée convient parfaitement à l'isolation acoustique aux basses fréquences. L'indice d'isolation acoustique R, d'un échantillon de 200 mm d'épaisseur à la fréquence de 125 Hz atteint 70 dB.

Or H K et al., (2017) ont étudié de la même méthode (tube de Kundt) les performances d'absorption acoustique du **fruit vide de palmier à huile** (Fig.4-15), les résultats de la recherche ont montré que le coefficient d'absorption de ce matériau peut atteindre jusqu'à 0,9 en moyenne au-dessus de 1 kHz.



Dans le même contexte Taban E et al., (2019) ont confirmé les résultats de la recherche précédente. Ces résultats révèlent que, pour une densité de 100 kg / m³, le coefficient

d'absorption est compris entre 0,6 et 0,8 au dessus de 1,5 kHz pour les échantillons d'épaisseur de 20 mm et 30 mm. Pour l'épaisseur de 40 mm, les valeurs ont même atteint la valeur de 0,9 (Fig.4-16).



Figure 4.16 : Préparation d'échantillons des fibres naturelles issues du palmier dattier vide. Source: Taban E et al., 2019

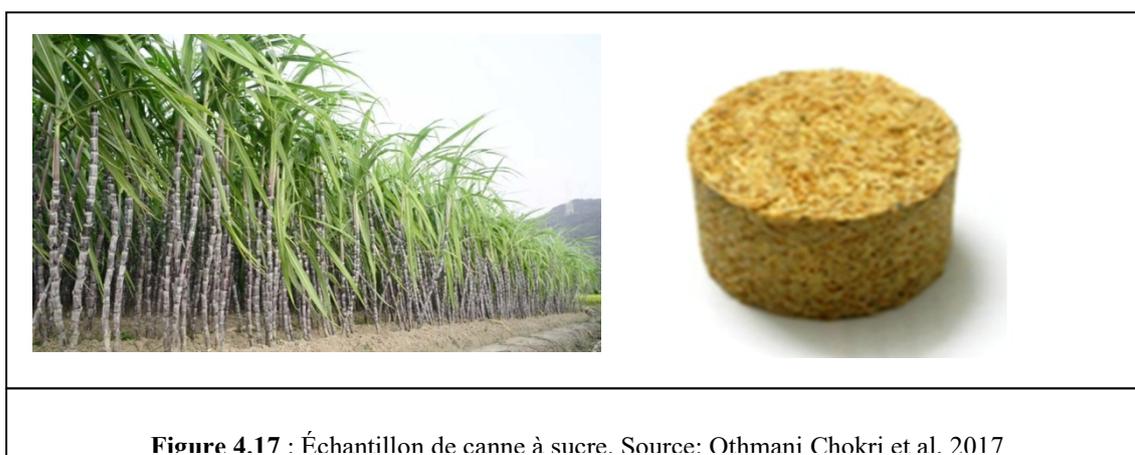
4.2.2.2. Matériaux recyclés

L'augmentation continue de la consommation d'énergie et la pollution de l'environnement sont parmi les principaux défis du 21ème siècle. L'une des solutions pour relever ces défis consiste à utiliser davantage de matériaux recyclés et à adopter des méthodes de fabrication respectueuses de l'environnement à partir de textiles recyclés. Ceci pourrait jouer un rôle important dans les économies d'énergie et la réduction de la pollution de l'environnement. Les textiles contribuent dans une large mesure au flux de déchets, car la plupart de ces précieux produits à base de fibres sont jetés après utilisation. Ces textiles mis au rebut mais précieux peuvent être recyclés pour produire plusieurs produits, notamment des isolants thermiques et acoustiques.

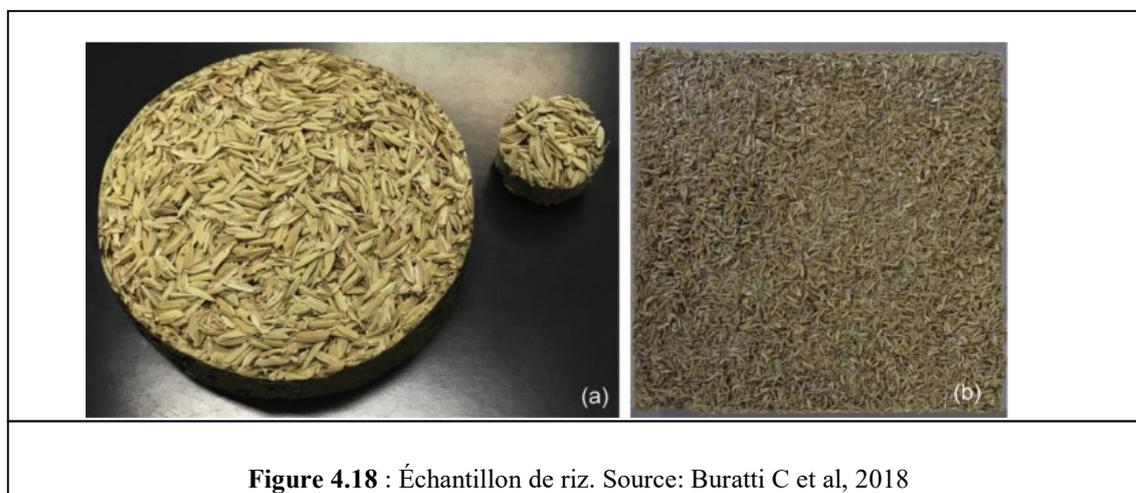
Buratti C et al. (2016) ont étudié trois types de panneaux insonorisant recyclés: ils sont composés de déchets de papier, de textile et de laine. Différents échantillons ont été produits et testés au moyen d'un tube d'impédance, selon ISO 10534-2. Afin de présenter les avantages environnementaux, une analyse du cycle de vie a été réalisée en termes d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre primaires. La meilleure performance a été obtenue pour le type de matériau en déchets de laine et les vieux

papiers; sa performance acoustique est comparable à celle du polystyrène extrudé classique, avec un impact environnemental considérablement réduit.

Othmani C et al. (2017) ont défini les performances acoustiques d'un nouveau matériau absorbant composé de déchets de canne à sucre (Fig.4-17), sachant qu'en Égypte en raison des grandes quantités cumulées de la production de sucre ou de l'extraction du jus de canne à sucre, les fumées générées par la combustion des déchets comme solution causent un grand problème environnemental. Les résultats obtenus ont prouvé la bonne propriété d'absorption du matériau étudié, le coefficient d'absorption peut atteindre 0.8 pour une fréquence de 1000 Hz.



ont réalisé une étude expérimentale sur des panneaux de déchets recyclés à base de riz (Matériau non conventionnel jamais utilisé pour l'industrie de la construction). Obtenue par collage et pressage de la matière première (Fig.4-18), (Le riz est le troisième produit le plus produit au monde après la canne à sucre et le maïs), les résultats ont montré que l'utilisation de ce matériau recyclé est une solution intéressante pour l'absorption acoustique et thermique, grâce à un bon comportement aux moyennes et hautes fréquences



Echeverria C A et al. (2019) ont également travaillé sur des matériaux recyclés. L'absorption acoustique a été étudiée dans une série de 21 prototypes de composites renforcés à fibres hybrides isotropes, utilisant la méthode du tube à impédance. Les mélanges composites ont été conçus pour récupérer des matériaux polymères naturels et synthétiques hautement disponibles : polymères, thermoplastiques, lignocellulose⁵, kératine, alginate, issus de sources de déchets post-consommation et en fin de vie (Fig.4-19). Les résultats expérimentaux ont indiqué un faible coefficient d'absorption aux moyennes fréquences (500 Hz – 2,5 kHz) et un coefficient d'absorption supérieur (2,5–6,4 kHz) aux plages de fréquences supérieures. Des valeurs d'absorption acoustique maximales de $\pm 0,78$ ont été obtenues avec les prototypes à faible densité.



Figure 4.19: Matelas, meubles et déchets de tapis utilisés pour la préparation d'échantillons. Source: Echeverria Claudia A et al. (2019)

4.2.2.3. Panneaux perforés

Il a été constaté, dans le chapitre I, que les matériaux poreux nus absorbent fortement les fréquences élevées et faiblement les fréquences basses alors que les membranes, au contraire, absorbent fortement les fréquences basses et faiblement les fréquences élevées. Or dans la pratique on est souvent obligé d'affaiblir plus efficacement les fréquences basses sans diminuer sensiblement l'absorption fréquences élevées.

Dans cette visée les chercheurs en acoustique ont proposé des éléments qui se composent de matériaux poreux protégés par des panneaux perforés. Dans ces éléments les matériaux poreux **protégés** absorbent fortement les fréquences élevées et les panneaux perforés protecteurs agissent comme des membranes vibrantes, absorbant fortement les fréquences

⁵ La **lignocellulose** est composée de lignine, d'hémicellulose et de cellulose en proportions variables. Elle est très présente dans la paroi des cellules des végétaux, du bois et de la paille. Ses molécules s'organisent en polymères et ont une structure fibrillaire.

basses. Comme résultats on a des éléments qui absorbent fortement aussi bien les fréquences élevées que les fréquences basses.

Du point de vue de l'absorption des ondes sonores, les éléments composés de matériaux protégés par des panneaux perforés sont classés entre les matériaux poreux et les membranes. **Et du point de vue constitution ces éléments (panneaux perforés) protègent les matériaux poreux généralement fragiles surtout par rapport au feu.**

De nombreuses études sur les effets d'une plaque perforée ont été réalisées. Leppington Francis Godfrey., (1989) a montré l'efficacité d'un panneau sandwich perforé. À son tour Abrahams I David., (1999) a étudié théoriquement l'effet d'atténuation d'un panneau sandwich perforé excité par une source linéaire du point de vue du rayonnement acoustique.

Takahashi D, Tanaka M. (2002) ont suggéré le traitement théorique d'un panneau perforé et de matériaux absorbants, dans lequel les vibrations de flexion de la plaque sont prises en compte.

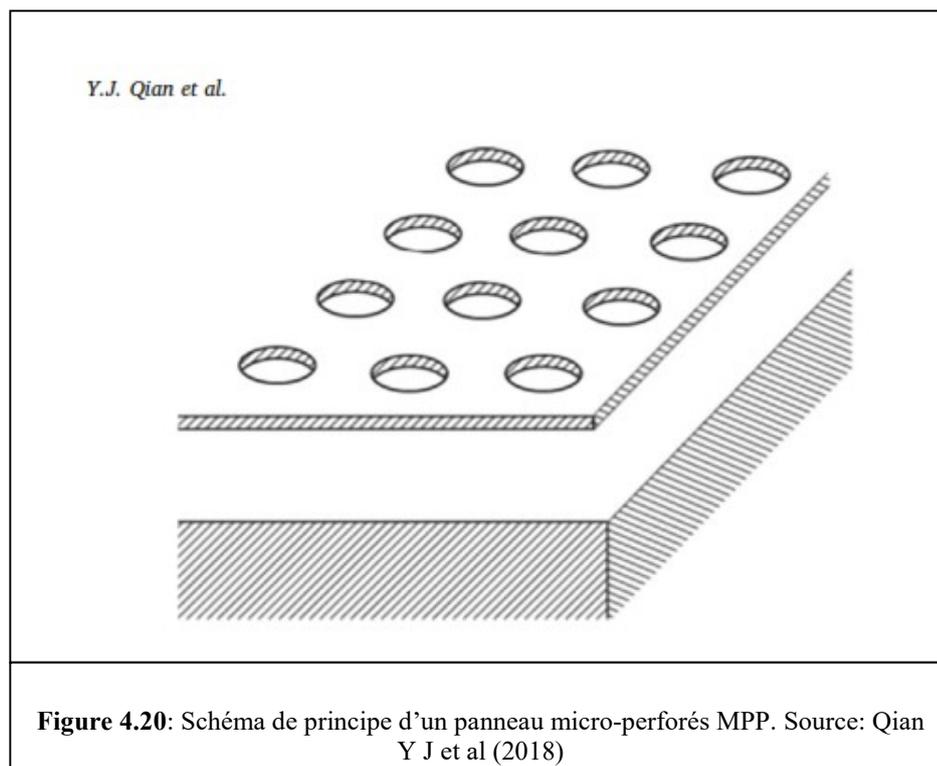
L'étude faite par Maa Dah-You., (1998) a été la première à proposer des absorbeurs **de panneaux micro-perforés** dotés d'orifices submillimétriques. Ils sont généralement utilisés avec une cavité de remplissage remplie d'air et une paroi arrière rigide. Pour créer un système insonorisant constitué uniquement de panneaux micro-perforés. Sakagami et al., (2004) ont proposé un absorbeur de panneaux micro-perforés à deux feuilles, il se compose de deux panneaux micro-perforés mis en parallèle sans support rigide.

Toyoda M, Takahashi D., (2008) ont réalisé une analyse théorique détaillée d'une surface vibrante supposée présenter des caractéristiques d'absorption. Ils ont également suggéré une méthode permettant d'atténuer les sons émis par une surface vibrante de piston recouverte d'un revêtement absorbant. Théoriquement et expérimentalement, il a été démontré qu'un **panneau perforé** accordé peut réduire la puissance acoustique rayonnée à des fréquences arbitraires.

Les performances acoustiques d'un panneau micro-perforé avec une cavité incomplètement divisée ont été étudié par Huang S et al.,(2017). L'échantillon est obtenu en insérant des séparateurs, plus courts que la profondeur de la cavité, périodiquement derrière le panneau micro-perforé. Grâce à ces séparateurs, le champ sonore dans la cavité est

considérablement modifié. Les expériences ont vérifié les prédictions théoriques. Les résultats indiquent que l'insertion convenablement organisée améliore les performances d'un absorbeur panneau micro-perforé efficacement aux basses fréquences.

Les absorbants en panneaux micro-perforés (MPP Micro-perforated panel) sont simples à construire, peuvent être utilisés dans diverses applications, présentent des bonnes propriétés d'absorption et permettent une prédiction et une conception relativement précises dans des conditions linéaires. Cependant, lorsque l'intensité sonore est élevée, le niveau de pression acoustique (SPL) sous lequel le MPP est efficace est limité en raison de l'effet non linéaire. Pour résoudre ce problème, Qian Y J et al., (2018) ont étudié la suppression de l'effet non linéaire au moyen de paramètres de conception. Dans ce cas, la réponse linéaire d'un MPP (Fig.4-20) avec SPL croissant est améliorée; ainsi, les avantages des MPP dans des conditions linéaires peuvent être atteints. Premièrement, le concept de SPL de transition est proposé pour quantifier l'effet de la suppression. Ensuite, les règles contrôlant l'influence des paramètres sur la SPL de transition sont étudiées via une étude de paramètres. Enfin, la validité des résultats est confirmée par des données expérimentales. Les résultats obtenus peuvent servir de guide pour la conception d'absorbants MPP pour les applications à haut niveau de pression acoustique.



Récemment une étude de Hoshi K et al.,(2020) a été faite sur les performances d'absorption des panneaux micro perforé (MPP) en nid d'abeilles (Fig.4-21), nécessaires pour améliorer l'acoustique d'une petite salle de réunion existante de 91 m³ (Fig.4-22) où le temps de réverbération est de deux secondes, de 250 Hz à 2 kHz

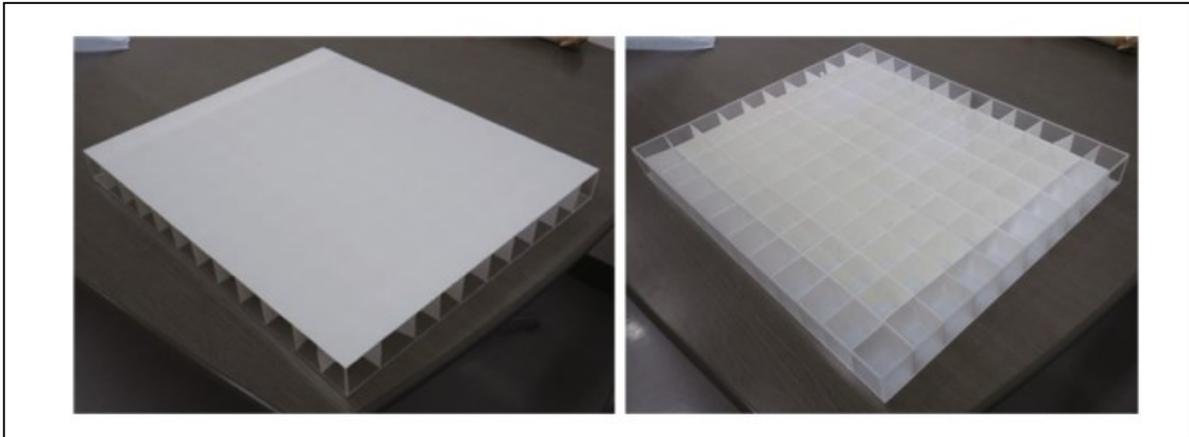


Figure 4.21: Exemple d'absorbeur en MPP fabriqué avec un nid d'abeilles. Gauche: vue en avant. Droite: vue en arrière. Source: Hoshi K et al. (2020)



Fig. 1. Experimental meeting room. Left: view from entrance to window. Right: view from window to entrance.

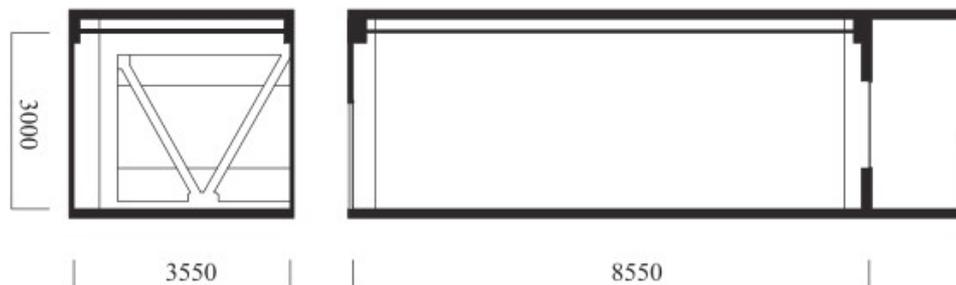


Figure 4.22 : vue et plan de la salle de réunion étudiée. Source: Hoshi K et al. (2020)

Les chercheurs ont mis en œuvre l'absorbeur MPP comme accessoire supplémentaire pouvant être suspendu aux murs et aux plafonds (Fig.4-23).

A moins de 1,5 s sur toutes les fréquences, la zone d'absorption équivalente doublait, les valeurs du temps de décroissance précoce étaient également réduites de 2,7 s à 1,0 s à 1kHz, et la valeur de l'indice de transmission de la parole (STI) est passée de 0,55 à 0,67. Au départ, les caractéristiques d'absorption de MPP ont été conçues pour réduire les temps de réverbération à la fréquence moyenne en utilisant une théorie équivalente électroacoustique. Par la suite, une simulation par la méthode des éléments finis basée sur les ondes a été utilisée pour déterminer l'emplacement de l'absorbeur. Les coefficients d'absorption de MPP à nid d'abeilles ont également été mesurés dans une chambre de réverbération de forme irrégulière. Enfin, l'effet des absorbeurs MPP installés a été vérifié par des mesures de paramètres acoustiques. En conséquence, le temps de réverbération était réduit.



Figure 4.23: Installation et disposition d'absorbeurs MPP à nid d'abeille. Source: Hoshi K et al. (2019)

4.2.3. Réflecteurs et leurs rôles dans la correction acoustique des salles

La réflexion des surfaces dans une pièce est réputée avoir une grande importance pour la qualité acoustique de la pièce. Pour y faire face de manière scientifique, il est nécessaire de définir des concepts pour caractériser la diffusion et d'effectuer les mesures correspondantes sur les matériaux réflecteurs du son.

Ces dernières années, plusieurs coefficients pour mesurer le degré de diffusion d'une surface ont été développés, pour répondre aux besoins des fabricants de diffuseurs, des concepteurs de salles et des modélisateurs géométriques d'acoustique des salles. Les coefficients donnent une mesure dépendante de la fréquence et analogue au coefficient d'absorption. Deux de ces coefficients sont sur le point d'être inscrits dans les normes

internationales. Cependant, très peu de publications ont été publiées, comparant directement les coefficients, ce qui rend leur mérite relatif difficile à évaluer.

Rindel Jens Holger., 2001 a précisé qu'avec les caractéristiques d'absorption acoustique, la diffusion acoustique à partir de surfaces est très importante dans tous les aspects de l'acoustique d'une pièce, exemple dans les salles de concert, les studios de son, les salles industrielles et les salles de réverbération. Sabine le savait intuitivement il y a plus de cent ans, déjà lorsqu'il avait participé à la conception du Boston Symphony Hall. La diffusion du son peut être obtenue par des éléments isolés tels que des colonnes, des statues, etc., ou par des surfaces à la structure suffisamment grossière, telles que des diffuseurs, ou par des effets de diffraction sur les bords des panneaux.

Yan Lei, Chena Yi., 2012 ont élaboré une recherche sur les panneaux réflecteurs de haute précision avec une construction de type sandwich composée d'une plaque de revêtement et d'une structure de support en aluminium combinée à un adhésif structural, avec des modules de haute précision comme condition fondamentale. Le skin-plate convient bien au module en raison de sa souplesse. L'adhésif structural, avec une bonne fluidité, compense automatiquement les écarts entre la peau-plaque et la structure de sauvegarde. À la fin, des panneaux de type sandwich de forme individuelle assemblent les réflecteurs à haute précision de surface (Fig.4-24). L'analyse des contraintes internes de la pellicule et de l'adhésif structural revêt une importance capitale. Par conséquent, plusieurs types de plaques de revêtement et d'adhésifs structuraux ayant différentes propriétés matérielles sont répertoriés et simulés avec la méthode des éléments finis (ANSYS). Sur la base des résultats de la simulation, les paramètres de traitement pour la fabrication du panneau sont déterminés de manière plus efficace et plus précise.

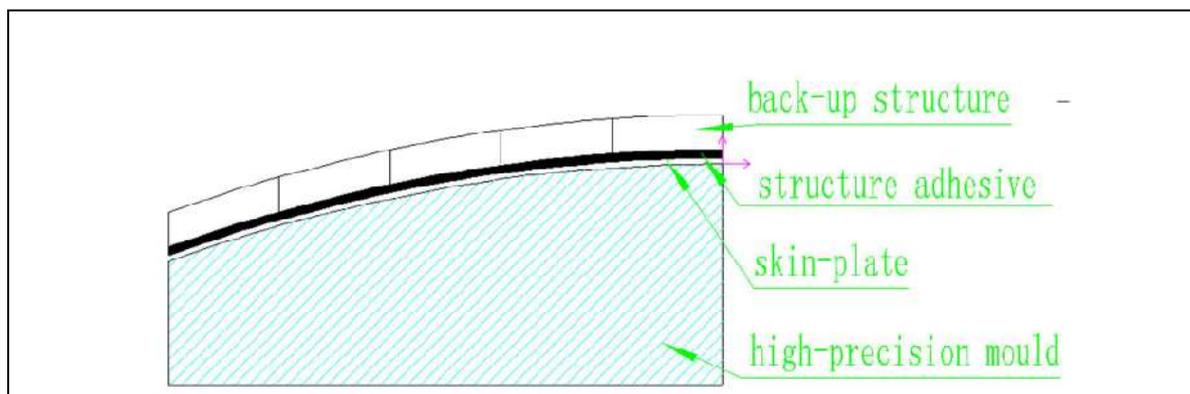
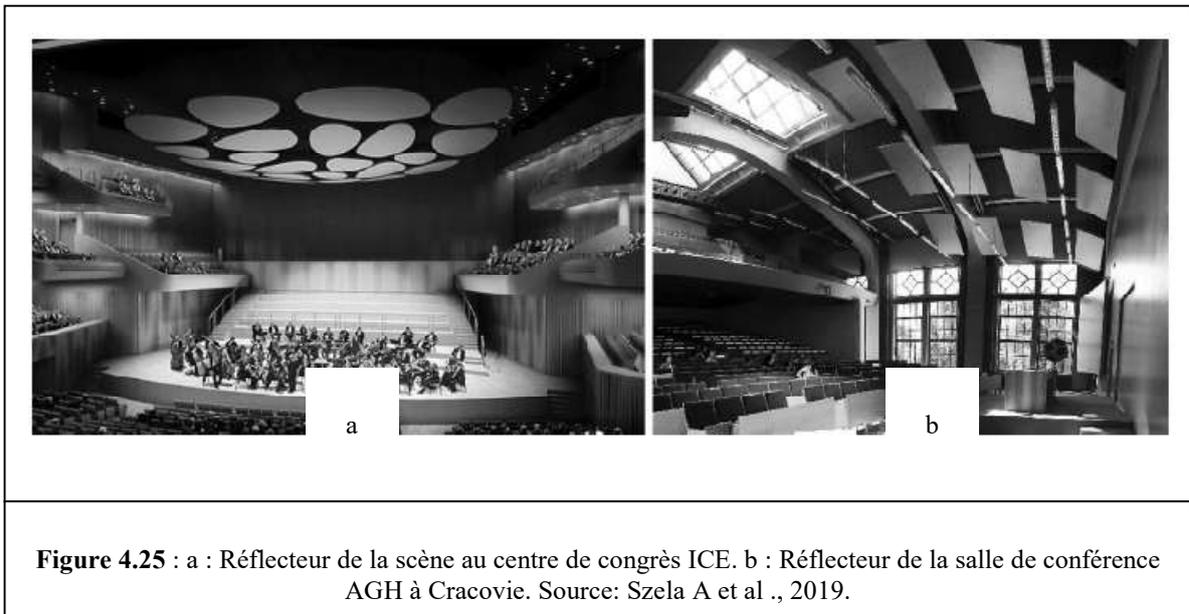


Figure 4.24: Schéma de la technologie de mise en forme du panneau réflecteur de haute précision. Source: Yan Lei, Chena Yi. (2012)

Les réflecteurs suspendus sont couramment utilisés dans les salles où les propriétés acoustiques sont une priorité, en particulier dans les salles de concert et d'audition (Fig.4-25). En tant qu'élément d'un traitement acoustique bien conçu, les auvents de la scène surélevés dirigent les premières réflexions sonores vers le public, assurant ainsi une répartition spatiale égale des réflexions sonores. Cela se reflète dans les valeurs des paramètres acoustiques, telles que le temps de réverbération, la puissance acoustique G et le support de scène ST. Ils améliorent également la communication entre les musiciens sur la scène et jouent un rôle dans l'élimination des défauts acoustiques causés, par exemple, par des murs parallèles, des plafonds trop hauts et des criques. Un auvent surélevé bien conçu doit permettre d'obtenir des réflexions sonores dans la plage de fréquences d'au moins 250 Hz à 4 kHz (ISO 3382).



L'élargissement de la plage de fréquence effective d'un auvent dans ses limites inférieure et supérieure nécessite des approches opposées en ce qui concerne la taille des panneaux appliqués. Une grande taille de panneaux garantit que le baldaquin fonctionne efficacement dans les bandes de fréquences inférieures. Dans les bandes de haute fréquence, l'efficacité de la couverture est assurée par la réflexion du son diffusé par les panneaux, qui est généralement obtenue avec des éléments de petite taille ou des modifications différentes des formes des panneaux.

Dans ce contexte Szela A et al., 2019 proposent une idée pour les panneaux réfléchissants ; censés augmenter la fréquence limite supérieure de la canopée tout en maintenant la fréquence limite inférieure inchangée. Ceci est réalisé grâce à l'application de diffuseurs Schroeder sur les bords des panneaux plats. Une large zone de réflexion est maintenue, garantissant que les panneaux fonctionnent efficacement dans les bandes de fréquences inférieures. Aux fréquences plus élevées, la réponse en fréquence des panneaux est influencée par la réflexion du son diffusé provenant des diffuseurs. Par conséquent, on s'attend à ce que l'auvent fonctionne sur une plage de fréquences plus large en fonction des propriétés des diffuseurs. La modification proposée d'un panel est présentée avec la vérification de son efficacité, qui comprend des simulations numériques, une modélisation mathématique et des mesures.

L'auvent en panneaux avec diffuseurs Schroeder a été comparé à un auvent en panneaux plats et à un auvent en panneaux à bords incurvés (Fig.4-26) (Fig.4-27). Les résultats confirment que la solution proposée dans cette recherche est la plus efficace.

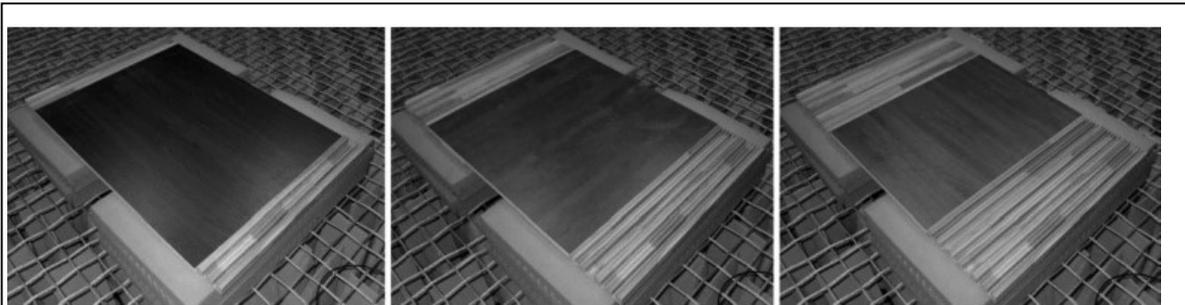


Figure 4.26 : Panneaux réfléchissants avec diffuseurs Schroeder utilisés pour l'expérience; la largeur des diffuseurs est de 10 cm, 20 cm et 30 cm, de gauche à droite. Source: Szela A et al ., 2019.



Figure 4.27 : Panneaux à bords courbes utilisés pour l'expérience; les rayons des courbures sont de 10 cm, 20 cm et 30 cm, de gauche à droite. Source: Szela A et al ., 2019.

4.3. Logiciels au service de la réhabilitation acoustique

Les simulateurs informatiques d'espaces sonores sont des outils très efficaces lorsqu'il s'agit de prédire le comportement d'une salle à des événements acoustiques. En effet, la modélisation par ordinateur permet d'évaluer à l'avance, critères subjectifs et critères objectifs et, dans l'idéal, d'affranchir l'acousticien de tests « grandeur nature » difficilement réalisables. La modélisation nous permis aussi de trouver les solutions les plus adéquates a des problèmes acoustiques dans les cas des équipements déjà existants avant de les appliquer en réalité. Parmi les logiciels les plus utilisés dans le domaine de l'acoustique et de réhabilitation acoustique nous citons à titre d'exemple :

4.3.1. CATT

CATT Acoustique (Computer Aided Theatre Technique) est un logiciel de simulation acoustique. Il rend possible la modélisation des salles (a projeter ou existante), des sources acoustiques et électro-acoustiques et offre la possibilité de calculer de nombreux paramètres utilisés en acoustique des salles. L'une des caractéristiques intéressantes proposée par cet outil est de pouvoir simuler l'écoute d'une source ou d'un système de sources à différents points d'observations de la salle, permettant ainsi à l'utilisateur d'avoir un aperçu sonore de l'étude menée.

CATT offre deux types importants de prédictions basés sur les techniques de l'acoustique géométrique.

- Le mapping⁶ de différents paramètres acoustiques grâce à un précède de traces de rayons acoustiques.
- Calculs détaillés: Les prédictions données par ce module de calcul utilisent un procédé appelé RTC (Randomized Tail-corrected Cone-tracing) combinant à la fois les caractéristiques du tracé de cônes et de rayons ainsi que le modèle des sources images. Billon A et al., (2015) Cette méthode de simulation numérique permet la création de réponses impulsionnelles.

⁶ Mapping : cartographie de différentes grandeurs physiques sur l'ensemble de l'auditoire.

4.3.2. ODEON

Le programme d'acoustique des salles ODEON se veut une base de recherche sur l'acoustique des salles objective et subjective, ainsi qu'un outil utile pour les consultants. Le programme utilise une méthode hybride, dans laquelle un lancer de rayons initial est effectué pour déterminer les séquences de réflexion potentielles Naylor G. M., (1993).

ODEON est un logiciel de modélisation fiable et facile à utiliser permettant de simuler l'acoustique de pièces fermées, d'espaces ouverts, de bâtiments et d'espaces extérieurs. C'est un outil éprouvé pour prédire l'acoustique de nouveaux bâtiments et pour évaluer et recommander des améliorations aux bâtiments existants. L'acoustique est calculée en fonction de la géométrie et des propriétés de la surface d'une pièce. Les graphiques, les tracés 3D et les animations 3D facilitent l'interprétation, l'exploration et la présentation des résultats. En utilisant l'audio-synthèse.

ODEON est ainsi idéal pour la prédiction de l'acoustique dans les salles de concert, les salles d'opéra, les auditoriums, les foyers, les stations de métro, les terminaux aéroportuaires et les salles de travail industrielles, ainsi que dans les bureaux, les salles de conférence, les espaces en plein air, les patios et les atriums. Dans les grandes salles et les espaces ouverts, des systèmes de sonorisation peuvent être nécessaires pour soutenir l'acoustique. ODEON fournit les outils pour simuler de tels systèmes. Pour la prévision des niveaux de bruit provenant de grosses machines, un algorithme spécial de traçage de rayons a été développé pour permettre la modélisation de sources de surface et de lignes. Passero C et Zannin P., (2010).

4.3.3. Olive Tree Lab Suite

OTL Suite est une suite d'applications logicielles acoustiques 3D intégrées dans un environnement de travail. Il s'agit de la toute première application logicielle acoustique offrant une telle souplesse dans les calculs effectués dans divers domaines de l'acoustique, y compris les conditions météorologiques non homogènes, dans le même environnement.

Ces applications sont: l'acoustique des salles, les bureaux à aire ouverte, la propagation du son en extérieur, le constructeur de structures multicouches et la distribution et la diffusion du son par traceur polaire (<https://www.mediterraneanacoustics.com/olive-tree-lab-suite.html>).

Conclusion :

Dans le chapitre que nous venons de développer, nous avons essayé d'expliquer la notion de réhabilitation acoustique d'une manière approfondie, tout en présentant de nombreuses recherches sur la réhabilitation des salles de parole.

Les expériences réalisées dans un contexte culturel, religieux ou d'enseignement ont permis de montrer la spécificité et l'importance du confort acoustique des salles de parole.

Toutes les études de réhabilitations acoustiques que nous avons présentées dans ce chapitre, passent d'abord par la détection des problèmes de la qualité acoustique à travers des mesures expérimentales ou des simulations informatique.

L'amélioration de la qualité acoustique des salles de parole apparaît à la lumière de cette étude comme l'aboutissement d'une multitude d'actions, et ce à plusieurs niveaux :

- Remplacement des revêtements muraux et/ou plafond par des matériaux absorbants afin d'atteindre le temps de réverbération optimale, ainsi que les autres indices d'évaluation qualitative des salles de parole (D50, C80, STI, G).

- Changement de la forme géométrique des salles, en intégrant des réflecteurs qui améliorent la propagation du son dans la salle.

- Utilisation des matériaux naturels qui sont devenus une option valable pour les traitements d'absorption acoustique. En particulier les fibres naturelles (chanvre, l'écorce, la moelle de tournesol, la paille etc...), les matériaux recyclés qui ont reçu une attention croissante en raison de leurs bonnes propriétés d'isolation acoustique et thermique, l'absence d'effets nocifs sur la santé humaine et la disponibilité en grande quantité.

**CHAPITRE V : INVESTIGATION
PAR SIMULATION ET MESURES
IN-SITU.**

Introduction

Nous nous intéressons dans ce chapitre, à travers une enquête expérimentale, à l'étude de la performance acoustique de deux salles de conférences, la salle de conférence du palais culturel Malek Haddad, et celle de la maison de culture El Khalifa, L'objectif étant de caractériser la répartition de l'énergie sonore et la qualité acoustique, avant et après leurs réhabilitation à l'aide des mesures in-situ et une simulation acoustique.

L'évaluation de la performance acoustique des deux salles de conférences se base essentiellement sur l'évaluation des différents critères de la qualité acoustique présentés et expliqués dans le chapitre II, il s'agit du temps de réverbération TR, La clarté sonore (C80), Force sonore G, Indice D50 (Deutlichkeit), STI : indice de transmission de la parole.

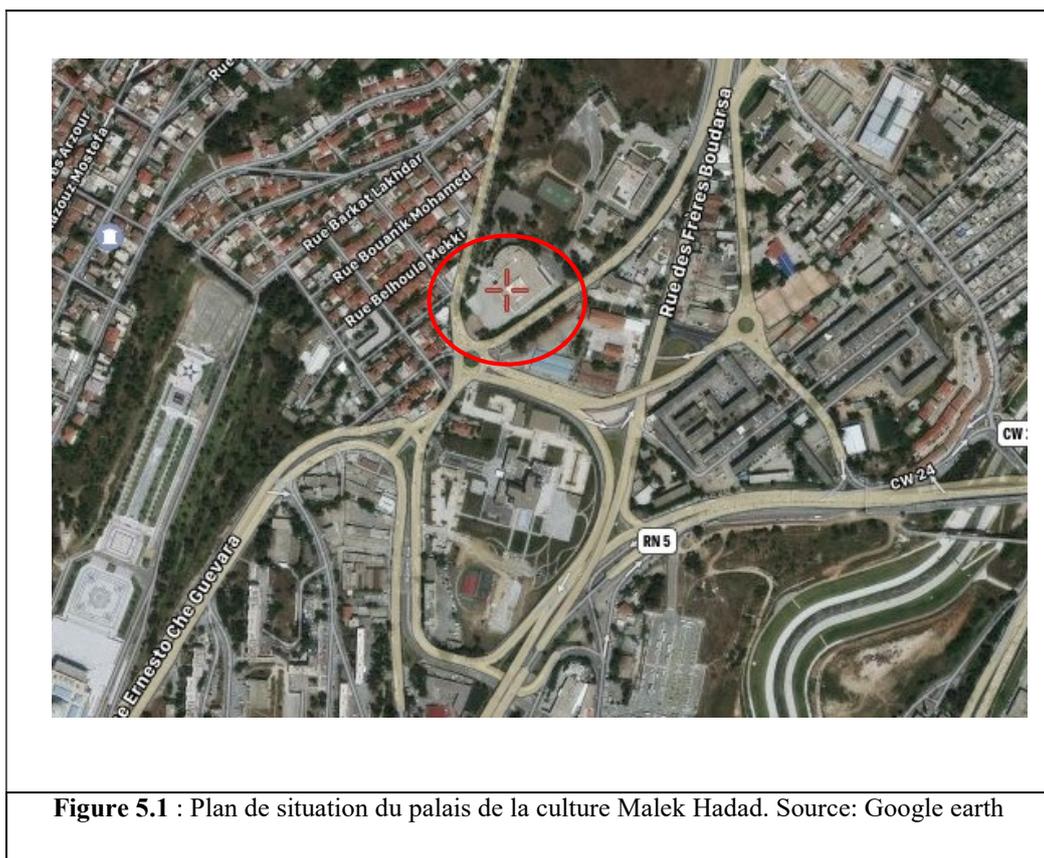
En outre nous allons présenter à travers ce chapitre une étude critique de la réhabilitation acoustique des deux salles de conférences pour démontrer l'impact de cette dernière sur la qualité acoustique des deux salles.

5.1. Présentations des deux cas d'études

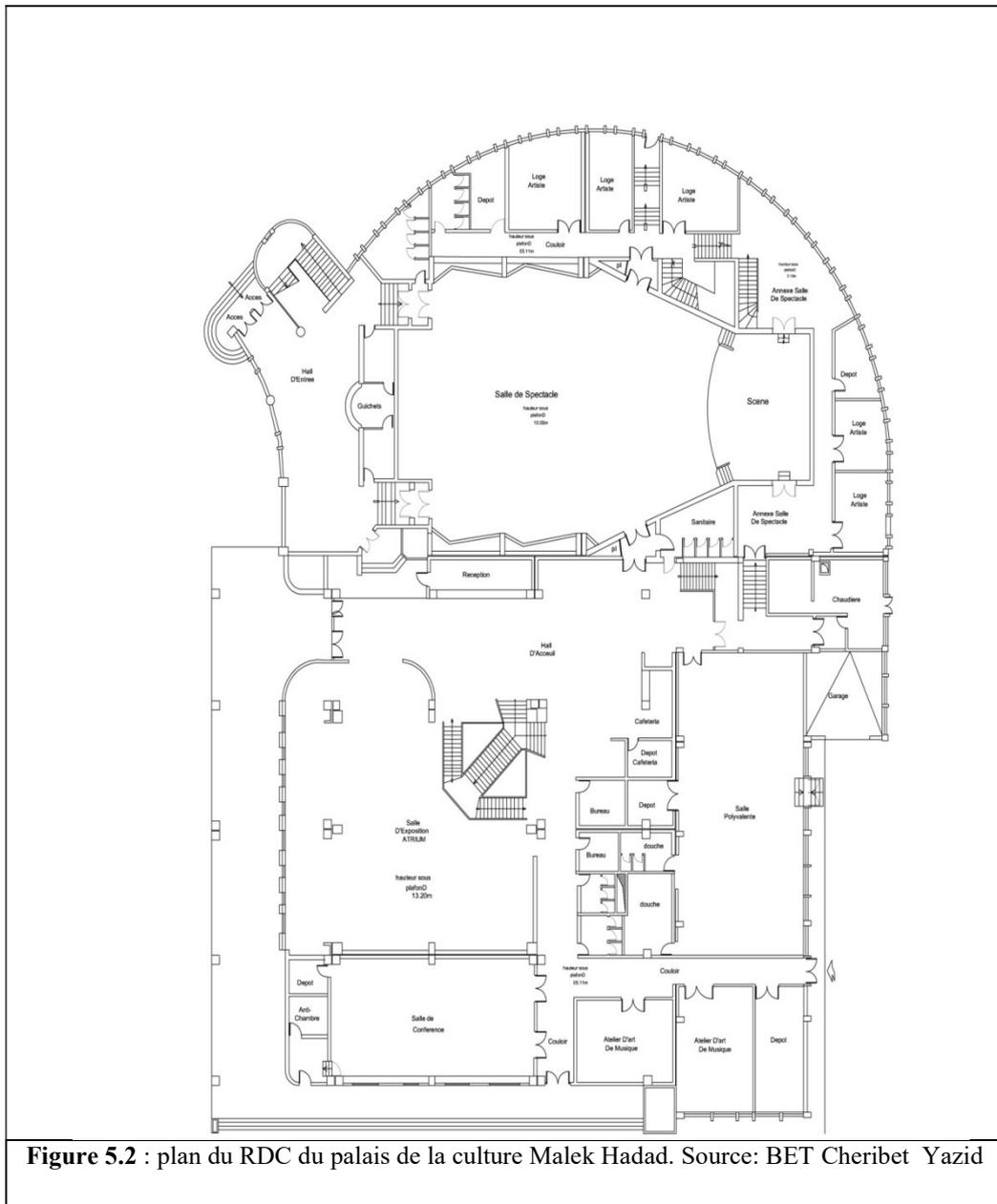
5.1.1. Palais de la culture Malek Hadad

Le palais de la culture Malek Hadad est considéré comme l'un des plus importants équipements culturels à Constantine. Il est situé à la cité urbaine des combattants au sud du centre-ville de Constantine (Fig5.1). Il a été conçu par le bureau d'étude de la wilaya de Constantine (SAU), et inauguré le 16 avril. Il a été l'objet d'une opération de réhabilitation en 2014 par le bureau d'étude Cheribet Yazid en collaboration avec l'architecte espagnole Marc Vidal¹.

Il est composé de plusieurs ateliers (informatique, art plastique, musique, théâtre, etc...), de deux salles de conférence et d'un immense hall d'exposition où se déroulent la totalité des manifestations culturelles et scientifiques de la ville de Constantine. (Fig5.2).



¹ Information données par le bureau d'étude Cheribet Yazid



5.1.1.1. Description architecturale de la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad

La salle de conférence du palais de la culture Malek Haddad est en forme d'éventail (Fig5.3). Elle se compose de trois parties; scène, salle et balcon (Fig5.4). La superficie totale des trois parties est de 658,7m². Le volume total de la salle (y compris la scène et le volume au-dessus du plafond suspendu) est d'environ 5478m³. La capacité totale de la salle est d'environ 580 spectateurs répartis entre le sol (environ 72%) et le balcon (environ 28%). Avec cette capacité, la salle peut être considérée comme l'une des plus grandes

salles de conférence de la ville de Constantine. Le Tableau 1 présente les données architecturales et géométriques les plus importantes de la salle.

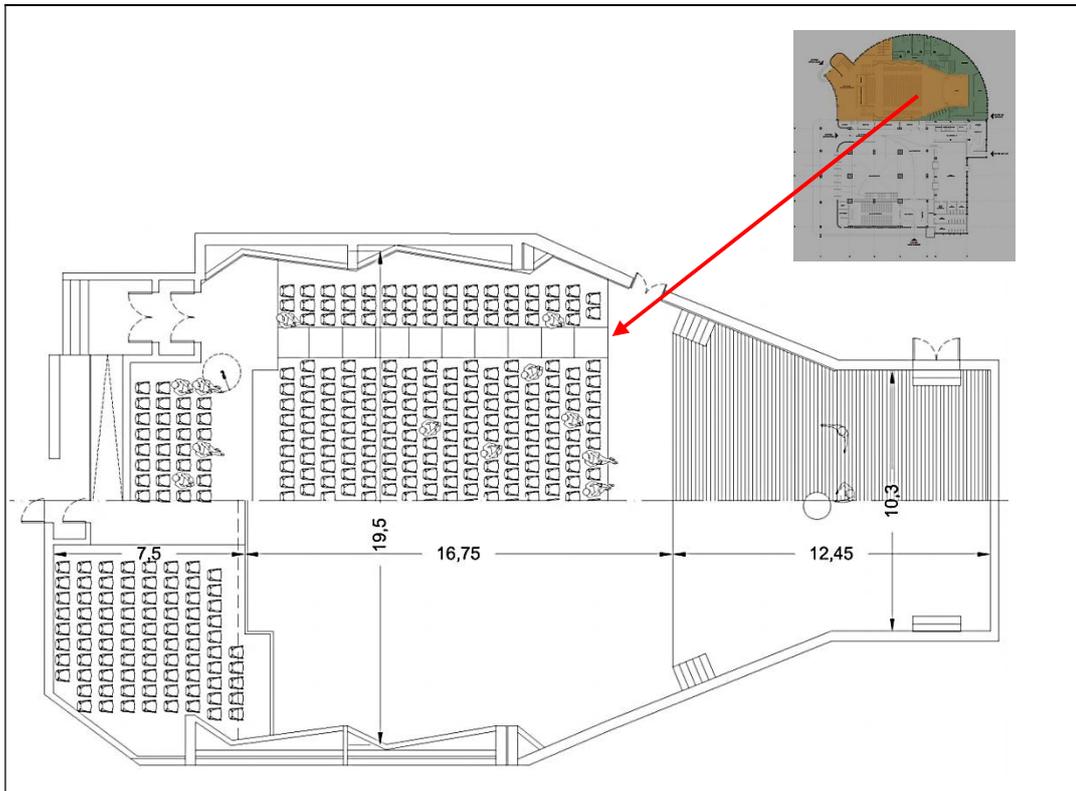


Figure 5.3 : Plan des deux niveaux de la salle. Source: BET Cheribet Yazid

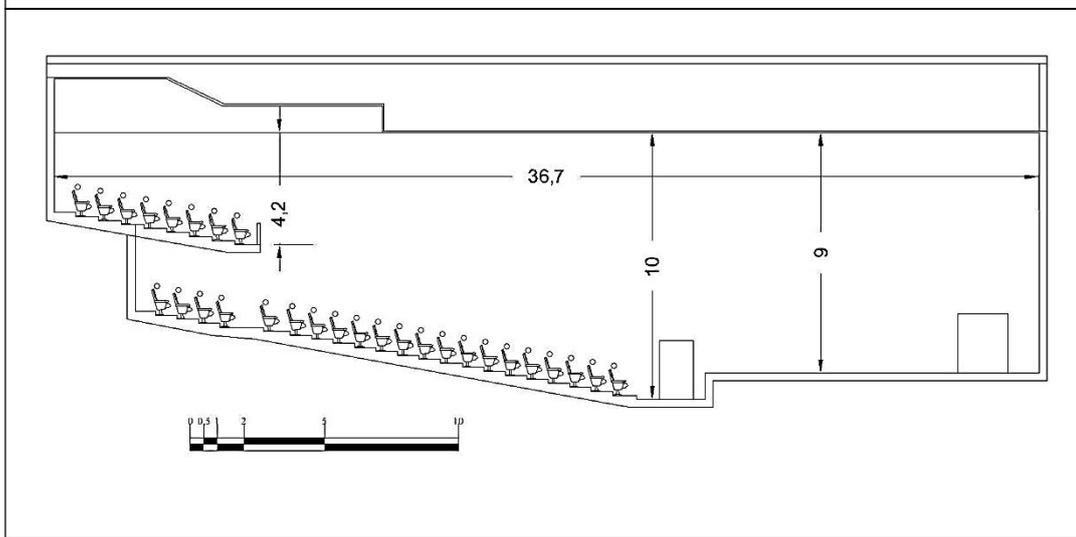


Figure 5.4 : Coupe longitudinale de la salle. Source: BET Cheribet Yazid

Tableau 5.1 : Données architecturales et géométriques de la salle de conférence du palais de culture Malek Haddad.

| 1-Surface et périmètre | | | | | | | |
|---|---------------|--------|----------------------|---|----------------|-----------------|-----------------------------|
| La scène | Sol | Balcon | Total (sol + balcon) | Superficie nette d'audience | | périmètre | Sh_f^a m ⁻¹ |
| | | | | Sol | Balcon | | |
| 143 | 368 | 147,7 | 515,7 | 331,2 | 132,93 | 107,8 | 0,16 |
| 2- Volumes ^b en m ³ | | | | Capacité max de pers. | | D_{MAX}^d (m) | |
| La scène | Salle entière | Total | F_f^c | Sol | Balcon | Sol | Balcon |
| 1430 | 4048 | 5478 | 8,32 | 414 | 166 | 14,8 | 25 |
| 3-Données géométriques | | | | | | | |
| Surface/personne m ² | | | | Volume/personne ^e m ³ | | | |
| Net | | Brut | | | | | |
| Sol | Balcon | Sol | Balcon | Sol | Sous le balcon | Balcon | $T_{OPT-500S}$ |
| 0,80 | 0,80 | 0,89 | 0,89 | 9,78 | 6,57 | 3,20 | 0,85 |

^a Facteur de forme (principalement, c'est le rapport périmètre / surface)

^b Sous le plafond suspendu

^c Pour la pièce considérée, la hauteur de la salle est prise comme la hauteur moyenne, calculée comme suite : le volume total de la pièce / surface nette = 7.82 m

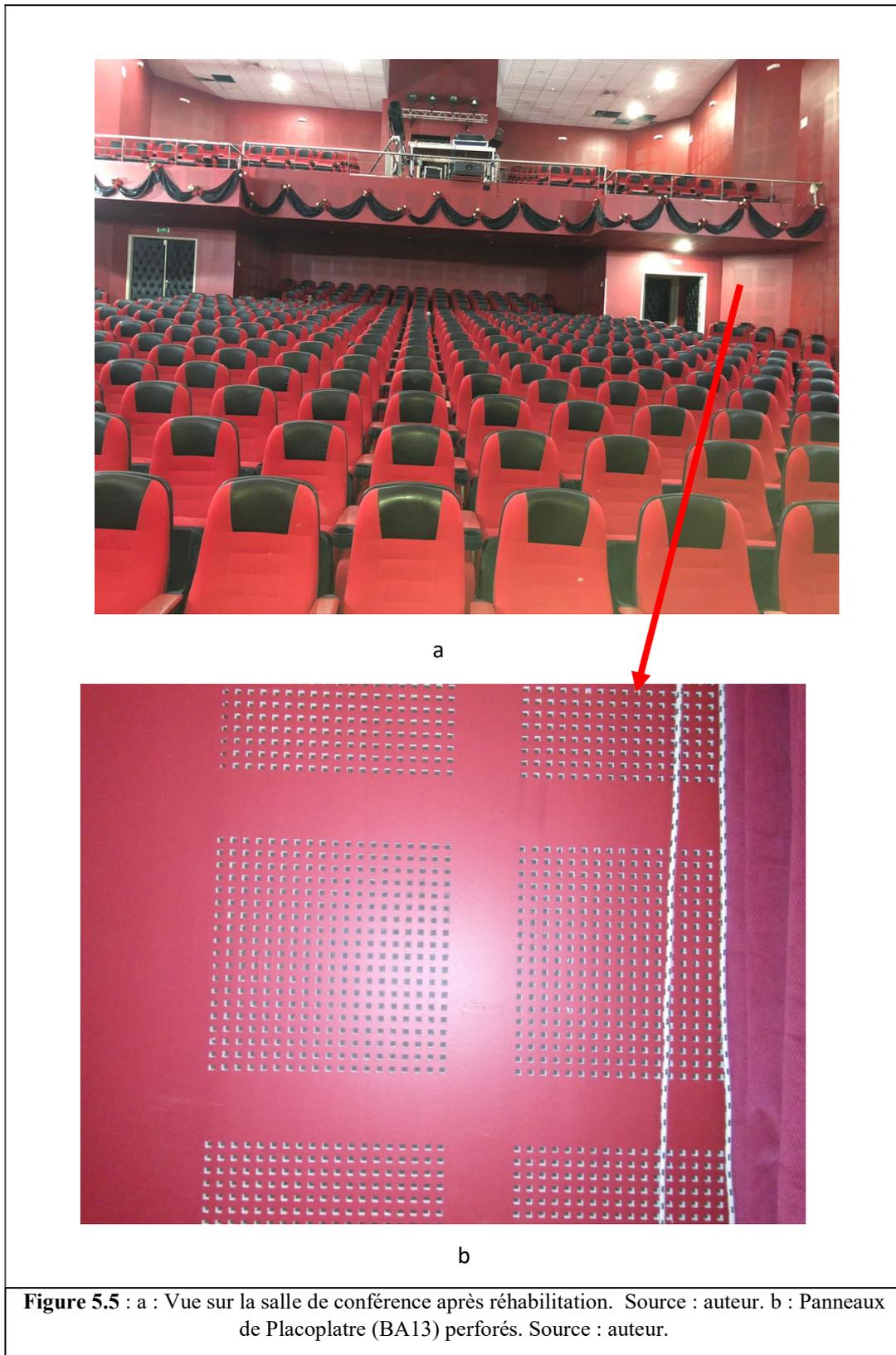
^d La distance entre la source sonore (située au milieu de l'étage) et l'auditeur distant

^e Calcul (surface brute / personne x hauteur moyenne de la salle, sous le balcon ou le balcon)

5.1.1.2. Réhabilitation acoustique de la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad

Comme mentionné précédemment, le palais de Malek Hadad a connu une opération de réhabilitation en 2014. Ses deux salles de conférences ont connu des actions spécifiques à leurs fonctions principales.

Les travaux de réhabilitation ont consisté à l'habillage de tous les murs de la salle par des panneaux de **Placoplatre (BA13) perforés et la laine de roche** afin d'améliorer et renforcer la qualité acoustique sans modifier la forme (Fig5.5).

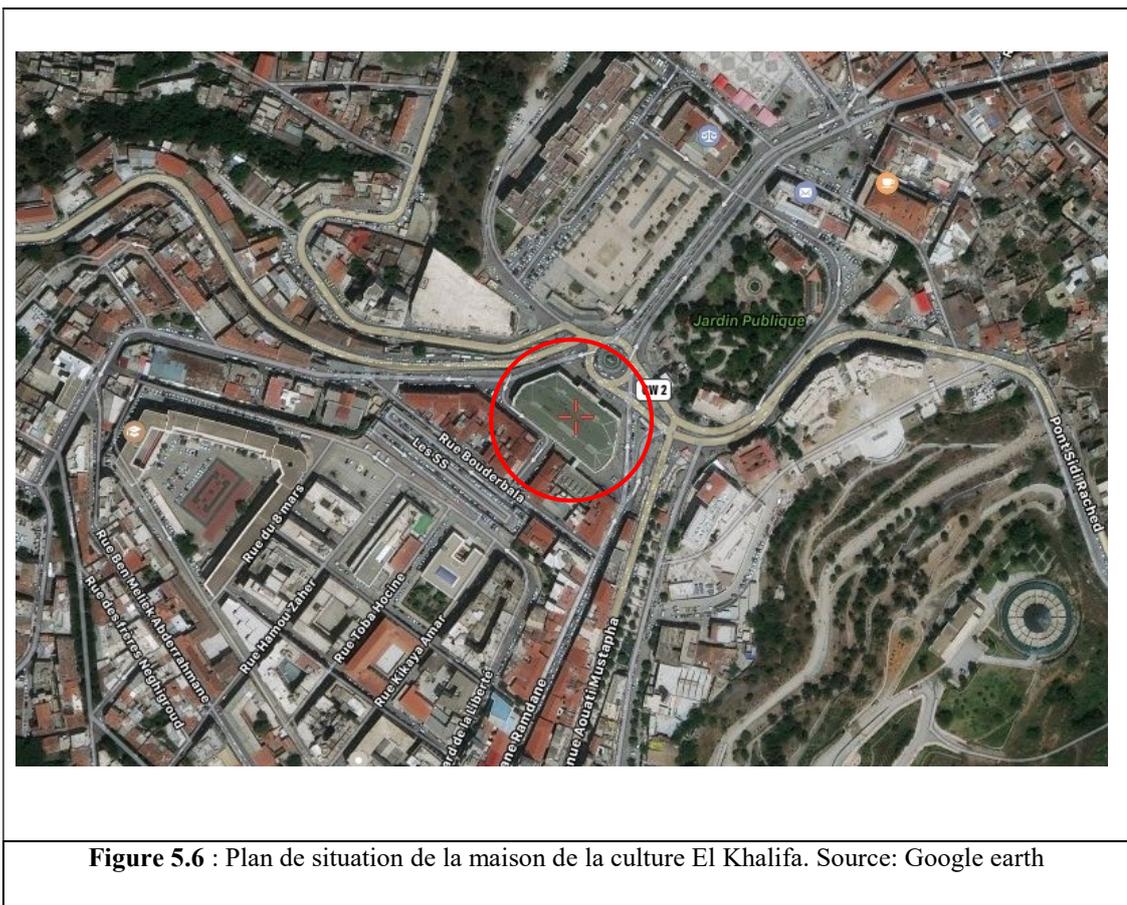


5.1.2. Maison de la culture El Khalifa

La Maison de la culture El Khalifa : un haut lieu culturel au cœur de Constantine, situé sur la Place du 1er Novembre 1954 (ex-La Brèche) (Fig5.6), l'ancien garage Citroën construit pendant la période coloniale en 1933 et réaménagé en maison de la culture en 1980.

Comme le palais de la culture de Malek Hadad, la maison de la culture El Khalifa a bénéficié d'une opération de réhabilitation en 2014 lancée dans le cadre de la manifestation « Constantine, capitale de la culture arabe 2015 » par le bureau d'étude et l'entreprise Nasri Salim.

C'est un bâtiment qui comprend plusieurs bureaux, deux salles de conférences, une bibliothèque, et une salle de spectacles, en plus d'un salon d'honneur réservé à l'accueil des hôtes de la ville. (Fig5.7).



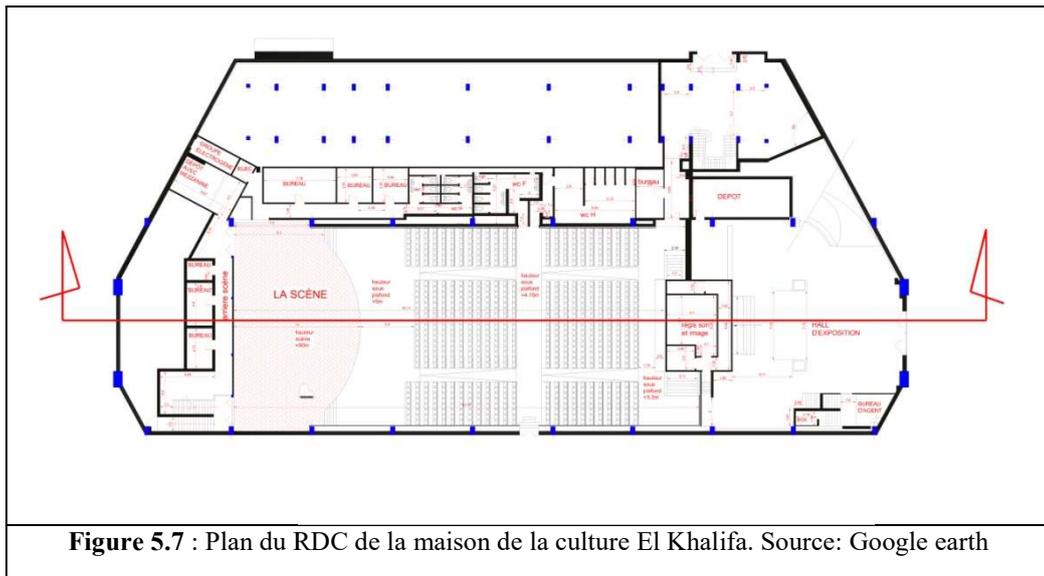


Figure 5.7 : Plan du RDC de la maison de la culture El Khalifa. Source: Google earth

5.1.2.1. Description architecturale de la salle de conférence de la Maison de la culture El Khalifa.

La salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa est de forme rectangulaire (Fig5.8). Elle comporte deux parties; la scène et la salle. Sa superficie totale est de 884,7m². Le volume total de la salle est d'environ 3096,45m³. La capacité totale de la salle est de 704 spectateurs. Le Tableau 4.2 présente les données architecturales et géométriques les plus importantes de la salle.

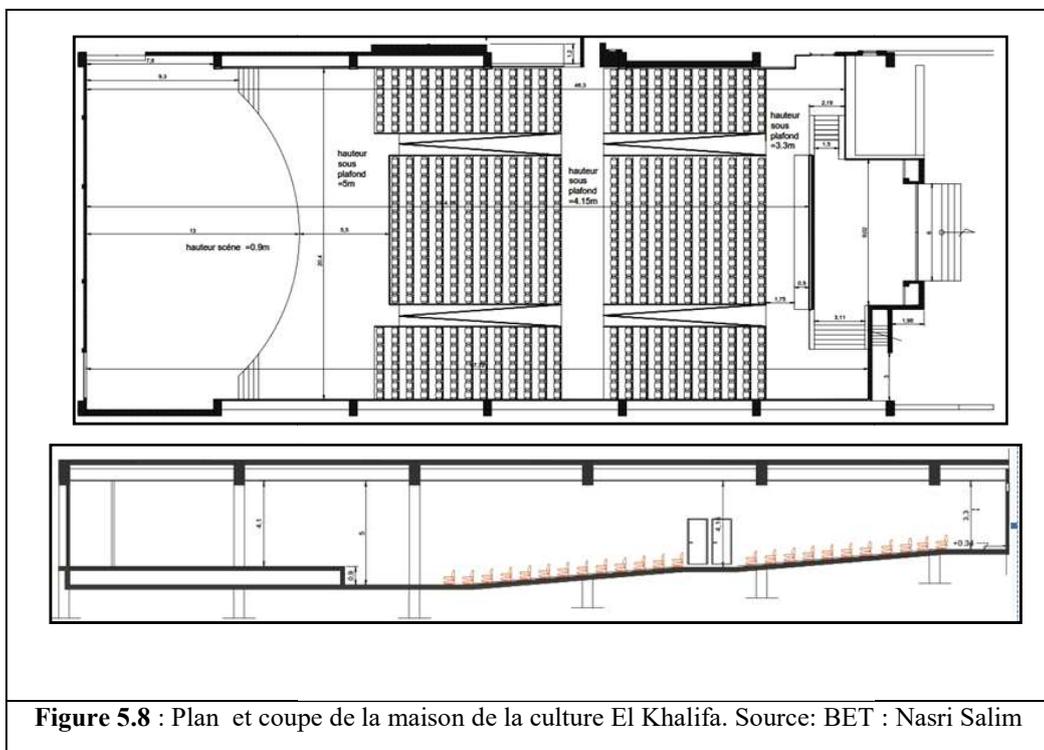


Figure 5.8 : Plan et coupe de la maison de la culture El Khalifa. Source: BET : Nasri Salim

Tableau 5.2. Données architecturales et géométriques de la salle de conférence de la maison de la culture El khalifa

| 1-Surface et périmètre | | | | | | | |
|---|---------------|---------|----------------------|---|----------------|-----------------|-----------------------------|
| La scène | Sol | Balcon | Total (sol + balcon) | Superficie nette d'audience | | périmètre | Sh_f^a m ⁻¹ |
| | | | | Sol | Balcon | | |
| 223,3 | 661,4 | | 661,4 | 595,26 | | 129 | 0,15 |
| 2- Volumes ^b en m ³ | | | | Capacité max de pers. | | D_{MAX}^d (m) | |
| La scène | Salle entière | Total | F_f^c | Sol | Balcon | Sol | Balcon |
| 781,55 | 2314,9 | 3096,45 | 3,50 | 704 | 0 | 23 | |
| 3-Données géométriques | | | | | | | |
| Surface/personne m ² | | | | Volume/personne ^e m ³ | | | |
| Net | | Brut | | | | | |
| Sol | Balcon | Sol | Balcon | Sol | Sous le balcon | Balcon | $T_{OPT-500S}$ |
| 0,85 | | 0,94 | | 3,29 | | | 0,74 |

^a Facteur de forme (principalement, c'est le rapport périmètre / surface)

^b Sous le plafond suspendu

^c Pour la pièce considérée, la hauteur de la salle est prise comme la hauteur moyenne, calculée comme suite : le volume total de la pièce / surface nette = 7.82 m

^d La distance entre la source sonore (située au milieu de l'étage) et l'auditeur distant

^e Calcul (surface brute / personne x hauteur moyenne de la salle, sous le balcon ou le balcon)

5.1.2.2. Réhabilitation acoustique de la salle de conférence de la Maison de la culture El Khalifa.

La salle de conférence de la maison de la culture El Kalifa a connu une opération de réhabilitation spécifique visant à améliorer sa qualité acoustique ainsi que son état général, Les travaux de réhabilitation ont consisté à l'habillage de tous les murs de la salle par des panneaux **MDF perforés combinés par la mousse (éponge)** afin d'améliorer la qualité acoustique sans modifier la forme (Fig5.9)².

² Informations données par le service technique DEP Constantine



Figure 5.9 : Panneaux MDF perforés et la mousse (éponge) utilisés pour la réhabilitation de la salle. Source: auteur.

5.2. Evaluation de la qualité sonore de la salle de conférence de Malek Hadad par les mesures in-situ

Afin de définir l'impact de la réhabilitation sur la qualité acoustique de la salle de conférence de Malek Hadad nous avons effectué des mesures in-situ sur cette dernière à travers une campagne de mesures acoustiques.

5.2.1. Méthode de mesure

Selon la norme ISO 3382 le temps de réverbération est mesuré avec deux méthodes essentielles; la première correspond à la méthode du bruit interrompu et la deuxième à la méthode intégrée de réponse impulsionnelle. Dans le domaine de la parole, la plage de fréquences doit couvrir au moins 125 Hz à 4 000 Hz dans les bandes d'octave, ou 100 Hz à 5 000 Hz dans les bandes d'un tiers d'octave. Nous avons, pour notre cas, opté pour les bruits interrompus car ils offrent un meilleur rapport signal sur bruit.

Nous devons avant tout savoir que pour réussir les mesures in-situ à l'aide de la méthode du bruit interrompu nous devons respecter les exigences suivantes :

- Une source de haut-parleur doit être utilisée et le signal envoyé dans le haut-parleur doit être dérivé d'un bruit électrique aléatoire ou pseudo-aléatoire à large bande. Lors de l'utilisation d'un bruit interrompu, il doit être interrompu de manière aléatoire, sans utiliser de séquence répétée. La source doit pouvoir produire un niveau de pression acoustique suffisant pour assurer une courbe de décroissance commençant au moins à 35 dB au-dessus du bruit de fond à la fréquence correspondante.
- Il est nécessaire de créer un niveau d'au moins 45 dB au-dessus du niveau de fond dans chaque bande de fréquences. Pour les mesures dans des bandes d'octave, la largeur de bande du signal doit être supérieure à une octave, et pour les mesures dans des bandes d'un tiers d'octave, la largeur de bande du signal doit être supérieure à un tiers d'octave.
- Le spectre du signal émis dans la salle doit être raisonnablement plat dans la bande d'octave réelle à mesurer. Alternativement, le spectre de bruit à large bande peut être façonné pour fournir un spectre rose de son réverbérant en régime permanent dans l'enceinte de 88 Hz à 5 657 Hz. Ainsi, la gamme de fréquences couvre les bandes d'un tiers d'octave avec des fréquences moyennes de 100 Hz à 5 kHz ou des bandes d'octave de 125 Hz à 4 kHz.

La durée d'excitation de la pièce doit être suffisante pour que le champ sonore ait atteint un état stationnaire avant la coupure de la source. Ainsi, il est essentiel que le bruit soit rayonné pendant au moins quelques secondes et pas moins de la moitié du temps de réverbération.

5.2.2. Matériels et instruments de mesure utilisés

Les mesurages en acoustique du bâtiment requièrent l'emploi de sources sonores conformes à la réglementation et à la normalisation (par exemple ISO 140). Pour les bruits de type aérien, la source omnidirectionnelle est indispensable. Nous avons utilisé **une source omnidirectionnelle** construite par onze (11) haut-parleurs répartis sur une sphère pour que les mesures acoustiques se fassent d'une manière identique dans tous les coins de la salle. La caractérisation de cette source a été faite dans une chambre anéchoïque de la faculté d'électronique et informatique de l'USTHB (Remram Y, Khelladi H.,2009).

Cette source, d'une masse ne dépassant pas les 15 Kg, est munie d'un adaptateur pouvant se fixer sur un trépied (Fig5.10). Elle sera piloté par **un amplificateur** de puissance de type M-Audio 4000 doté d'une puissance de 120 Watts efficace. Cette puissance élevée de la source est idéale pour les mesurages des caractéristiques des grandes salles telles que le temps de réverbération et l'intelligibilité acoustique.

Un microphone omnidirectionnel 2006C a été utilisé, il fait partie de la série flexible de normes de référence DPA. Le microphone 2006C avec le préamplificateur compact MMP-C offre une possibilité de mesurer le son direct ainsi que les sons réfléchis des différentes parois de la salle (Fig5.11). Toutes les caractéristiques de la source omnidirectionnelle ainsi que des informations sur sa construction sont détaillées dans l'annexe I.

Le logiciel de mesure et de traitement du signal **Easera** a été utilisé pour générer un signal sweep logarithmique, Le signal généré par la carte sonore du PC via le logiciel Easera sera amplifié par un amplificateur de puissance afin de produire une excitation puissante au niveau de la salle. Cette impulsion est ensuite envoyée à la source omnidirectionnelle qui envoie le signal sonore dans toutes les directions.



Figure 5.10 : Matériel et instruments de mesure utilisé. Source: Auteur

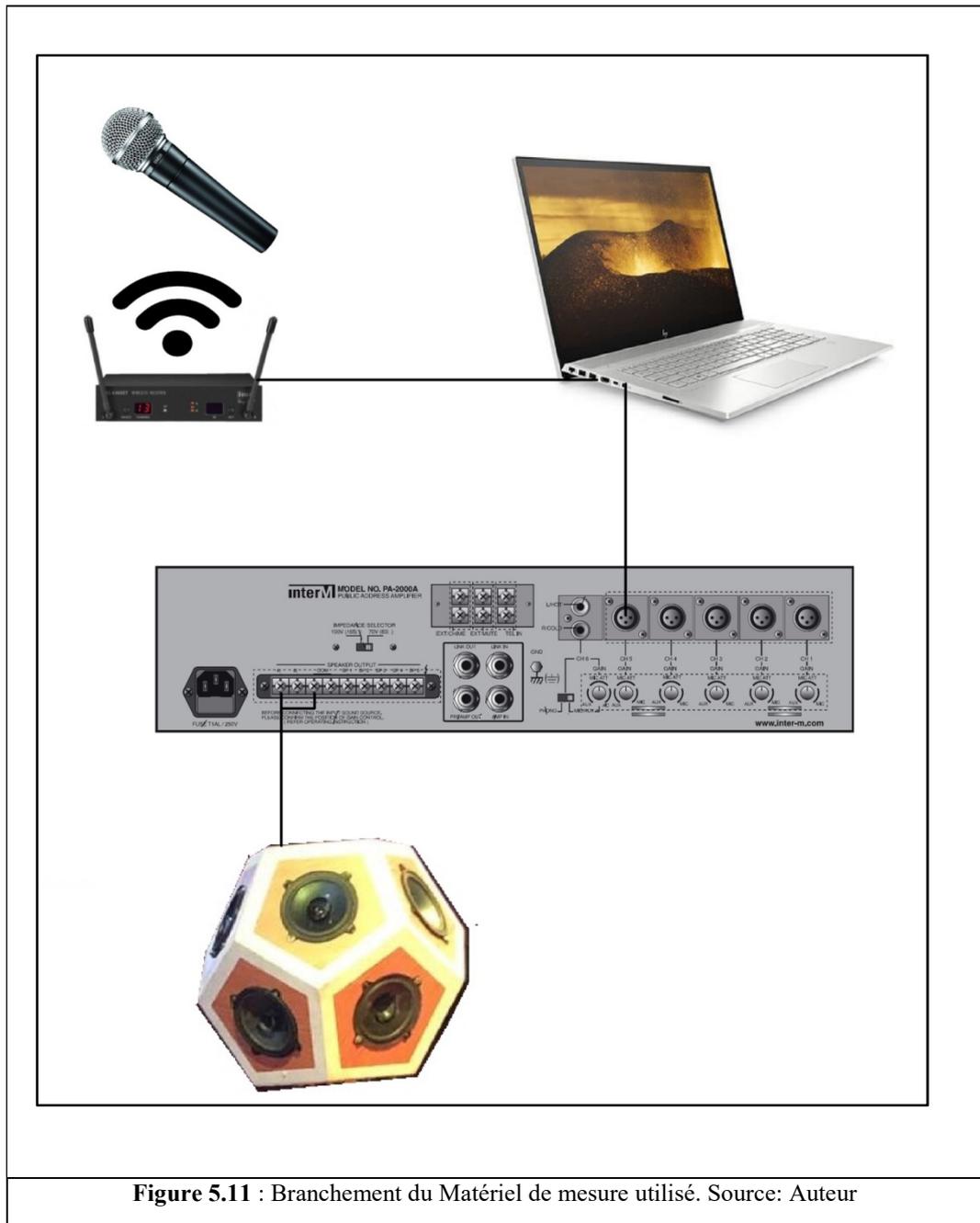


Figure 5.11 : Branchement du Matériel de mesure utilisé. Source: Auteur

5.2.3. Positions de mesure

Selon la norme ISO 3382 un nombre de 6 positions de microphone représentatives doit être utilisé (Fig5.12).

Les positions des récepteurs doivent être réparties uniformément sur toutes les zones de sièges du public. Lorsqu'une salle est divisée en zones distinctes, tels que des balcons et des zones sous-balcon, davantage d'emplacements de récepteurs seront nécessaires. Le microphone doit être placé à une hauteur de 1,2 m au-dessus du sol aux emplacements des

sièges d'audience afin d'être représentatif de la hauteur de l'oreille de l'auditeur assis (Fig5.13).

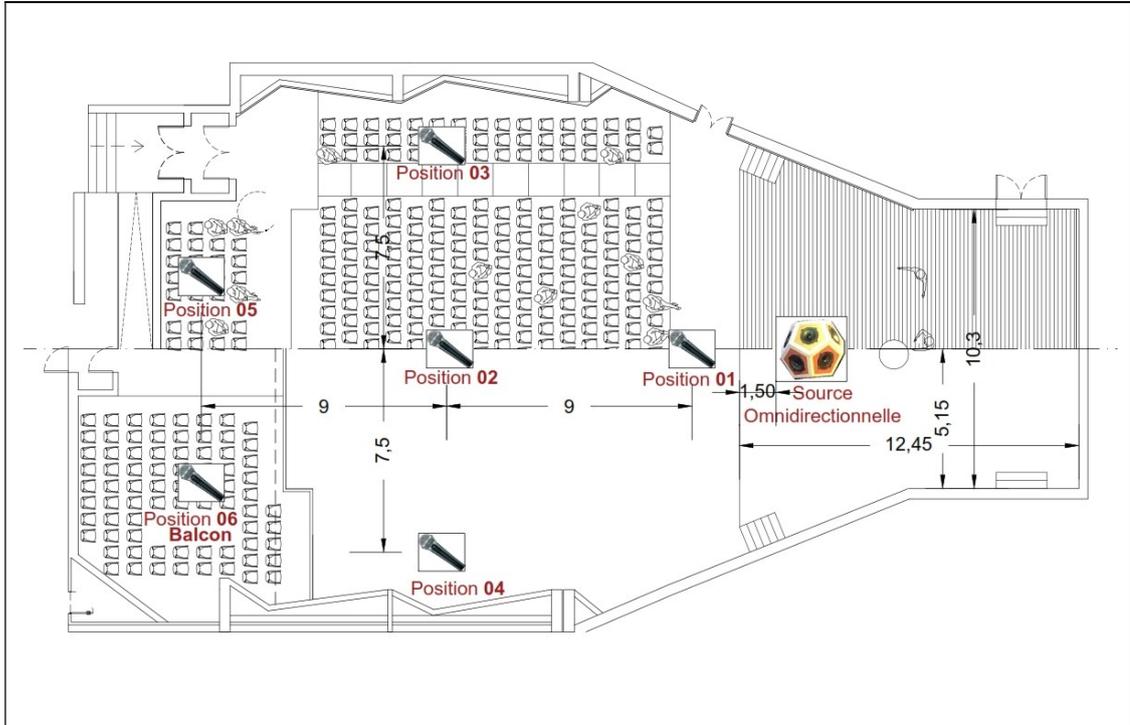


Figure 5.12: Positions de mesures. Source: auteur 2019

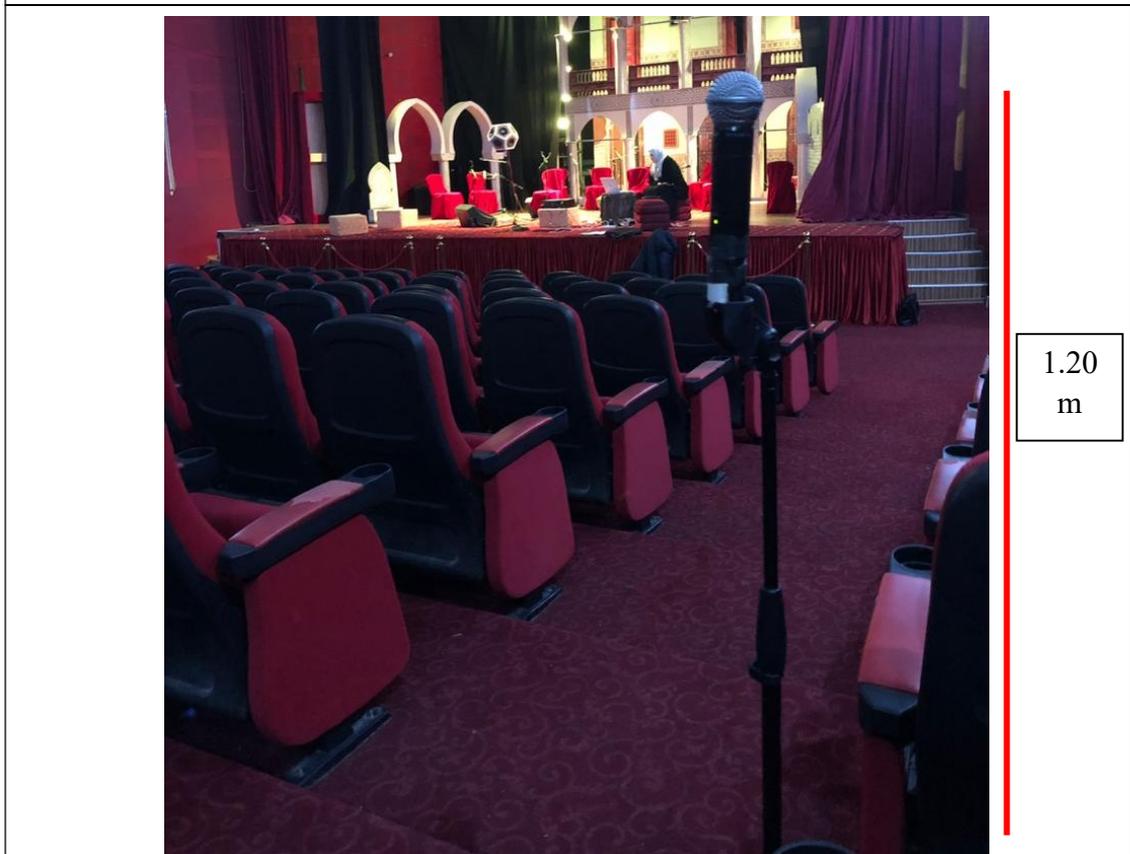


Figure 5.13 : Hauteur du microphone (position 4). Source: auteur 2019

5.2.4. Détermination de la valeur optimale du temps de réverbération

Le temps de réverbération TR est le critère acoustique le plus important dans n'importe quelle salle de conférence. La meilleure conception phonique est celle qui assure aux oreilles une réception non distordue des sons de la parole. Cela nécessite de maintenir $TR_{OPT-500}$ à sa limite inférieure acceptée. Une bonne approximation pour l'optimum $TR_{OPT-500}$ dans une salle de parole (de volume V , m^3) peut être obtenue à partir de la formule : $T_{OPT-500} = 0.3 \log_{10} \frac{V}{s}$ (Cavanaugh William J, Wilkes Joseph A., 1999). Pour la salle de conférence de la maison de la culture Malek Hadad, après calcul, nous avons obtenu un temps de réverbération optimal $TR_{OPT-500}$ de 0,85 s.

5.2.5. Résultats et Interprétation des mesures in-situ

Comme nous l'avons déjà mentionné le protocole de mesure a été effectué pour six positions de mesure. Les résultats mesurés (avec la source omnidirectionnelle) sur les six récepteurs, sont représentés sur la (figure 5.14). Le temps de réverbération moyen varie entre 1.65 seconde pour la fréquence 125 Hz et 1.4 seconde pour la fréquence 8000Hz. Il atteint sa valeur maximale 3.36 pour la fréquence 500 qui est une valeur très élevée comparée à avec la valeur optimale ($TR_{OPT-500}$ de 0,85 s), ce qui influence d'une manière négative sur la qualité acoustique de la salle.

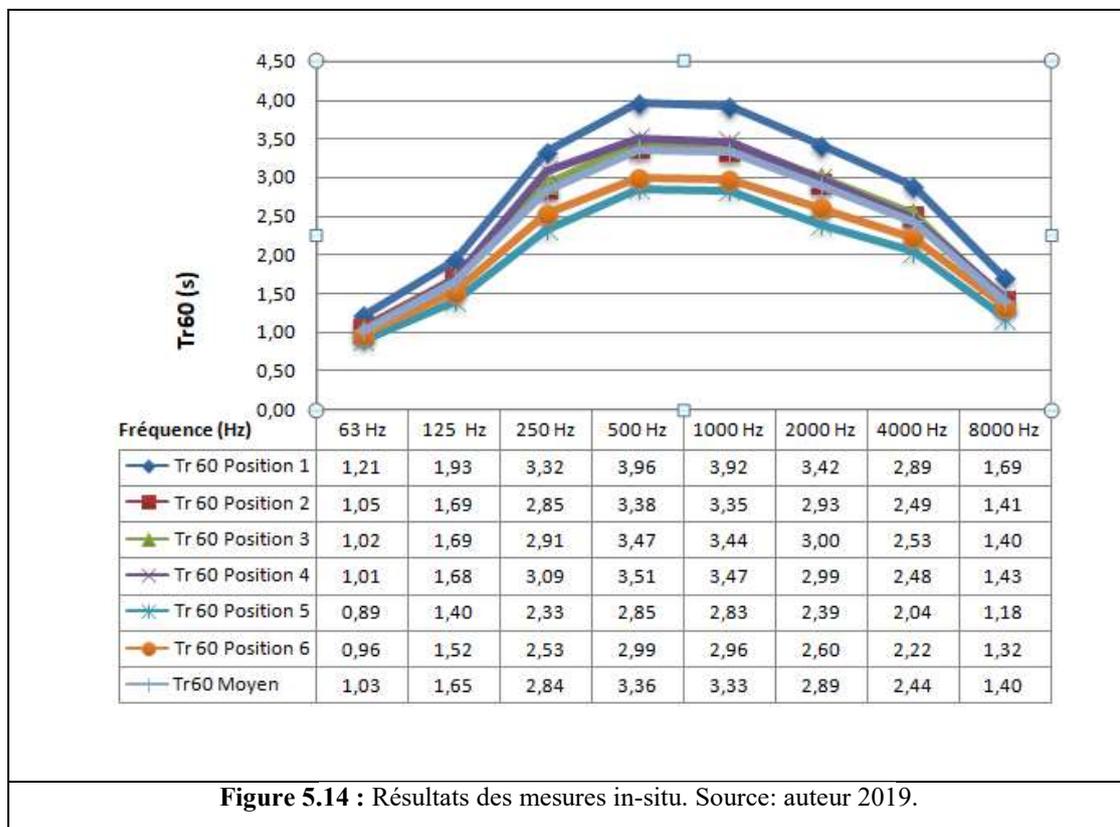


Figure 5.14 : Résultats des mesures in-situ. Source: auteur 2019.

5.3. Evaluation de la qualité sonore des deux cas d'étude par la simulation acoustique

5.3.1. Présentation des logiciels utilisés

Olive Tree Lab Suite : est un logiciel couvrant un large éventail de domaines en acoustique: Terrain, salles, Bureau, il est un environnement unique, pratique, exact et précis de simulation acoustique basée sur l'état des méthodes de l'art. Il offre aux utilisateurs un laboratoire virtuel où ils peuvent expérimenter et étudier les effets des paramètres acoustiques et leurs conceptions.

AutoCAD : est un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO) créé en décembre 1982 par Autodesk³.

Trimble SketchUp : un logiciel de modélisation 3D, d'animation et de cartographie orienté vers l'architecture. Initialement édité par la société @Last Software (racheté ensuite par Google), ce logiciel se caractérise par des outils simples (rotation, extrusion, déplacement, etc.), qui en font un logiciel de 3D très différent des modeleurs 3D classiques. Il a été racheté en 2012 par la société Trimble⁴

5.3.2. Méthode de modélisation

En utilisant le logiciel de SKETCHUP, un modèle 3D a été construit. Ce modèle contient tous les détails architecturaux et les différents matériaux de finition. Il comprend également la position suggérée pour la source sonore située au milieu de la scène à la position du locuteur. Le modèle a été analysé acoustiquement en utilisant le logiciel Olive Tree Lab SUITE pour calculer les indicateurs acoustiques considérés ; relatifs à l'intelligibilité de la parole et pour vérifier leur compatibilité avec leurs valeurs optimales (Fig5.15).

En simulation, les coefficients d'absorption « α » pour les différentes faces des modèles ont été choisis dans le tableau fourni par Olive Tree Lab SUITE.

³ www.autodesk.fr/products/autocad-lt/overview

⁴ <https://www.sketchup.com/fr>

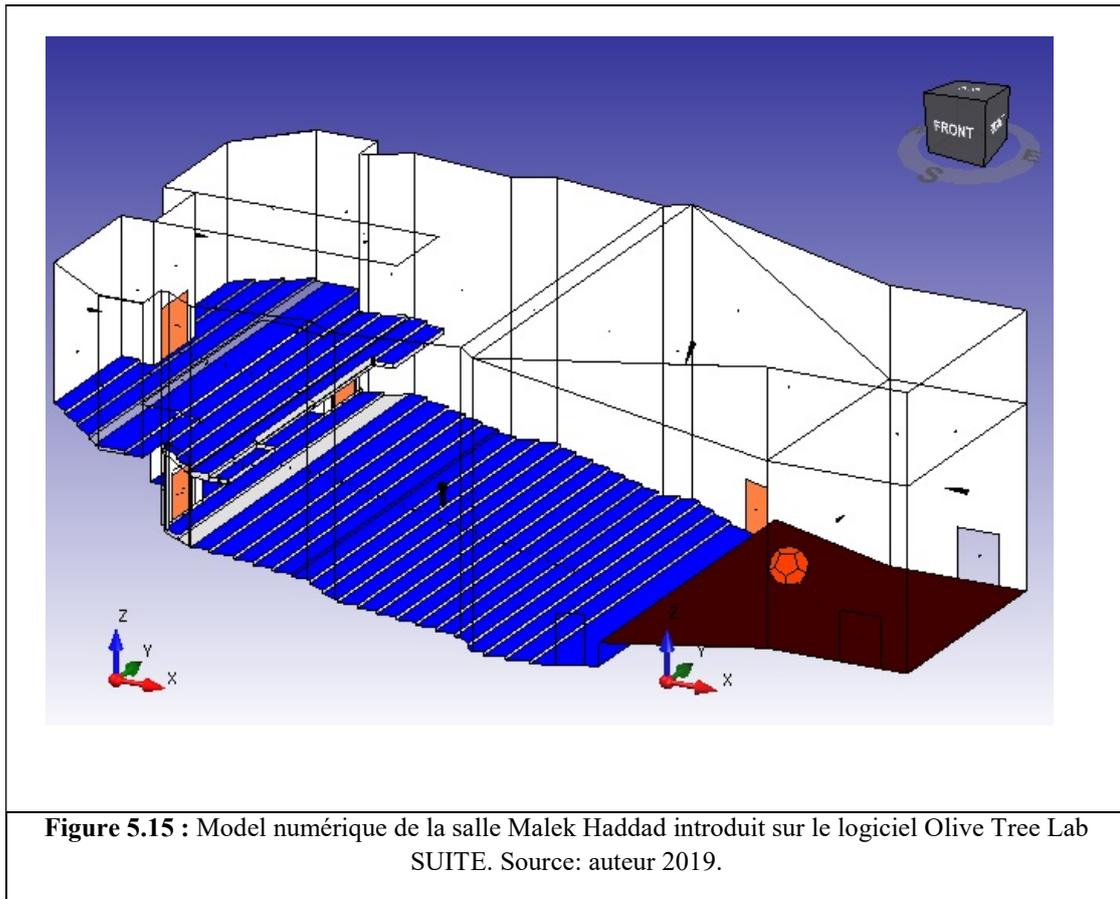


Figure 5.15 : Model numérique de la salle Malek Haddad introduit sur le logiciel Olive Tree Lab SUITE. Source: auteur 2019.

5.3.3. Détermination des valeurs optimales des indices mesurés

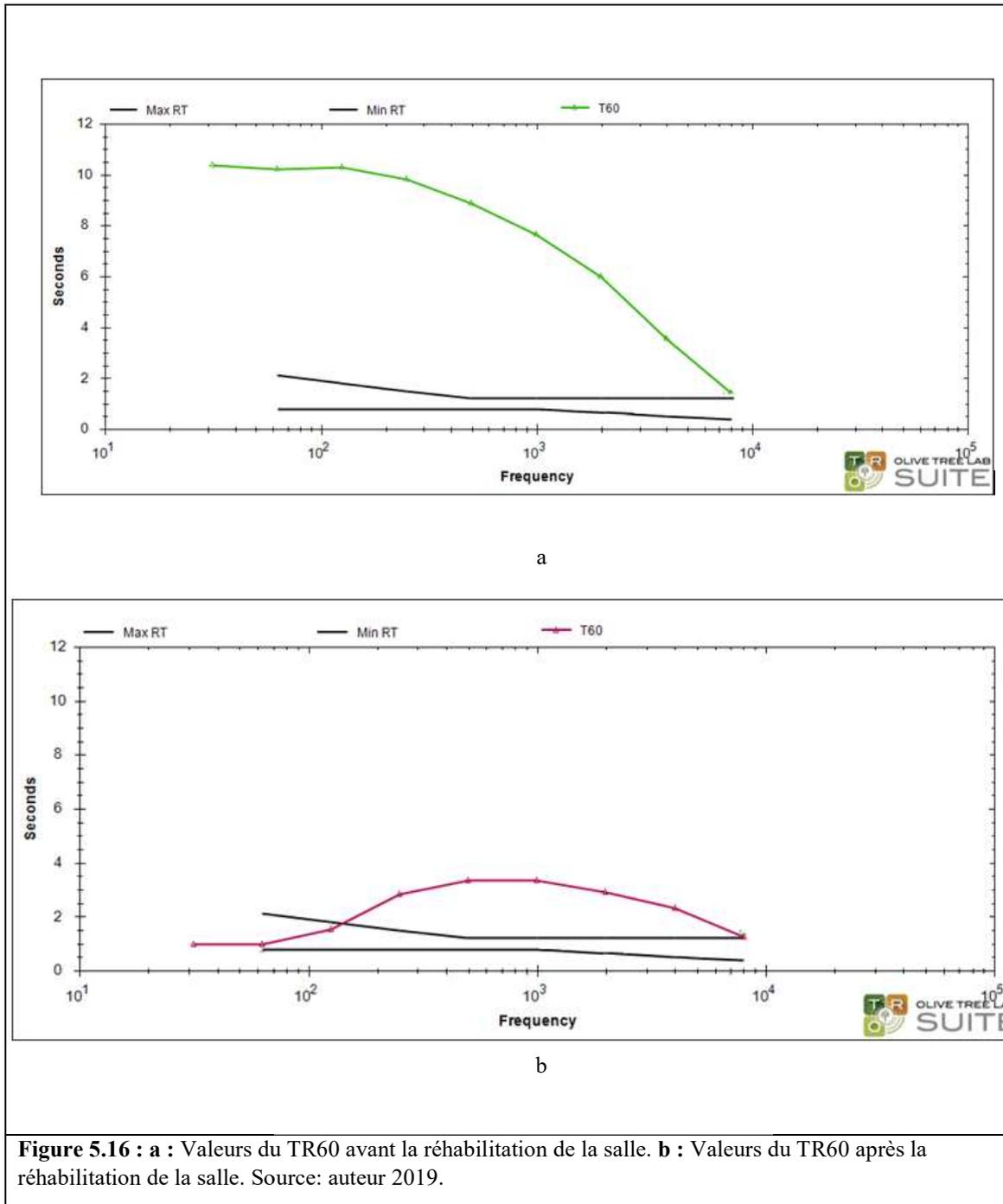
En se basant sur la norme ISO 3382 nous avons déterminé les valeurs optimales des indices mesurés (tableau5-3), il s’agit de la Clarté sonore (C80), la Force sonore G, l’Indice D50, l’Intelligibilité de la parole STI.

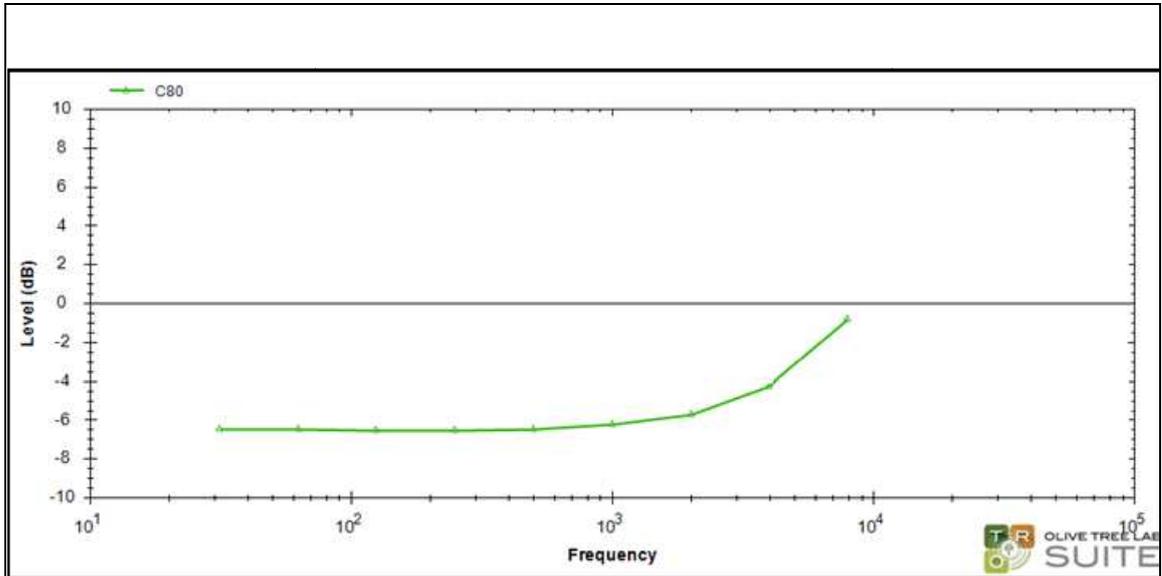
Tableau 5-3. Les valeurs optimales sont obtenues selon ISO/DIS 3382.

| Indice | Valeurs optimales selon ISO 3382-1[1] | | | | | | | | | |
|--------|--|------|----------|------|---------------|------|-------|------|------------|---|
| C80 | -5dB<C80opt<+5dB En fréquence 500Hz et 1000 Hz | | | | | | | | | |
| G | -2<Gopt<+10En fréquence 500Hz et 1000 Hz | | | | | | | | | |
| D80 | +0,3<D50 _{opt} <+0,7 | | | | | | | | | |
| STI | 0 | 0,30 | 0,30 | 0,45 | 0,45 | 0,60 | 0,60 | 0,75 | 0,75 | 1 |
| | Très mauvaise | | mauvaise | | satisfaisante | | bonne | | Très bonne | |

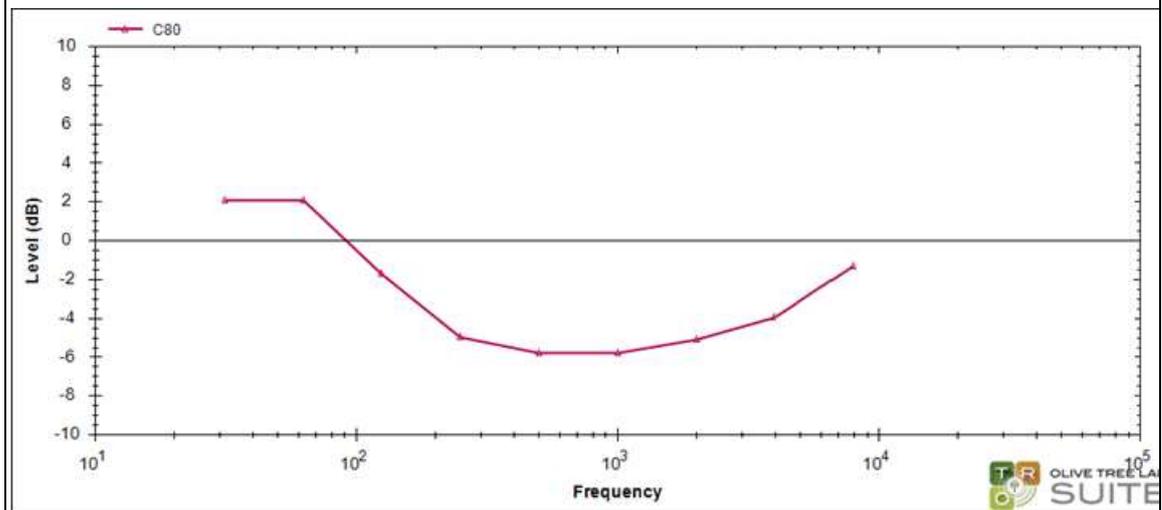
5.3.4. Résultats obtenus pour la salle de conférence du palais de la culture Malek Haddad

Les résultats de la simulation numérique pour la salle de conférence du palais de la culture Malek Haddad avant et après sa réhabilitation sont représentés sur les figures (figure 5.16, figure 5.17, figure 5.18, figure 5.19) et (le tableau 5.4) suivants :



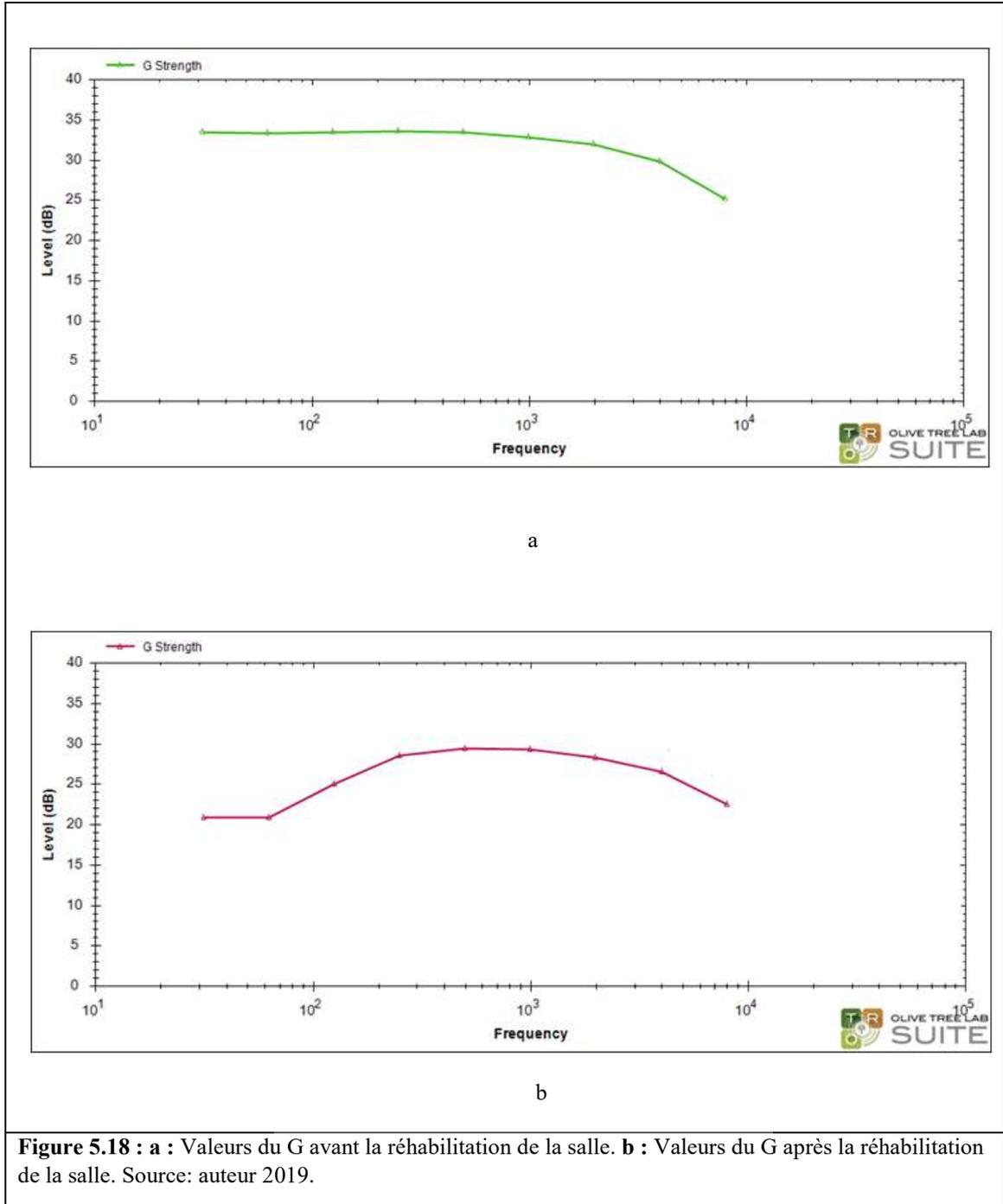


a



b

Figure 5.17 : a : Valeurs du C80 avant la réhabilitation de la salle. **b :** Valeurs du C80 après la réhabilitation de la salle. Source: auteur 2019.



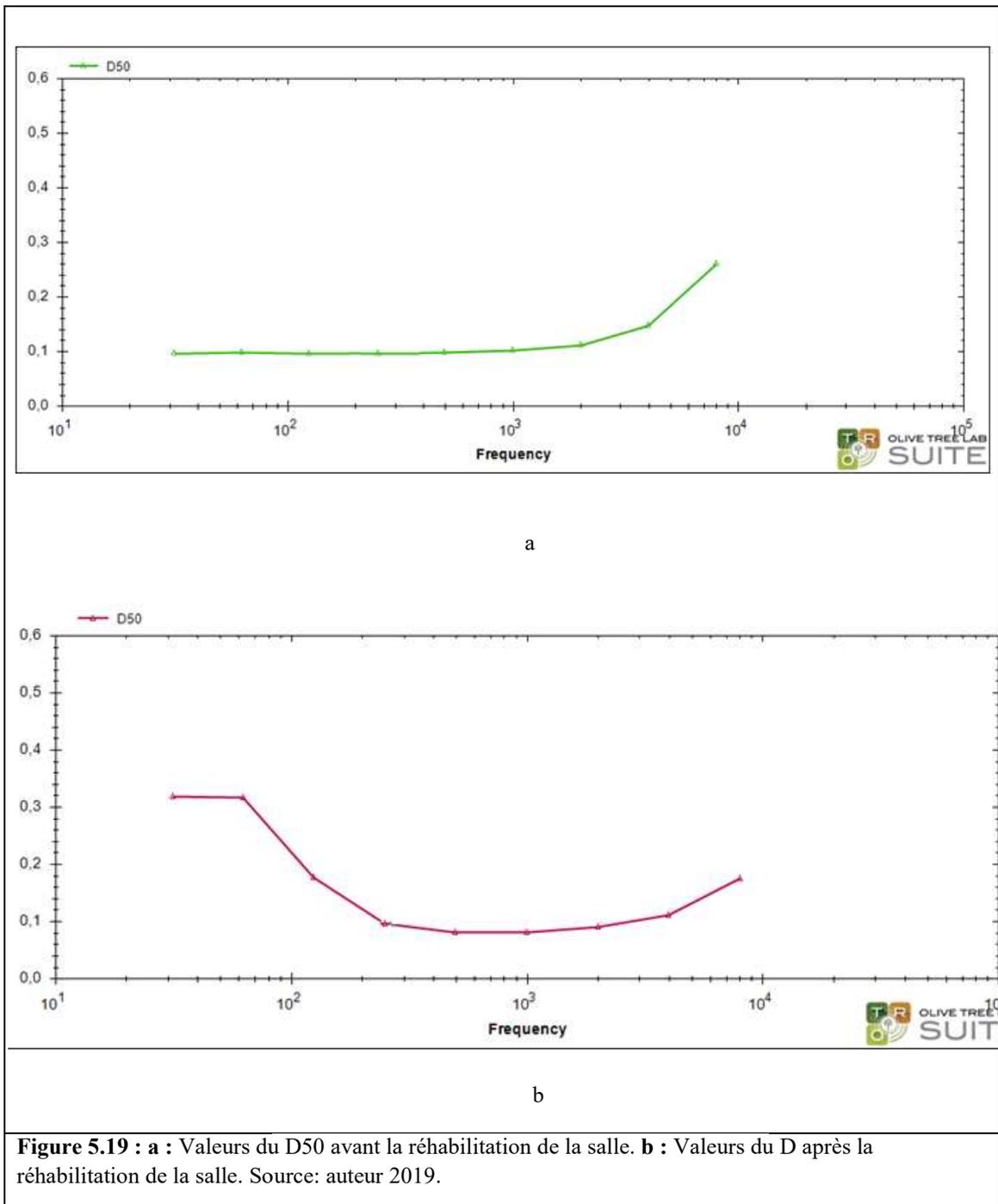


Tableau 5-4. Valeur du STI de la salle avant et après la réhabilitation.

| STI | Avant réhabilitation | Après réhabilitation |
|-----|----------------------|----------------------|
| | 0.19 | 0,39 |

5.3.4.1. Interprétation des Résultats

A. Résultats du critère Tr 60

Les résultats ont montré que la réhabilitation a modifié en grande partie l'environnement acoustique de la salle de conférence, grâce à l'élimination des motifs de réflexion indésirables. La diminution représente jusqu'au -85% (125Hz), -62% (500Hz) et -35 (4000Hz) après les travaux de réhabilitation (Farid D, Benzagouta S., 2017)

En comparant le Tr_{500} après la réhabilitation avec Tr_{500} optimale nous remarquons que la valeur du Tr_{500} reste supérieure à la valeur optimale (planche 5.1).

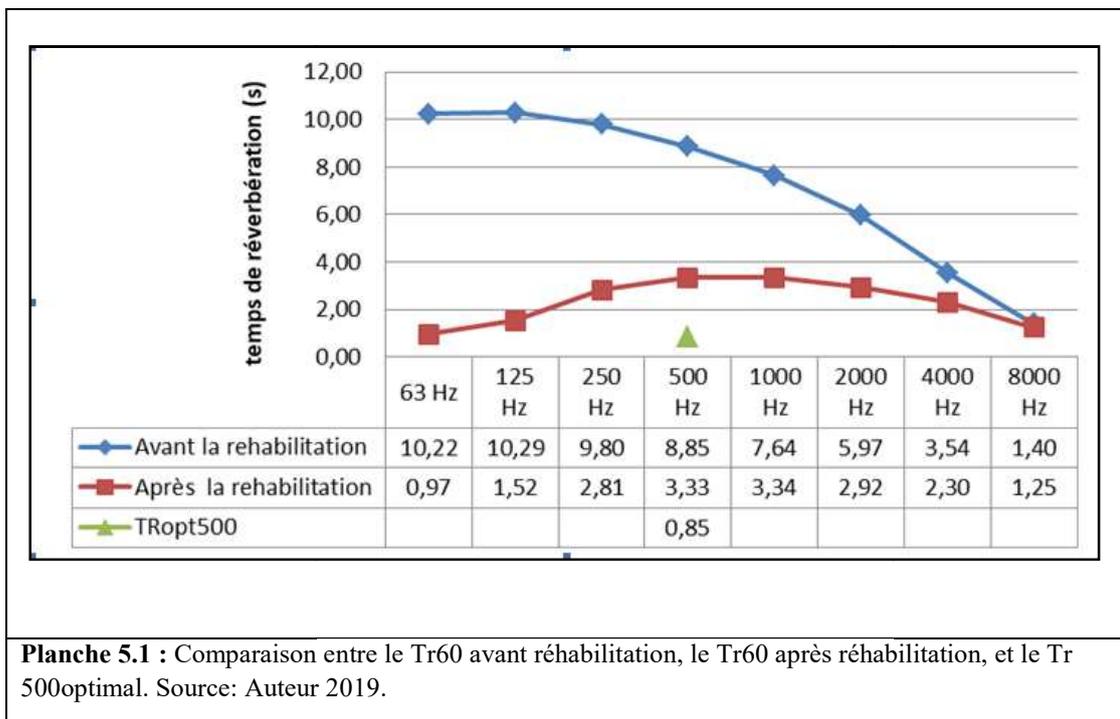


Planche 5.1 : Comparaison entre le Tr_{60} avant réhabilitation, le Tr_{60} après réhabilitation, et le Tr_{500} optimal. Source: Auteur 2019.

B. Résultats du critère C80

La réhabilitation n'a pas beaucoup modifié les valeurs du C80. Les changements sont apparus entre les fréquences 63 Hz et 500 Hz mais le reste des résultats est presque identiques.

En comparant les résultats du C80 après la réhabilitation avec les valeurs optimales on constate une très légère amélioration entre 500 Hz et 1000 Hz (planche 5.2).

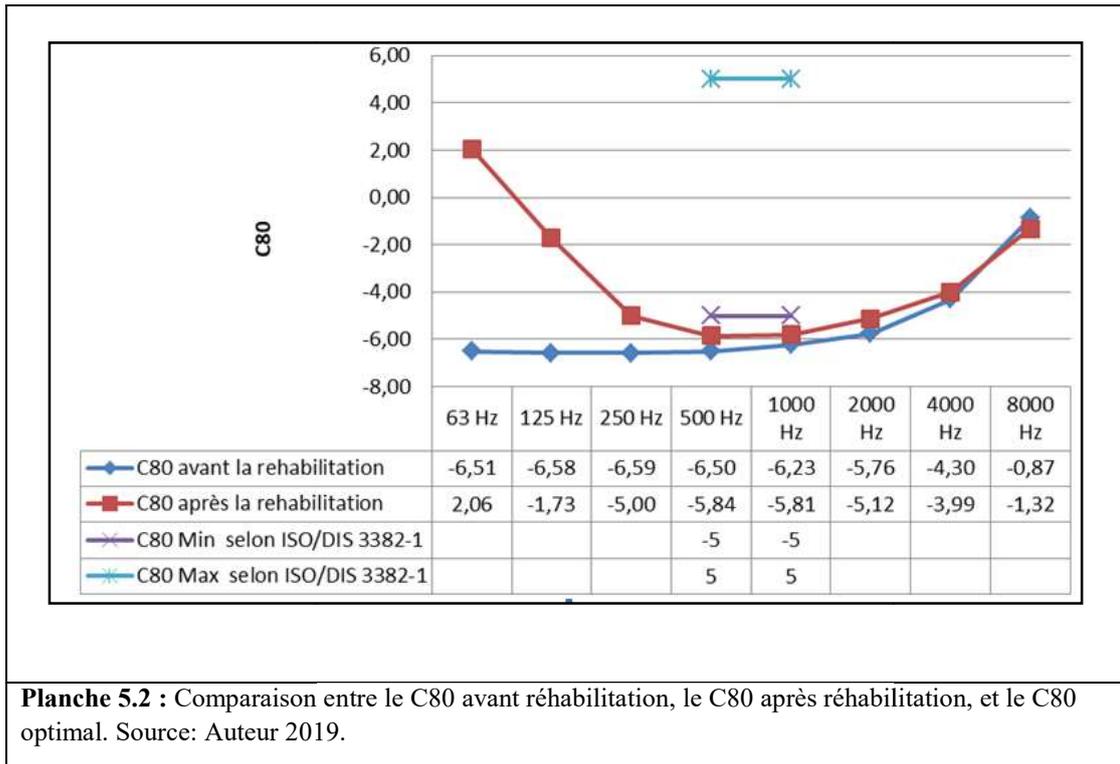


Planche 5.2 : Comparaison entre le C80 avant réhabilitation, le C80 après réhabilitation, et le C80 optimal. Source: Auteur 2019.

C. Résultats du critère G

La réhabilitation n’a pas eu un impact majeur sur la force d’énergie G, nous remarquons une petite amélioration d’environ 10 % sauf pour les valeurs entre 63 Hz et 250 Hz où la force G a atteint les 37,6 %. Les valeurs de la force G après la réhabilitation restent loin des valeurs optimales (planche 5.3).

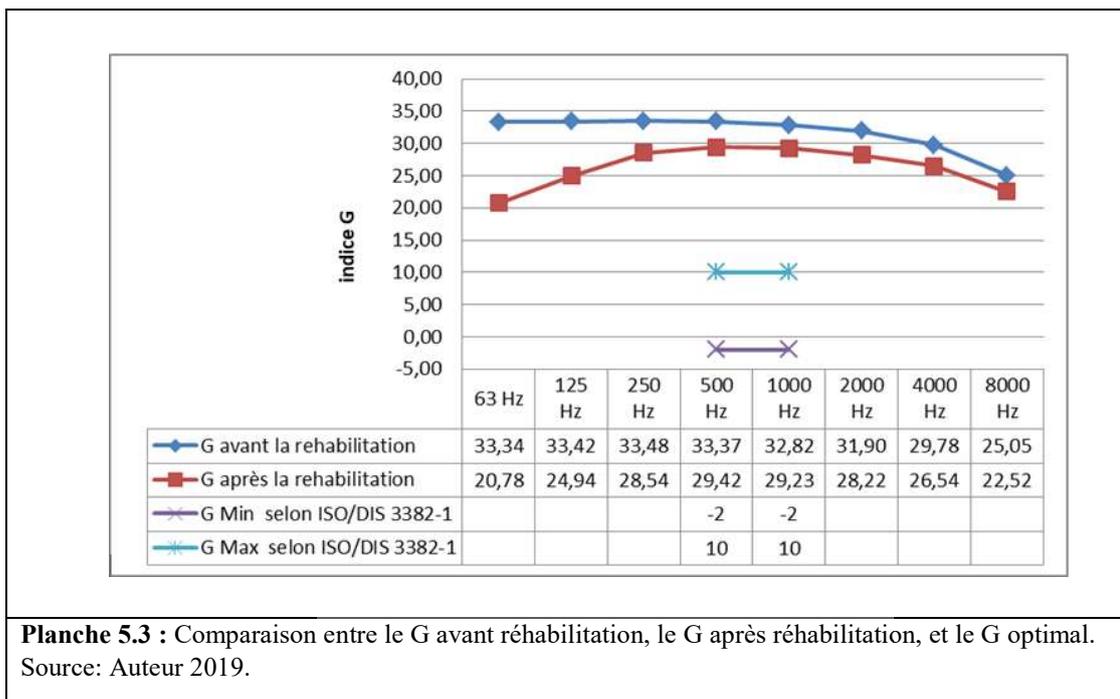
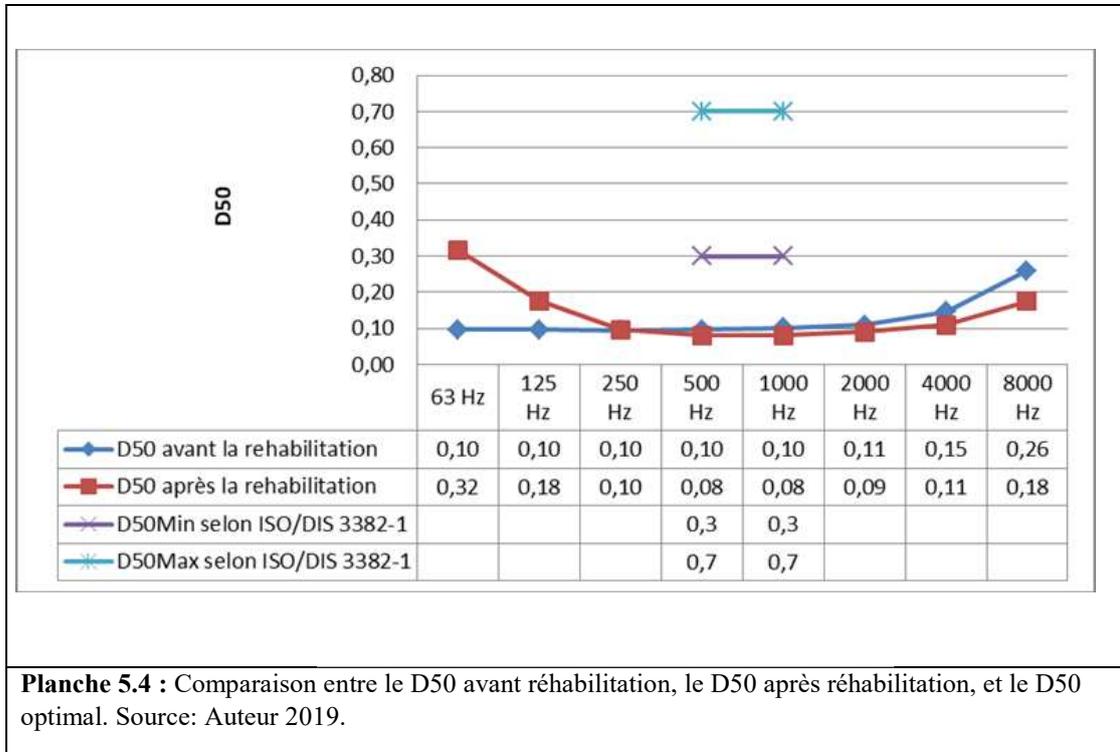


Planche 5.3 : Comparaison entre le G avant réhabilitation, le G après réhabilitation, et le G optimal. Source: Auteur 2019.

D. Résultats du critère D50

La réhabilitation n'a pas eu un impact sur l'indice D50, nous signalons juste une légère amélioration entre les fréquences 63 Hz et 250Hz (planche 5.4).



E. Critère de l'intelligibilité STI

Le dernier indice de l'intelligibilité STI est passé d'un état très mauvais à mauvais (Tableau 5-5).

Tableau 5-5 : Comparaison du STI avant réhabilitation, le STI après réhabilitation, et le STI optimal.

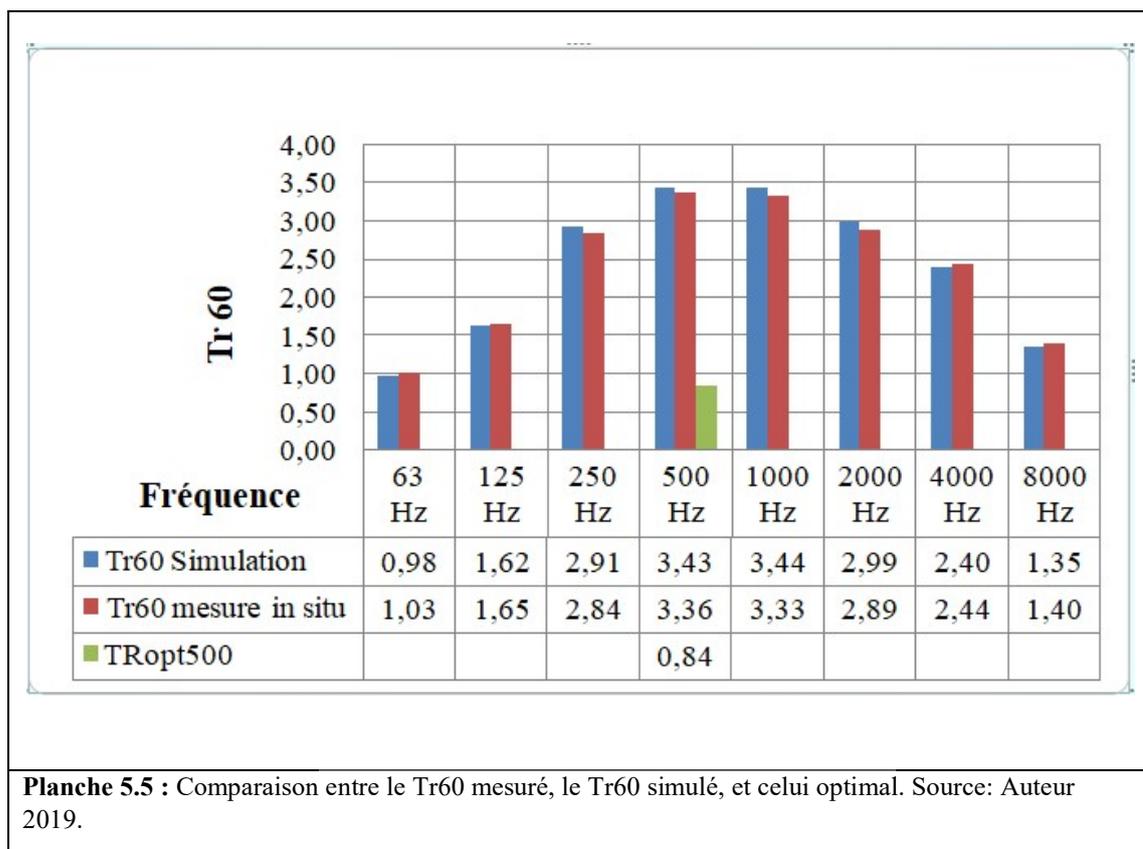
| | STI avant réhabilitation | STI après réhabilitation | Valeurs des STI optimales selon ISO 3382-1 |
|-----|--|---|---|
| STI | 0,19 Sur l'échelle de la qualité est très mauvaise | 0,39 Sur l'échelle de la qualité est très mauvaise. | 0 à 0,30 Très mauvaise 0,30 à 0,45 mauvaise 0,45 à 0,60 satisfaisante 0,60 à 0,75 bonne 0,75 à 1 Très bonne |

L'estimation préliminaire de l'absorption requise par Olive Tree Lab SUITE après la réhabilitation a dévoilé une amélioration de la qualité phonique de la salle mais elle n'a pas atteint les valeurs optimales concernant le confort acoustique à l'intérieur de la salle.

5.3.4.2 Confrontation de la simulation numérique et les mesures in-situ pour la salle de Malek Haddad.

La comparaison des résultats simulés et mesurés du TR60 (critère le plus important dans l'évaluation de la qualité acoustique) (Planche 5.5), nous montre que les valeurs du TR60 sont très proches et cela sur l'ensemble des fréquences. Exemple le TR60 moyen à la fréquence 500 Hz mesuré pour l'ensemble des récepteurs est égal à 3.36s, le temps de réverbération à la même fréquence mesuré par la simulation est égal à 3.43s, ce qui nous donne une différence de 0.07 s. **Ce qui constitue un critère positif de validation du modèle de la simulation.**

Il est important de noter que les valeurs du TR60 dans les deux conditions, mesurées et simulées, demeurent supérieures à la valeur optimale.



5.3.5. Résultats et interprétation des mesures obtenus pour la salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa. Les résultats détaillés se trouvent dans l'annexe II

A. Résultats du critère Tr 60

L'introduction d'un revêtement mural de panneaux mixtes composé de MDF fortement perforé et d'une couche de mousse (épaisseur 08cm) a diminué d'une manière très significative, les valeurs du temps de réverbération sur l'ensemble de fréquences. La diminution est estimée après les travaux de réhabilitation a -84% pour la fréquence (125Hz), -73% pour la fréquence (1000Hz) et -44% pour la (4000Hz).

La comparaison du temps de réverbération après réhabilitation avec le temps de réverbération optimal montre que $TR_{60_{500}}$ qui était de 0.54s a diminué par rapport à la valeur du $Tr_{60_{500optimal}}$ 0.74s, ce qui rend la salle sourde et de ce fait diminue d'une manière significative sa qualité acoustique (Planche 5.6).

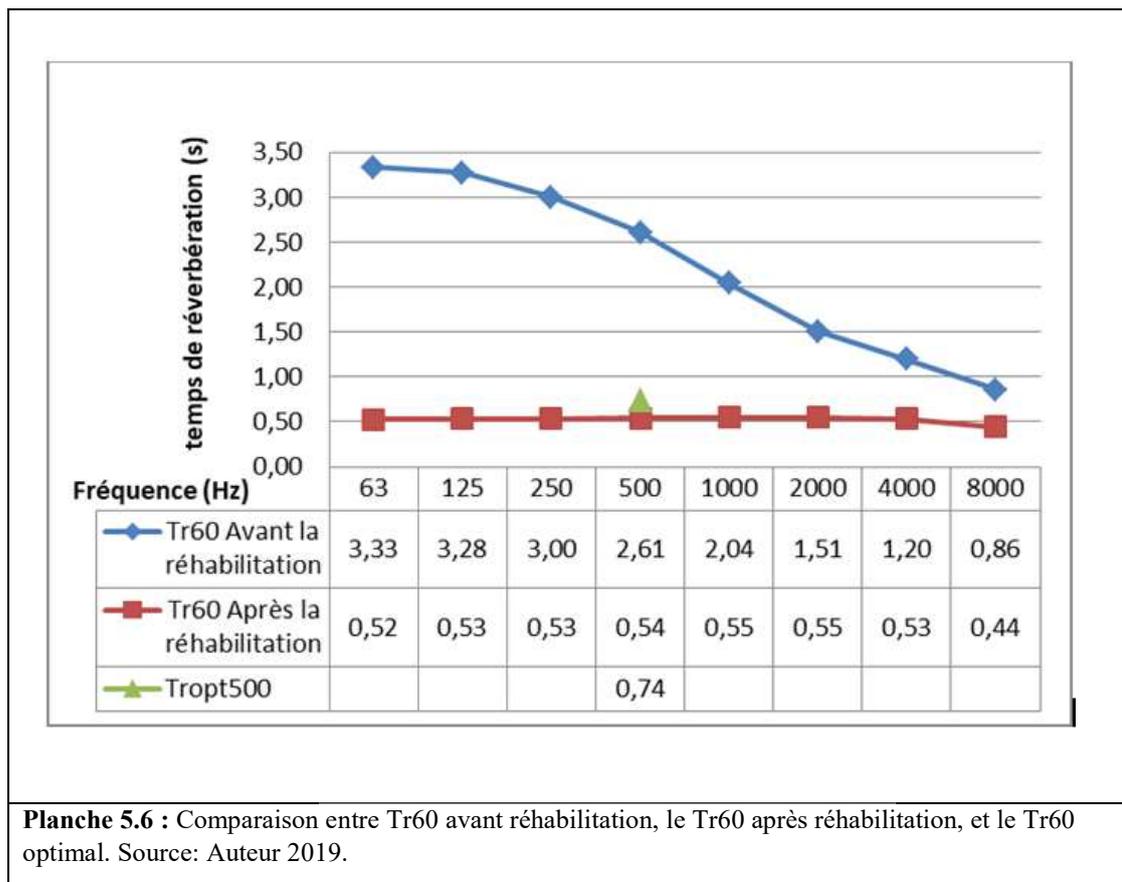


Planche 5.6 : Comparaison entre Tr60 avant réhabilitation, le Tr60 après réhabilitation, et le Tr60 optimal. Source: Auteur 2019.

B. Résultats du critère C80

On peut remarquer à travers ces résultats que la réhabilitation acoustique a influencé les valeurs du spectre C 80. Elle a produit une augmentation du niveau qui varie entre 19 dB pour la fréquence 63Hz et 11dB pour la fréquence 8000 Hz.

Il est important de noter que les valeurs de l'indice C80 après réhabilitation ne rentrent pas dans la marge optimale (Planche 5.7).

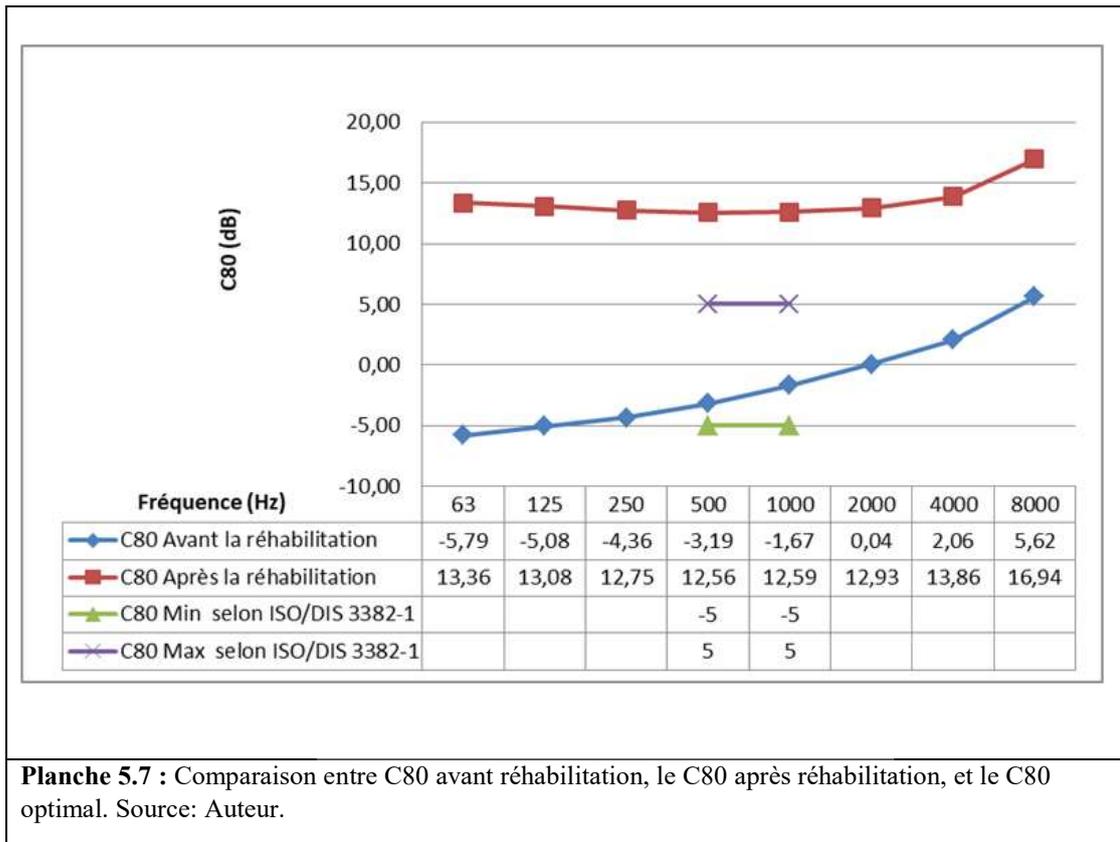
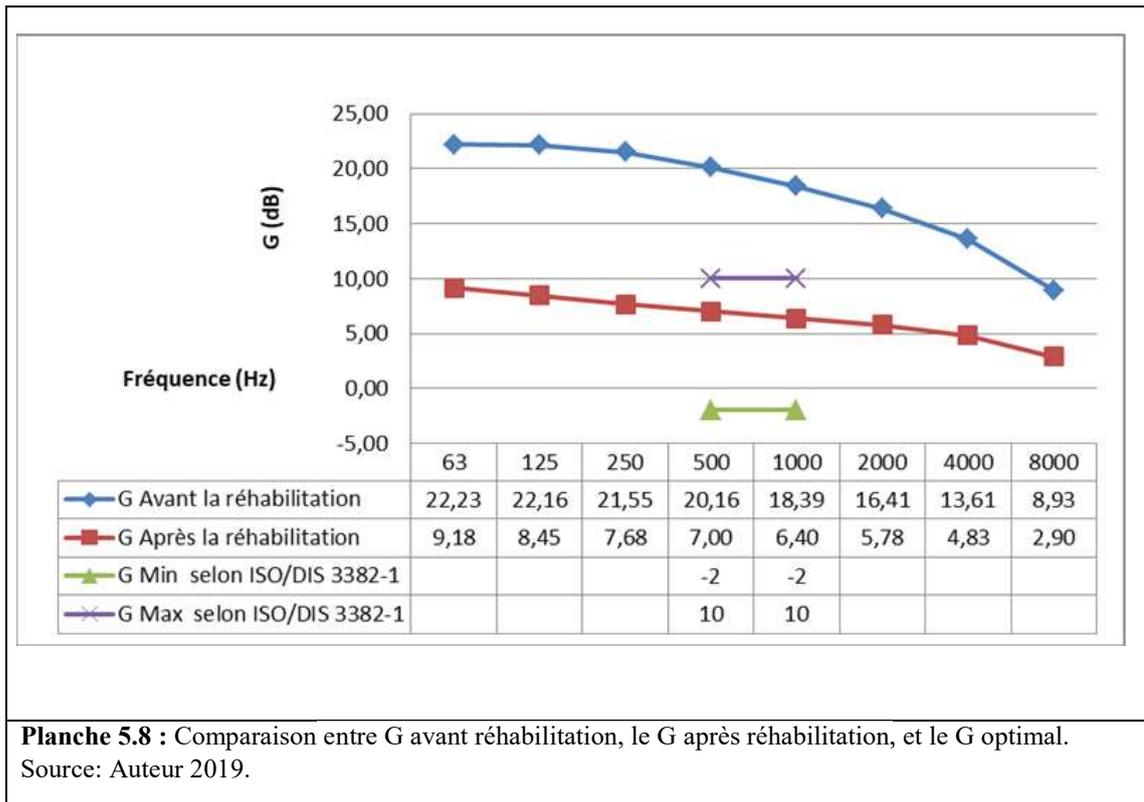


Planche 5.7 : Comparaison entre C80 avant réhabilitation, le C80 après réhabilitation, et le C80 optimal. Source: Auteur.

C. Résultats du critère G

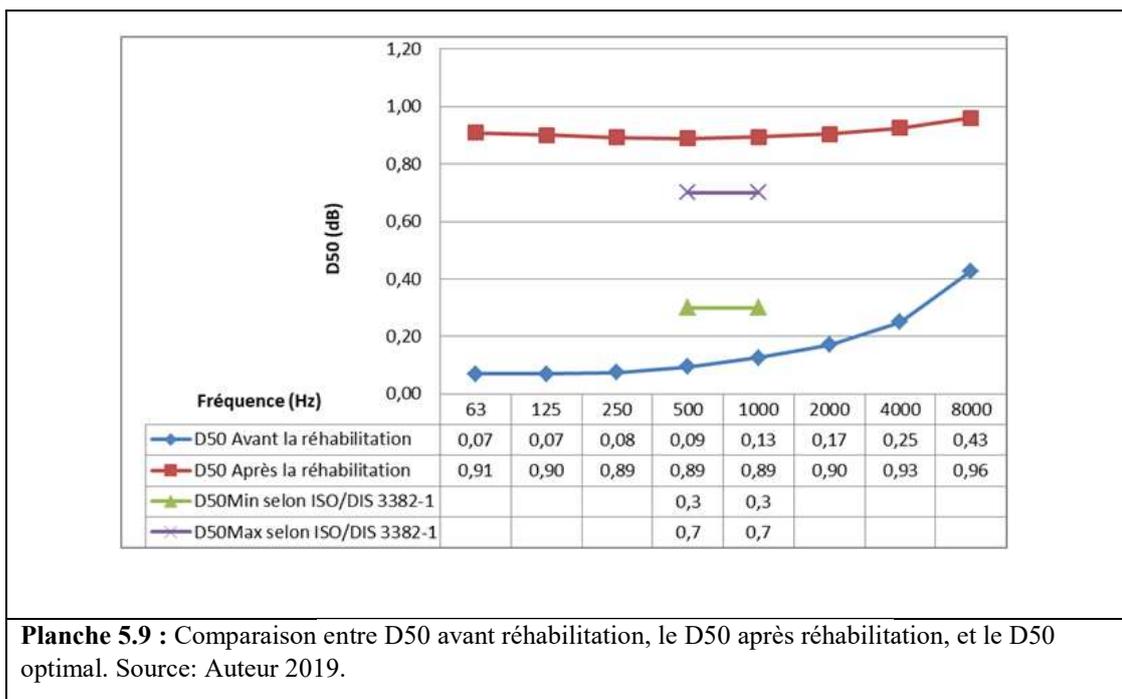
La réhabilitation a eu un impact majeur sur la force d'énergie G, nous remarquons une diminution moyenne de -13 dB, ce qui est en acoustique, très considérable.

Selon ISO3382 les valeurs optimales de l'indice G rentrent dans un intervalle limité par les valeurs (-2 et 10 dB) pour les fréquences (500 Hz et 1000), en comparant les valeurs de la force G après réhabilitation avec les valeurs optimales nous constatons que la réhabilitation a nettement amélioré les valeurs de l'indice G (Planche 5.8).



D. Résultats du critère D50

La valeur du D 50 est de 0,90 sur la totalité des fréquences, nous constatons une augmentation considérable de 0,84 dB après réhabilitation, mais les valeurs du D50 ont dépassé la marge optimale des valeurs du D50 (Planche 5.9).



E. Critère de l'intelligibilité STI

Le dernier indice de l'intelligibilité STI est passé de l'état état très mauvais à un bon état (Tableau 5-6).

Tableau 5-6 : Comparaison du STI avant réhabilitation, le STI après réhabilitation, et le STI optimal.

| | STI avant réhabilitation | STI après réhabilitation | Valeurs optimales des STI selon ISO 3382-1 |
|-----|---------------------------|--------------------------|---|
| STI | 0,38 Très mauvais état | 0,66 bon état | 0 à 0,30 Très mauvaise 0,30 à 0,45 mauvaise 0,45 à 0,60 satisfaisante 0,60 à 0,75 bonne 0,75 à 1 Très bonne |

Conclusion

La simulation acoustique des différents indices, a permis d'établir un diagnostic acoustique détaillé des deux salles de conférences étudiées.

Nous avons constaté que malgré l'amélioration des conditions acoustiques après la réhabilitation, les deux salles présentent encore des problèmes et des défaillances acoustiques.

Pour la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad, l'utilisation des panneaux de BA13 et de la laine de roche a diminué considérablement le temps de réverbération de la salle mais ce dernier reste toutefois, loin du temps de réverbération optimale. La même remarque est valable pour les autres indices (D50, C80, STI, G), ce qui influe d'une manière négative sur la qualité acoustique de la salle.

Pour la salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa, les résultats ont montré que le temps de réverbération a diminué au-dessous du seuil optimal, ce qui a réduit considérablement la diffusion sonore ainsi que la qualité acoustique de la salle.

En conclusion, ces résultats vont pouvoir orienter notre démarche méthodologique pour le prochain chapitre, en vue d'améliorer la qualité d'écoute des deux salles de conférence ; et mettre en place une stratégie adaptée afin de généraliser les solutions préconisées pour l'ensemble des salles de conférences.

**CHAPITRE VI : CORRECTIONS
ACOUSTIQUES DES SALLES DE
CONFERENCE ETUDIEES**

Introduction

Le coefficient d'absorption des matériaux insonorisant est mesuré classiquement en utilisant la méthode de la chambre réverbérante¹ et la méthode du tube d'impédance². La méthode du tube permet de mesurer l'absorption acoustique d'incidence normale sur de petits échantillons avec des conditions de montage qui peuvent avoir une influence non négligeable sur résultats (Vigran T E et al., 1997). La méthode de la chambre réverbérante donne accès au coefficient d'absorption sous une excitation à champ acoustique diffus, c'est-à-dire sous des incidences aléatoires, plus représentative pour l'utilisation de matériaux insonorisant. Les tests de grands échantillons dans des grandes salles comme recommandé par la norme 354 (2003) peuvent néanmoins empêcher l'obtention d'une décroissance du niveau sonore de 60 dB, ce qui emmène les chercheurs à faire des extrapolations de mesures des temps de réverbérations de TR20 et TR30 avec des atténuations respectivement de 20 dB et 30dB entre le niveau maximal du bruit transmis et le bruit ambiant de la salle. Cependant, malgré que les mesures sur de petits échantillons de matériaux conduisent à des résultats d'une plus grande d'absorption que prévu par la théorie (Chrisler V L., 1934) (Anthony Nash., 2012), néanmoins, ces méthodes de mesures notamment dans des maquettes de petite dimensions restent des méthodes largement employés (Robin O et al., 2014) (Duval A et al., 2010) pour estimer l'absorption de nouveau matériaux acoustiques.

Traditionnellement, le matériau absorbant employé dans les bâtiments en tant que solutions acoustiques contenait des laines minérales toxiques ou des matériaux difficiles à recycler. À partir de la fin des années 1990 et au début du XXI^e siècle, nous avons progressivement constaté les avantages de l'utilisation de fibres naturelles; ils ont fourni des propriétés thermiques et acoustiques élevées avec un faible impact sur l'environnement et la santé humaine (Berardi U et Iannace, G., 2017). Au fil des ans, les chercheurs ont mené de

¹ - ISO 354:2003, Acoustics measurement of sound absorption in a reverberation room (International Standard Organization, Geneva, Switzerland, 2003).

- ASTM C423-09a: Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by then Reverberation Room Method (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009)

² - ISO 10534-2, Acoustics determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method (International Standard Organization, Geneva, Switzerland, 1998).

- ASTM E1050-12, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System (ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012).

nombreuses études pour évaluer les propriétés acoustiques d'une multitude de fibres et des matériaux recyclés (voir chapitre IV).

Dans l'étude de Connelly et Hodgson, 2015, des modèles de simulation avec ces nouveaux matériaux ont été utilisés pour montrer comment ces matériaux peuvent améliorer l'acoustique à la fois à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Cette tendance à la recherche de matériaux durables, recyclés et recyclables, qui respecte l'environnement et la santé humaine, gagne de plus en plus en force sur le terrain comme cela a été montré par Pacheco-Torgal F., 2014.

A ce stade de la recherche et du développement de nouveaux matériaux acoustiques durables pour la construction, il n'est pas facile de créer de grandes surfaces d'échantillons. De plus, lors des essais acoustiques de matériaux dans des laboratoires de recherche l'investissement financier est excessif.

Nous commençons ce chapitre par la description de la maquette conçue et réalisée à échelle réduite de la salle de conférence ainsi que les logiciels utilisés pour la simulation numériques et la détermination des caractéristiques des échantillons utilisés. Nous présenterons ensuite les échantillons qui ont fait l'objet de ces études à savoir le panneau perforés mixte MDF-paille et panneau traditionnel d'Alfa. Nous évaluerons le coefficient d'absorption acoustique de ces nouveaux matériaux durables à travers la méthode de la chambre réverbérante afin d'utiliser ces valeurs dans des simulations et montrer leur comportement acoustique dans les salles de conférence étudiées.

6.1. Matériaux de revêtement proposés

Les matériaux de revêtement proposés sont faits à partir des matériaux locaux, largement abondants avec des prix dérisoires et pas nocif pour la santé. Le seul cout que présentent ces matériaux de revêtement c'est leur mise en forme sous forme de panneaux acoustiques, mais leur cout reste largement intéressant par rapport aux matériaux importés. Les matériaux proposés sont l'Alpha, largement répondu au vaste sud de l'Algérie et la paille qui est un produit agricole issu de la culture de céréales.

6.1.1. Mesures effectuées dans la chambre réverbérante à travers la maquette acoustique

6.1.1.1. Présentation de la maquette acoustique:

Dans le but d'avoir les performances acoustiques de la salle de conférence de la maison de culture Malek Haddad à travers sa modélisation physique, le laboratoire d'architecture De l'Université de Constantine 3 a développé une maquette de taille réduite dont l'échelle (1/20 ème). Ces maquettes sont fréquemment adoptées par les architectes pour leurs modèles de salles. Une reproduction similaire de la salle est cruciale pour la détermination de l'absorption α qui affecte principalement le temps de réverbération de la salle.

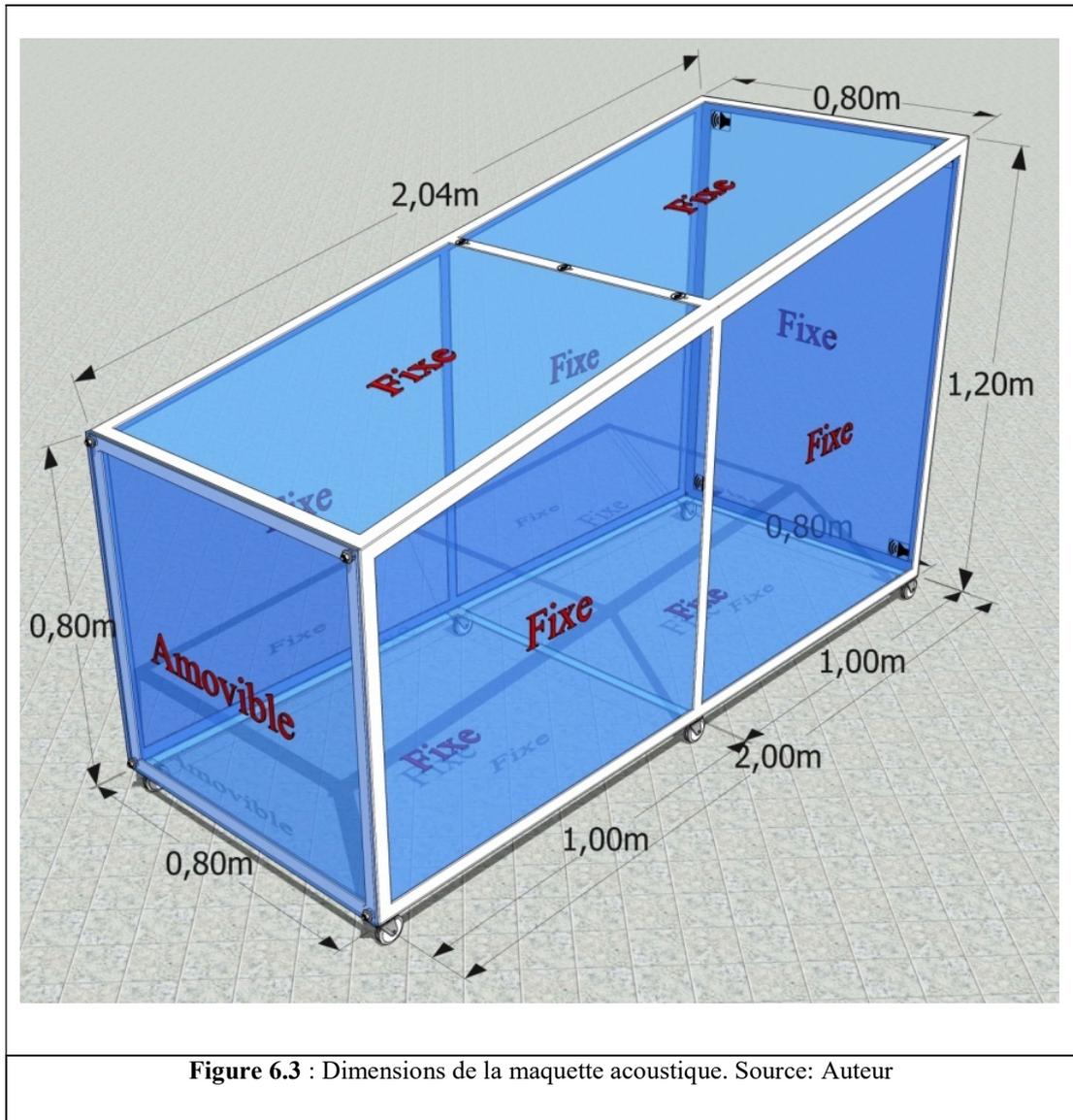
La salle utilisée pour les mesures est une maquette d'une salle de conférence d'une capacité de 300 places à l'échelle 1/20. Il s'agit d'un volume en verre clos (épaisseur 10 mm) soutenue par une ossature métallique (**exosquelette**) en fer plat de 30×4 mm² (Fig6.1), la salle simulée est obtenue à travers une enveloppe recouverte totalement en verre (Fig6. 2), avec les dimensions [2,00 × 0,80] m² à la base, 1,2 m de hauteur d'un côté et de 0,8 m, de l'autre (Fig6.3).



Figure 6.1 : Ossature métallique de la maquette. Source: Auteur.



Figure 6.2 : Maquette acoustique en verre. Source: Auteur



La chambre a été équipée d'un panneau en verre amovible pour son état initial qui peut être remplacé par d'autres panneaux envisageables pour de futurs essais.

Des trous de 8mm de \varnothing sont percés et réservés aux câbles des hauts parleurs au fond de la pièce, des récepteurs au milieu de la chambre, et d'autres au milieu réservés aux câbles des microphones. (Fig6.4) et (Fig6.5).

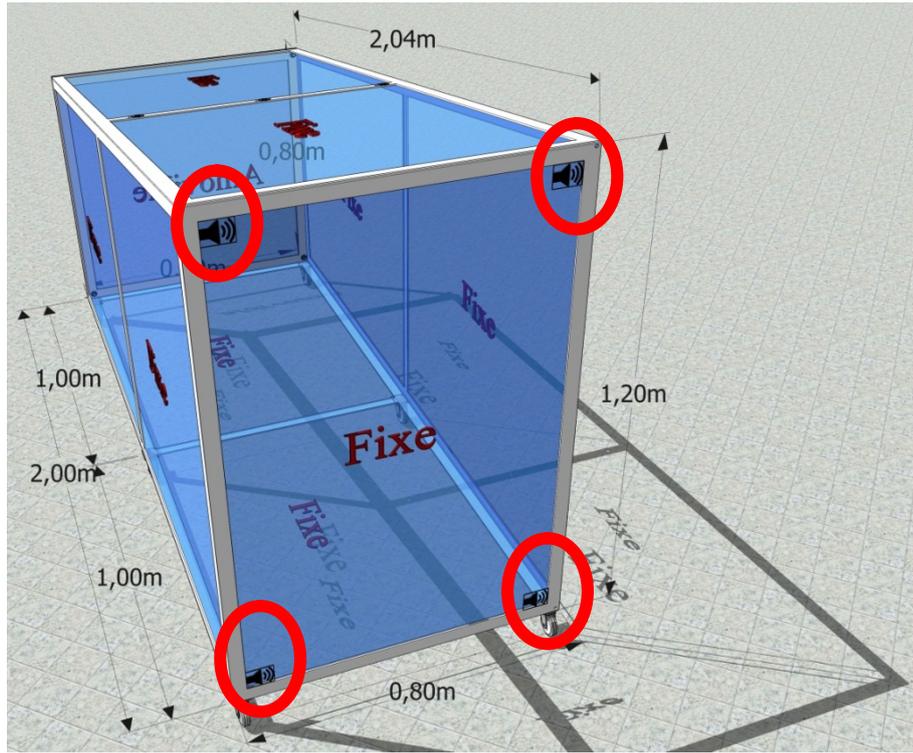


Figure 6.4 : Position des trous réservés aux câbles des hauts parleurs. Source: Auteur

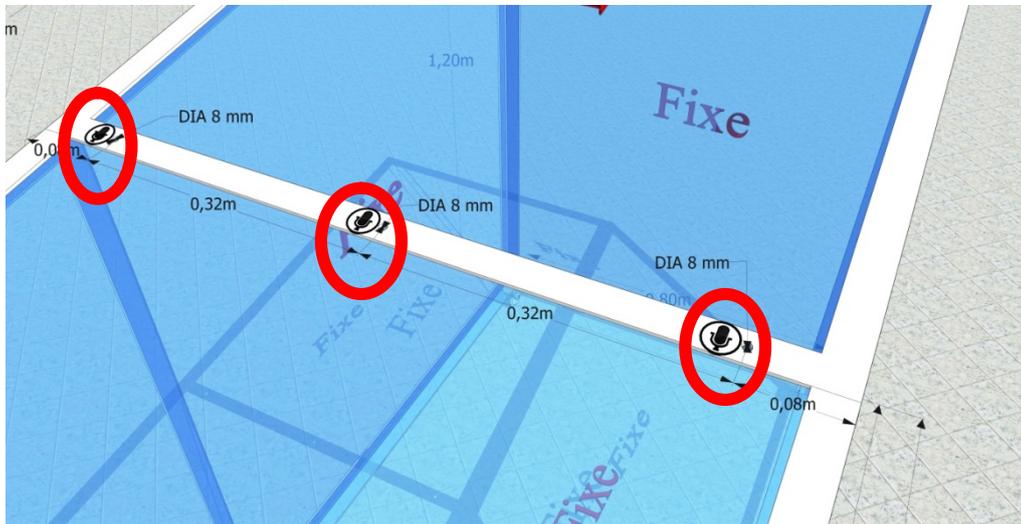


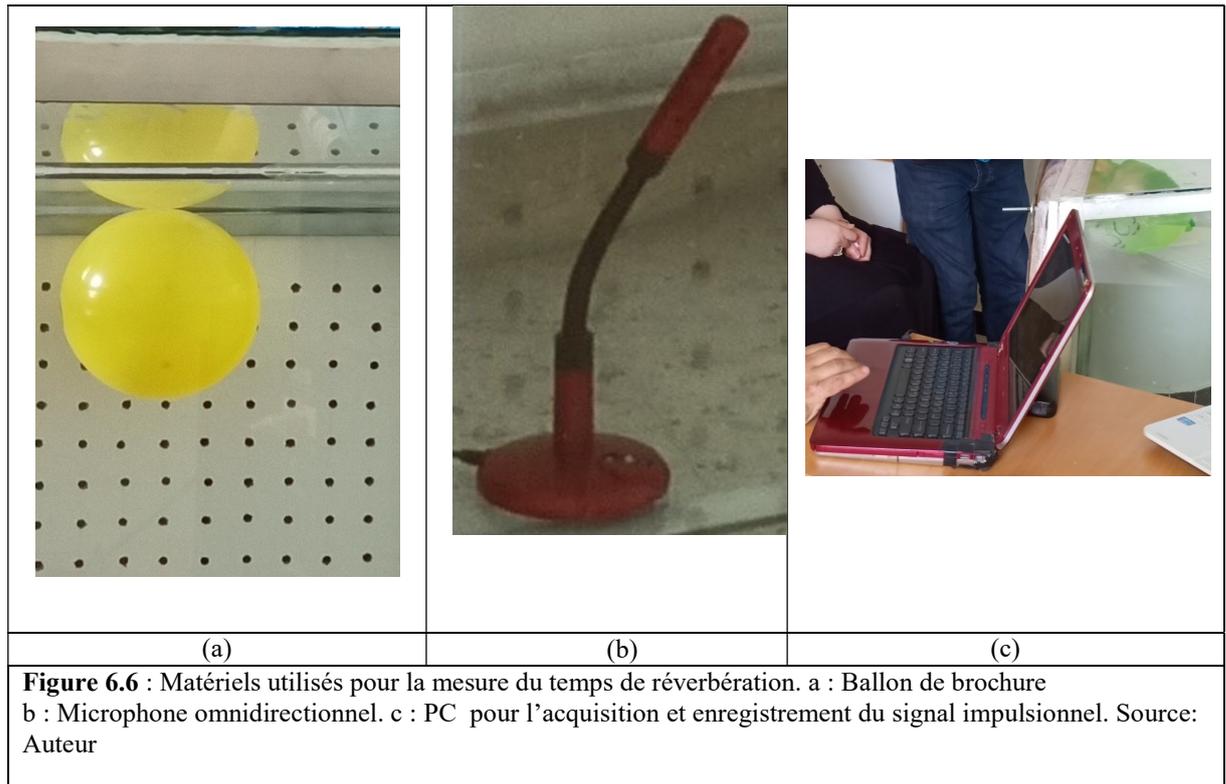
Figure 6.5 : Position des trous réservés aux câbles des microphones. Source: Auteur

6.1.1.2. Description du Matériel et de la méthode de mesure utilisés

Les mesures des temps de réverbérations ont été effectuées, à l'aide d'une Source d'émission pour simuler un son impulsionnel (**ballon de brochure**)³(Fig6.6.a) placée dans un coin de la pièce et dirigée vers le coin opposé en diagonale. Cette explosion donnera un son impulsionnel d'un niveau d'intensité important à l'intérieur de la chambre réverbérante. Une réverbération s'ensuit et qui se traduit par une décroissance du niveau sonore en fonction du temps. La vitesse de la décroissance de ce niveau sonore sera proportionnelle à l'absorption des parois internes de la chambre ce qui nous renseignera sur le coefficient d'absorption de la chambre.

Cette décroissance du niveau sonore sera ensuite enregistrée par le microphone omnidirectionnel de type VoIP 6 mm de sensibilité -40 dB avec une bande fréquence (100 -12000 Hz) (Fig6.6.b), Le microphone est placé à une hauteur de 0,06 m l'équivalant à une hauteur de 1,20 à l'échelle réelle, on peut noter que ces dimensions respecte l'échelle de la maquette à un rapport de 1/20^{ème}. Ce microphone a été branché à un PC sous Windows 7 pour un enregistrement du signal de décroissance (Fig.6.6.c). Ce signal sera ensuite traité par le logiciel Spectra RTA pour la mesure du temps de réverbération et la déduction de l'absorption de la chambre.

³ Dans les mesures acoustiques d'une pièce standard, une source omnidirectionnelle doit être utilisée, mais aucune source omnidirectionnelle adaptée au modèle réduit n'est disponible.



6.1.1.3. Logiciel Spectra RTA utilisé pour la mesure du temps de réverbération

Sound Technology Spectra RTA est un logiciel de Shareware dans la catégorie Divers développé par Sound Technology Spectra RTA.

SPECTRA RTA est un logiciel analyseur Temps-Fréquence dans le domaine acoustique en temps réel. L'analyse se fait en bande d'octave, 1/3 d'octave et même en 1/10 d'octave. L'analyse de bruit peut être faite également en analyse FFT à bande étroite à haute résolution (Fig6.7).

SPECTRA RTA permet de réaliser des mesures du temps de réverbération RT60 en enregistrant la décroissance d'un son impulsionnel bref comme l'explosion d'un ballon ou pistolet ou avec un bruit rose (signal multifréquence) généré dans une salle. L'enregistrement du signal en un fichier wav qui servira à l'analyse de la réponse impulsionnelle.

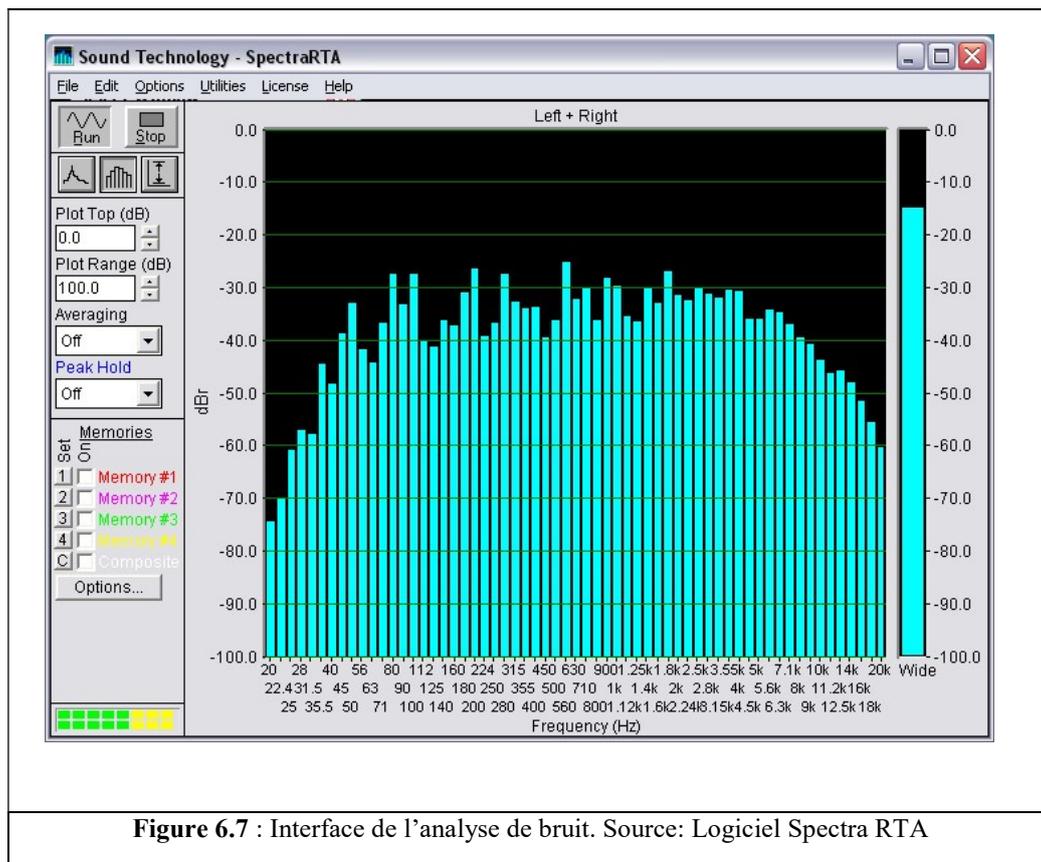


Figure 6.7 : Interface de l'analyse de bruit. Source: Logiciel Spectra RTA

6.1.1.4. Procédure de mesure et de calcul du coefficient d'absorption des matériaux

Une fois le matériel installé dans la chambre, on place le micro à la position d'écoute réelle. Au moment où on lance le logiciel SPECTRA RTA en analyse de RT60, le ballon est explosé donnant une impulsion sonore brève et puissante qui excitera l'ensemble des parois. Le système de mesure (logiciel) permet de récupérer le signal au point donné de la chambre où l'on a placé le microphone. L'enregistrement se fait sur une durée de 3 à 5 secondes suivant l'absorption de la chambre. Le RT60 est ensuite calculé sur plusieurs bandes de fréquence en bande d'octave. On obtient ensuite des courbes de décroissance du niveau sonore comme le montre la figure ci-dessous (Fig6.8) (Remram Y., 2015). La mesure du RT60 est effectuée à partir de la durée de la décroissance du niveau sonore du signal entre le niveau initial correspondant au pique du signal enregistré et l'atténuation du niveau sonore du signal de 60 dB.

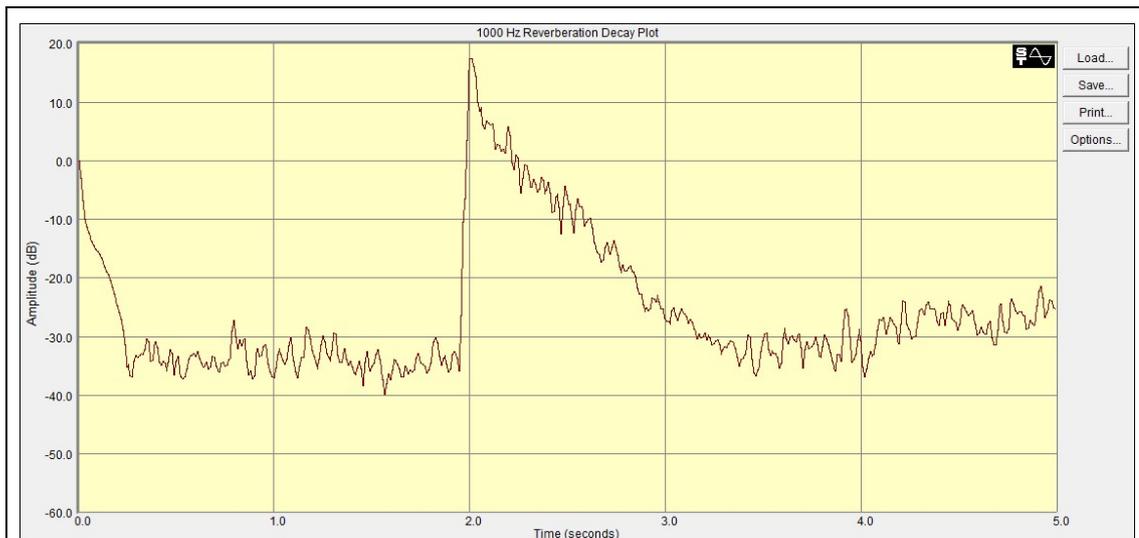


Figure 6.8 : Enregistrement du temps de réverbération à la fréquence 1000 Hz. Source: Logiciel Spectra RTA.

L'enregistrement s'est fait sur 5 secondes et l'explosion s'est produite aux environs de 2 secondes après le lancement de l'enregistrement par le logiciel Spectra RTA. Le niveau de l'explosion au-dessus du bruit de fond de la salle est d'environ 50 dB et la décroissance est pratiquement linéaire en fonction du temps. Pour mesurer le temps TR60 sur une durée de 60 secondes, une extrapolation de la courbe de 20 dB de plus est nécessaire comme le montre la figure (Fig6.9).

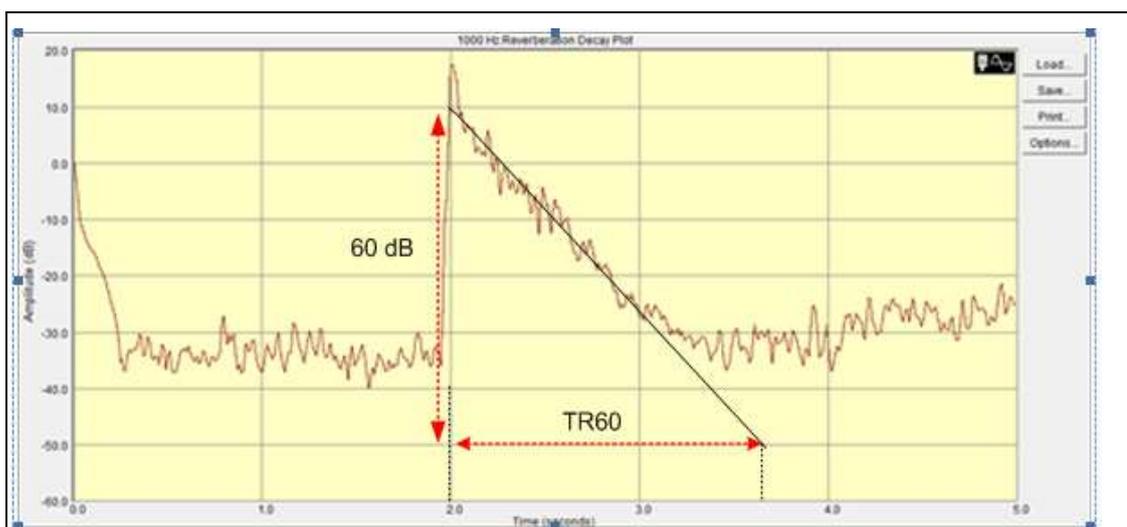


Figure 6.9 : Procédure d'extrapolation de la décroissance de la courbe de réverbération. Source: Logiciel Spectra RTA.

L'extrapolation était nécessaire car l'explosion n'est pas assez puissante pour avoir le niveau de 60 dB au-dessus du bruit de fond de la salle c'est-à-dire 1000 fois le bruit de fond de la salle sachant que

$$\text{Niveau du son} = 20 \log \frac{\text{signal explosion}}{\text{bruit de fond}}$$

On peut noter que le temps de réverbération Tr_{60} est d'environ 1,60 seconde après extrapolation de la courbe de décroissance.

Généralement pour les grandes salles où il est très difficile d'obtenir un niveau sonore très important, les temps de réverbération se mesurent avec TR_{30} (c'est-à-dire 30 secondes après le pique) puis sont multipliés par deux pour obtenir le RT_{60} .

À titre d'information on peut également avoir les enregistrements dans l'octave de 500 Hz, 2000 Hz (Fig6.10).

Sachant que le temps de réverbération est lié à l'absorption du matériau et donc du coefficient d'absorption, l'expression du temps de réverbération est donnée par la formule suivante:

$$t_1 = \frac{0.16V}{A}$$

Où t représente le temps de réverbération, V le volume de la salle et A l'absorption du matériau qui peut être aussi exprimée par la formule :

$$A = \alpha \times S$$

Où α est l'absorption du matériau, et S sa surface

Cette méthode peut être utilisée si on rajoute un autre matériau dont le coefficient d'absorption est α' et d'absorption δA dans la salle ayant une absorption A , la formule de Sabine devient :

$$t_2 = \frac{0.16 V}{A + \delta A}$$

t_1 : temps de réverbération de la salle

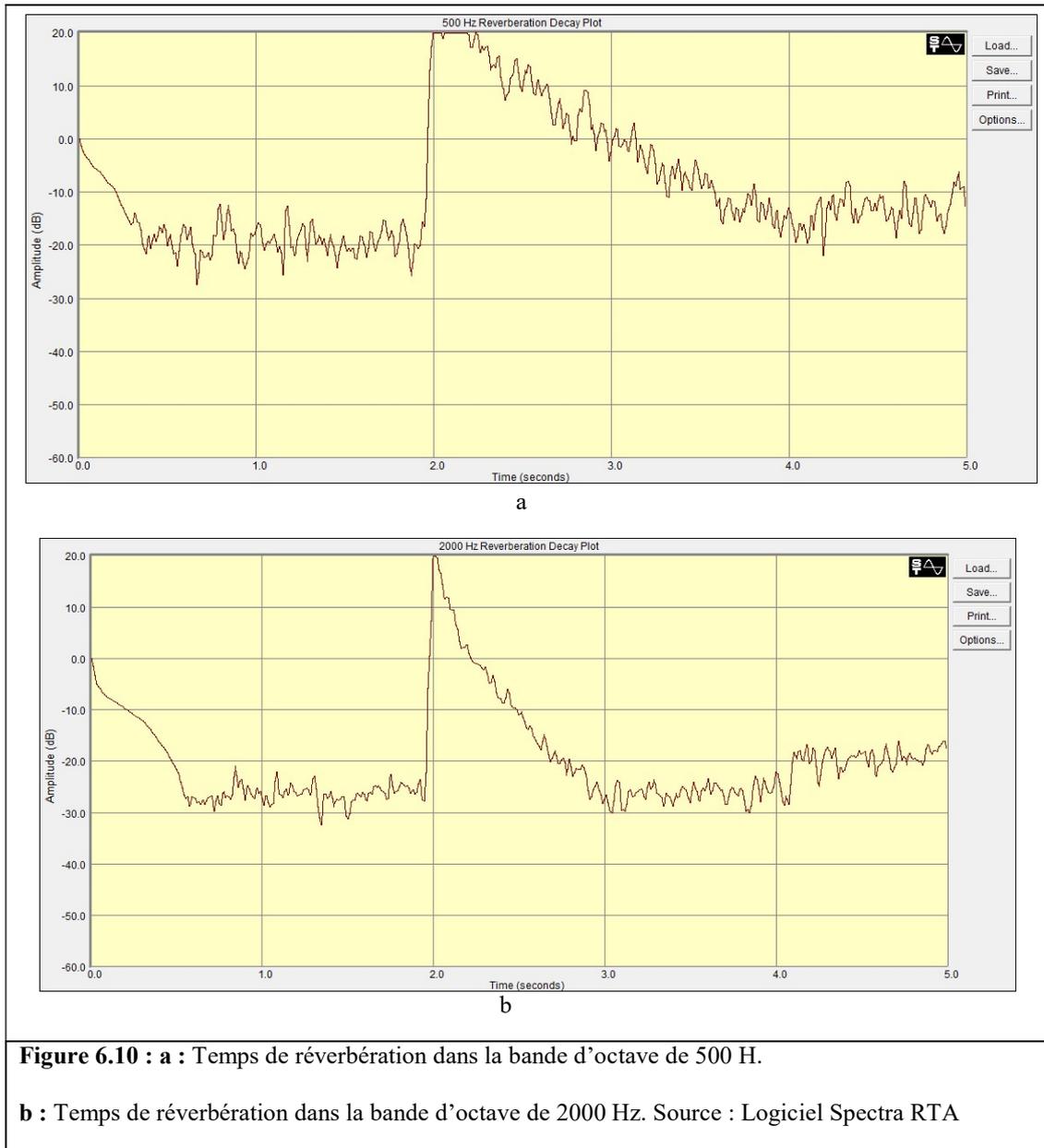
t_2 : temps de réverbération de la salle avec extra absorption

La combinaison des deux formules citées précédemment donne l'extra-absorption ;

$$\delta A = 0.16 V \left[\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right]$$

Finalement, l'absorption α de l'échantillon est calculée en divisant l'absorption δA par la surface de l'échantillon S

$$\alpha = \frac{\delta A}{S}$$



6.1.2. Echantillons proposés et utilisés dans les mesures

L'objectif de cette étude est de mesurer les propriétés d'absorption acoustiques des échantillons préparés pour cette étude. Les échantillons formés de matériaux locaux qu'on a choisis sont une alternative aux panneaux acoustiques importés très coûteux surtout lorsqu'il s'agit de revêtir des grandes salles comme la salle de conférence du palais de culture Malek Hadad. Ces matériaux ont l'avantage de respecter l'environnement, non toxique et facile à mettre en œuvre. Cette étude sur le comportement acoustique de ces matériaux peut être complétée plus tard pour déterminer l'efficacité de ces matériaux comme la porosité, torsiosité, résistance à l'écoulement, critère de sécurité incendie etc. Nous présentons dans cette étude deux types de panneaux, le premier est un panneau acoustique mixte MDF perforé-paille et le deuxième un panneau acoustique d'Alfa.

6.1.2.1. Panneau acoustique mixte MDF perforé-paille

Un panneau acoustique mixte MDF perforé-paille a été spécialement construit pour cette étude. Nous avons voulu montrer sa faisabilité et son efficacité en vue de le proposer comme un matériau candidat pour les futurs revêtements des salles en acoustiques en Algérie.

6.1.2.2. Présentation des caractéristiques acoustiques de la paille

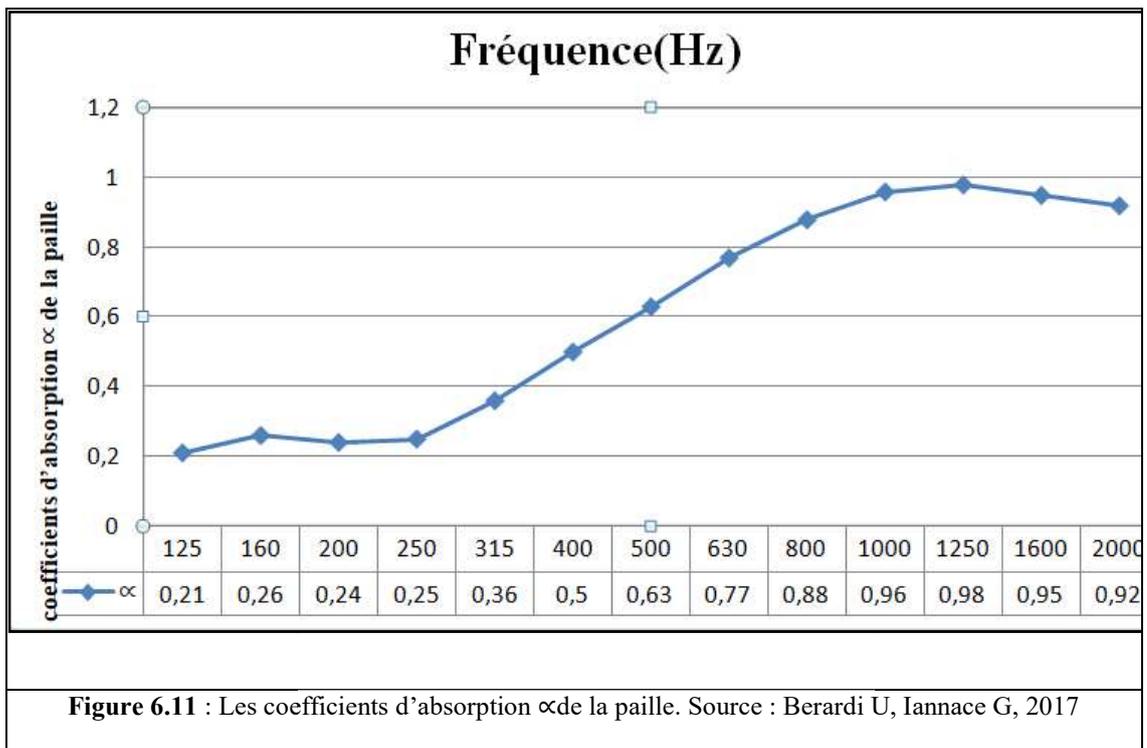
La paille de céréales, sous-produit des cultures agricoles, est utilisée comme litière pour une variété d'animaux domestiques et une denrée précieuse dans l'industrie équine. La paille est également utilisée comme paillis par les propriétaires, les paysagistes et les petits producteurs de fruits. Les jardins, le gazon nouvellement semé et les plantations de fraises sont quelques-unes des zones souvent paillées avec de la paille. Les services routiers utilisent également de la paille comme paillis le long des routes. De plus, les ballots de paille peuvent servir de barrières au ruissellement sur les chantiers de construction de routes et de bâtiments. La paille est également utilisée comme milieu de culture dans la production de certains champignons gastronomiques (Palmieri N et al., 2017).

En Algérie, au même titre que le concentré, la paille, sous-produit de la céréaliculture est une ressource clé des systèmes alimentaires des herbivores. Elle se stocke, s'achète sur les marchés et joue le rôle d'aliment de secours en voyage en cas de disette des régions agricoles vers les régions pastorales.

La grande disponibilité de la paille résultant du sous-produit agricole a souvent conduit à considérer ce matériau pour des applications de construction. Les performances de

résistance thermique de la paille ont conduit dans nombreux cas à adopter cette fibre comme matériau principal dans les enveloppes du bâtiment.

Plusieurs recherches ont étudié les caractéristiques acoustiques de la paille. Les coefficients d'absorption acoustique de la paille ont été définis comme le montre la (Fig6.11). (Berardi U, Iannace G., 2017).



Afin de donner les meilleurs résultats en tant que matériau de construction, la paille doit être sèche (teneur en humidité inférieure à 20%, calculée en pourcentage du poids total de la balle) et compacte, afin de rester raide lorsque des charges sont appliquées (Sabapathy Karthik A, Gedupudi Sateesh., 2019).

6.1.2.3. Préparation de l'échantillon constitué d'un panneau acoustique mixte MDF-paille

L'échantillon parallélépipédique est composé de la paille d'une densité de 80kg/m^3 et de dimensions de $0,80 \times 0,80 \times 0,1$ m. La paille recueillie dans la balle a d'abord été pesée donnant un poids de 5,12 kg pour le volume de $0,064\text{ m}^3$ et placée dans le tissu de mousseline très fin en coton perméable aux ondes acoustiques. Elle a en suite été soumise à une compression mécanique entre un contreplaqué d'un côté et un panneau MDF épais 10

mm perforé à 15% de l'autre côté à l'aide de quatre vis et écrous, jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaitée (Fig6.12).

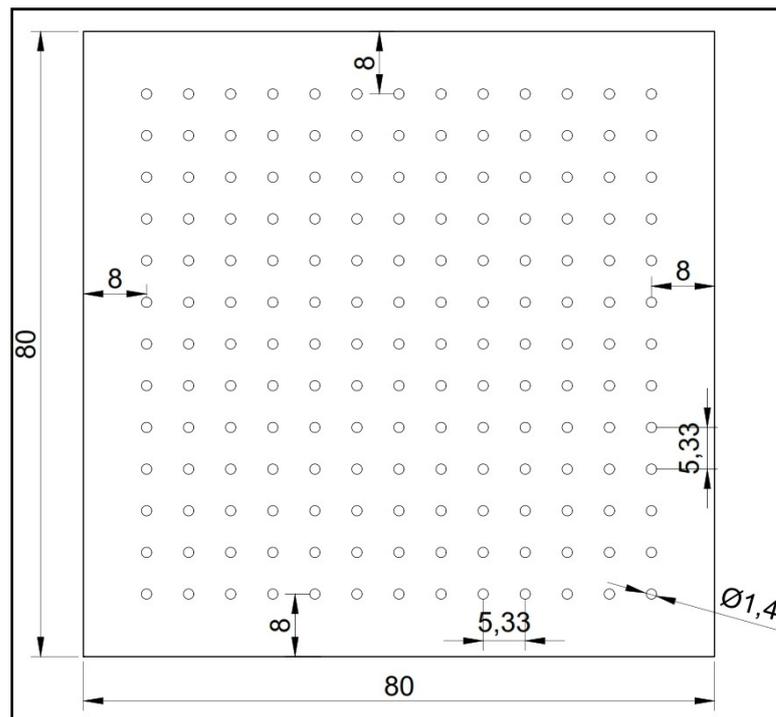


Figure 6.12 : Panneau acoustique mixte MDF-paille. Source: Auteur

6.1.2.4. Panneau acoustique de l'Alfa

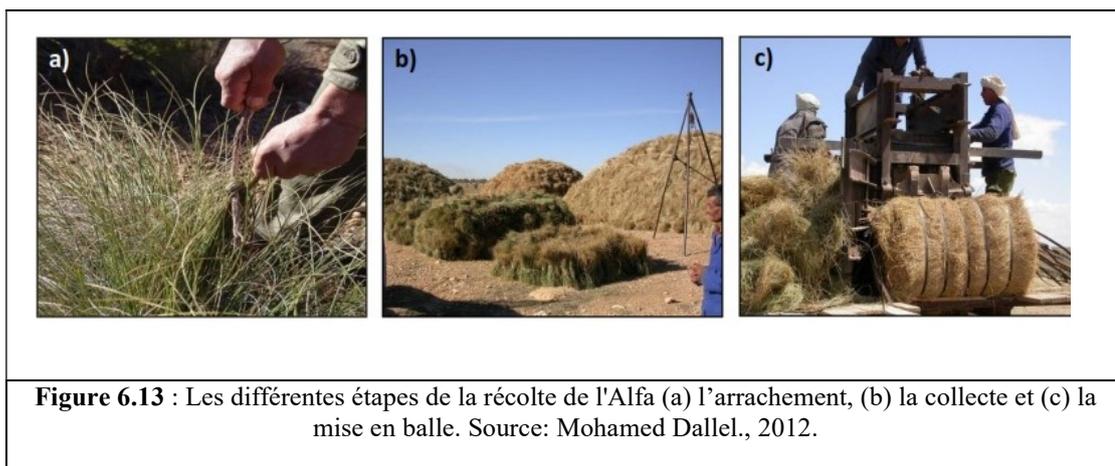
Nous présentons dans cette étude le panneau de l'Alfa qui semble donner des résultats intéressants vu sa porosité, sa faible densité et sa disponibilité locale.

6.1.2.5. Présentation du matériau Alfa

L'alfa, *Stipa tenacissima* L, est l'une des graminées pérennes dominantes, typiques des parcours steppiques maghrébins (El-Abbassi F E et al., 2020). C'est une essence très robuste, raide, sèche très persistante. Elle se présente en touffes denses, à feuilles longues et coriaces, l'inflorescence est longue (30cm) très fournie. L'alfa comprend une partie souterraine très importante pour la régénération et une partie aérienne atteignant 1m de hauteur.

L'exploitation et l'utilisation de l'Alfa paraissent remonter à la plus haute antiquité. L'industrie de la sparterie existait à Carthage. Pline décrit les opérations de récolte qu'il a observées en Espagne. L'arrachage était fait à la main, en se servant comme aujourd'hui encore du bâtonnet (Fig6.13).

Cependant, l'essor véritable de l'Alfa en tant que plante industrielle de large utilisation date de la fin du XIX^e siècle lorsque, grâce au procédé Routledge, les papeteries écossaises purent l'utiliser comme matière première pour la fabrication de la pâte à papier (Laumont P et Berbigier A., 1953).

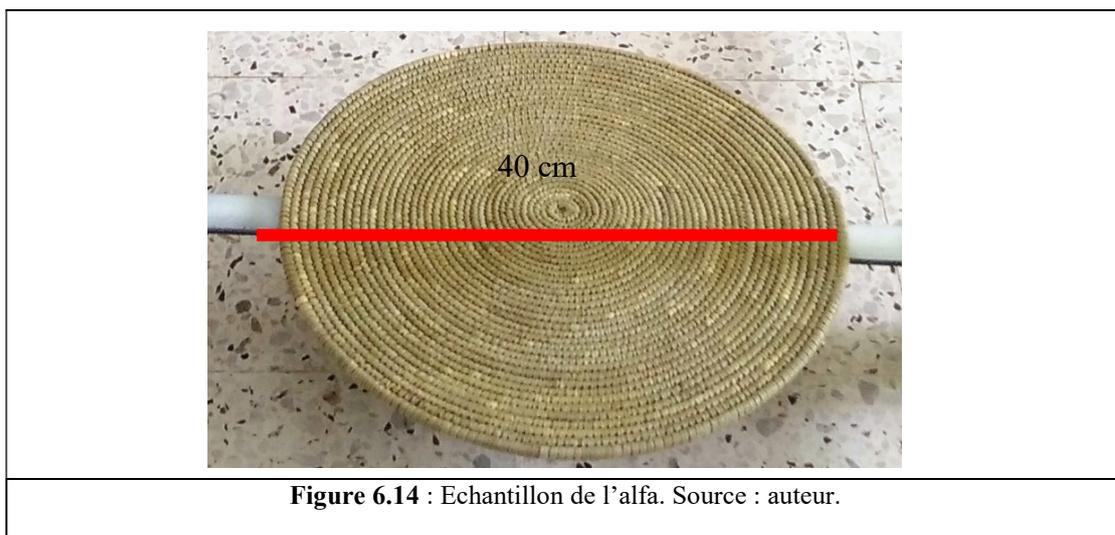


Par ailleurs, c'est l'une des espèces xérophiles qui caractérisent le mieux les milieux arides méditerranéens à l'exclusion des secteurs désertiques. Sa terre d'élection est l'Afrique du Nord, et tout particulièrement les hauts plateaux de l'Algérie et du Maroc. Mais cette espèce est présente aussi en Espagne, au Portugal, aux Baléares, et elle s'étend vers l'est jusqu'en Égypte en passant par la Tunisie et la Libye. En France, elle serait présente uniquement dans le département du Var. Au sud et à l'est, la limite naturelle de l'Alfa est déterminée par la sécheresse en bordure du Sahara. En revanche, au nord et à l'ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui l'élimine de la flore, elle est beaucoup plus rare dans les étages subhumides et surtout humides (Rhanem Mustapha., 2009) (Le Houérou Henry Noël., 1995). La répartition territoriale est estimée à : - Algérie: 4.000.000 ha.- Maroc:

3.186.000 ha- Tunisie: 600.000 ha. - Lybie: 350.000 ha. - Espagne: 300.000 ha (Mohamed Dallel., 2012).

6.1.2.6. Préparation de l'échantillon de l'Alfa

Nous avons demandé à un artisan de nous préparer l'échantillon de l'alfa selon la méthode traditionnelle. Les fibres ont été lavées et séchées avant l'utilisation, l'échantillon a été confectionné d'un tube plein composé de plusieurs fibres de l'alfa qui tourne autour d'un centre en s'en éloignant. Ce qui nous donne une forme onduleuse ronde d'un diamètre de 40 cm (Fig6.14).



6.1.2.7. Caractéristique de la maquette et des échantillons d'essais

Tableau 6.1 : Caractéristique de la maquette et des échantillons d'essais

| | |
|--|-----------------------|
| Surface des vitres de la maquette | 8.8 m ² |
| Surface panneau de l'Alfa | 0.125 m ² |
| Epaisseur du panneau de l'Alfa | 8 mm |
| Densité du panneau de l'Alfa (poids/volume) | 99.4Kg/m ³ |
| Surface panneau acoustique mixte MDF -paille | 0.64 m ² |
| Epaisseur panneau acoustique mixte MDF -paille | 0.11m |
| Epaisseur panneau acoustique mixte MDF -paille | 80 Kg/m ³ |
| Volume de la maquette | 1.60 m ³ |

6.1.3. Résultats et interprétation des mesures

Dans ce qui suit, nous donnerons les résultats préliminaires obtenus dans cette étude. On peut noter que c'est une étude originale qui a été entreprise dans le cadre de ce travail. Notre contribution est de valoriser les matériaux locaux en vue de les déployer à une grande échelle.

6.1.3.1. Maquette vide sans revêtement

Les résultats obtenus dans le cas de la maquette vide (Planche 6.1) montrent que le temps de réverbération moyen varie entre 0.77 seconde pour la fréquence 315 Hz et 0.7 seconde pour la fréquence 8000Hz, alors que le coefficient d'absorption α varie entre 0.004 à 315Hz et 0.007 à 8000Hz. Ce coefficient d'absorption est celui du verre utilisé pour le montage de la maquette, très proche du coefficient trouvé dans la littérature(Fig6.15) (Couasnet Yves., 2005), ce qui démontre la validité de la méthode expérimentale. On peut noter que la mesure a été effectuée à deux reprises pour prendre ensuite la moyenne des deux résultats du temps de réverbération. En effet, dans les mesures acoustiques il est préférable de faire des mesures du temps de réverbération sur cinq endroits de la salle, les extrémités (les quatre coins de la salle plus le centre). Dans le cas de notre maquette, les distances ne sont pas trop importantes donc on peut considérer que la répartition du son est quasi-uniforme. L'énergie dissipée dans les fréquences graves est faible par conséquent, la réponse est quasi-aléatoire.

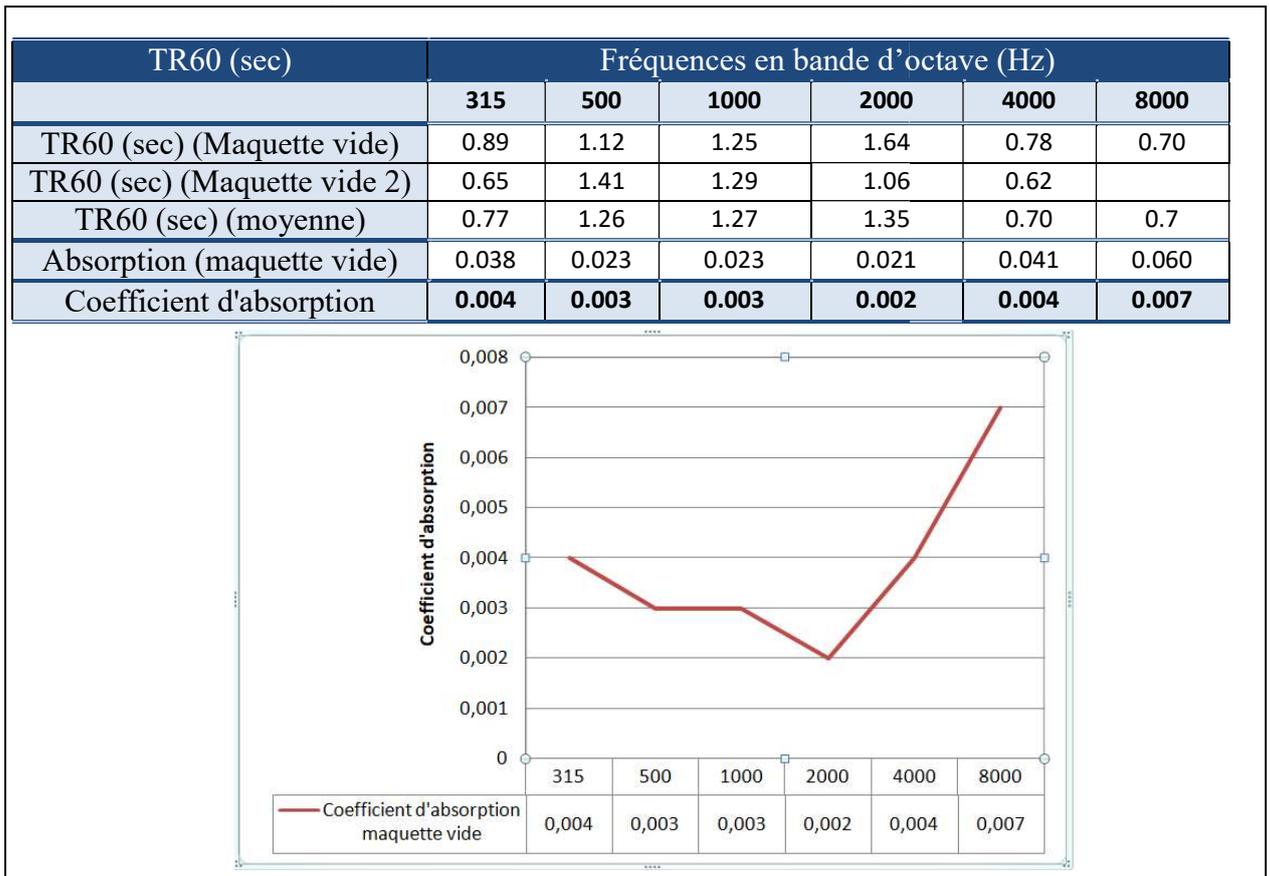


Planche 6.1 : Coefficient d'absorption dans le cas de la maquette vide. Source: Auteur.

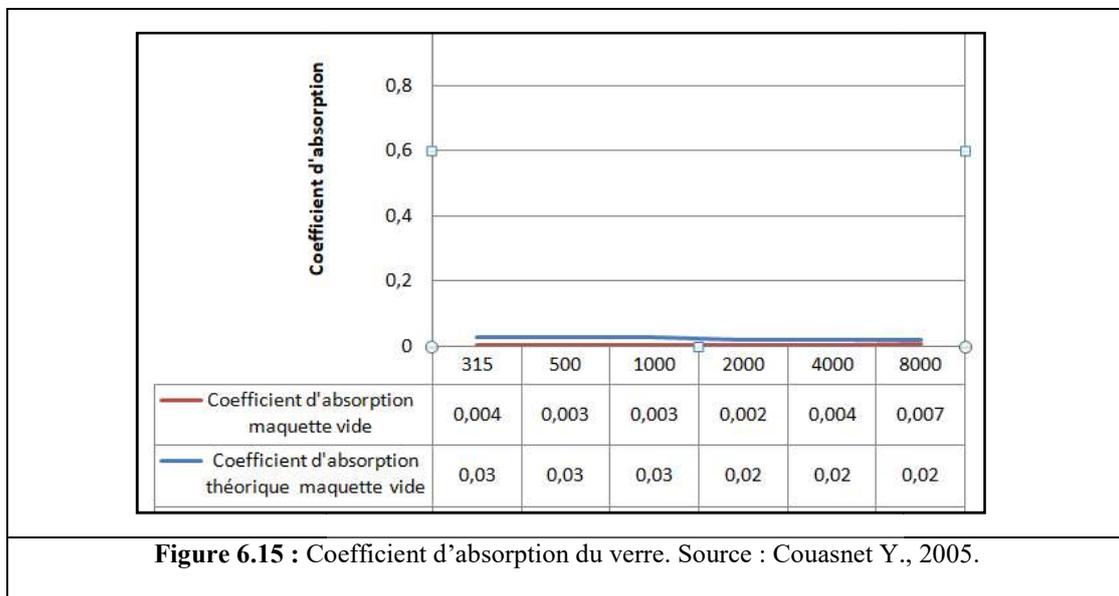


Figure 6.15 : Coefficient d'absorption du verre. Source : Couasnet Y., 2005.

6.1.3.2. Maquette recouverte d'un Panneau mixte MDF perforés-paille

Un panneau perforé se comporte comme un résonateur composé d'un goulot de section S et de longueur L (dans notre cas c'est un trou donc $L=1\text{cm}$) communiquant à un volume interne V . lorsqu'une onde met en vibration le matériau contenu dans le volume qui absorbe cette dernière. Le comportement général de l'absorption acoustique du panneau

acoustique composite composite de l' MDF perforé et la paille est représenté par la planche (Planche 6.2). Nous remarquons que le coefficient d'absorption a nettement augmenté. Pour la maquette vide le coefficient (pour le verre de montage de la maquette) varie entre 0.004 (315 Hz) et 0.007 (8000) alors que le coefficient du panneau acoustique composite composite (MDF+ paille) varie entre 0.14 (315 Hz) et 0.36 (8000).

Nous remarquons encore que le coefficient d'absorption acoustique du panneau testé a augmenté d'une manière considérable au-dessus de 3000Hz ce qui signifie que la meilleure performance du panneau composite se situe dans la plage des hautes fréquences (Elwaleed A K et al., 2015), ce qui est justifié par l'utilisation de la paille, un matériau poreux qui absorbe fortement les fréquences élevées (voir chapitre II). Notons que l'absorption en basse et moyenne fréquence peut être considérablement améliorée lorsque l'épaisseur du panneau et la distance entre le panneau et le mur augmente.

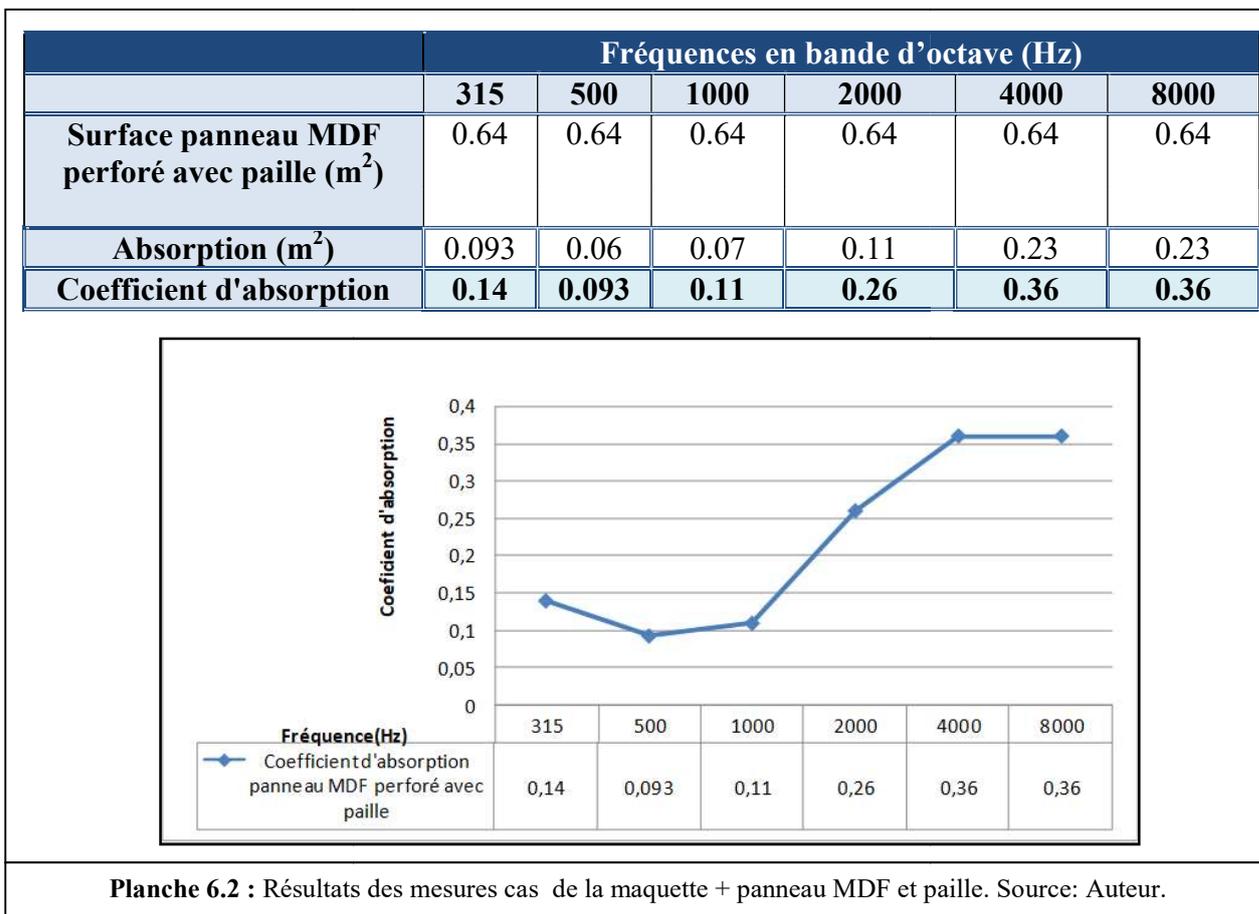


Planche 6.2 : Résultats des mesures cas de la maquette + panneau MDF et paille. Source: Auteur.

6.1.3.3. Panneau recouverte d'un Panneau acoustique de l'Alfa

Les résultats montrent que le coefficient d'absorption de l'alfa est très important surtout dans la marge des fréquences moyennes et élevées, il atteint sa valeur maximale de 0,83 à la fréquence de 3000 Hz (Planche 6.3).

La meilleure performance d'absorption acoustique de l'alfa se situe dans la plage des moyennes et hautes fréquences, ceci est dû à sa surface et sa structure ondulée (Fig6.16). L'onde incidente frappe la surface du panneau, une partie d'énergie sera réfléchiée par le panneau à cause de la différence d'impédance acoustique entre l'air et le matériau ensuite une autre partie d'énergie sera absorbée par le matériau sous forme de dissipation de chaleur et enfin une partie d'énergie sera transmise de l'autre côté de l'échantillon. La dissipation d'énergie qui nous intéresse dans le matériau dépend de la porosité, de sa densité mais également de la distance du panneau par rapport au mur.

| Résultats | Fréquences en bande d'octave (Hz) | | | | | |
|--|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 315 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Surface du panneau de l'Alfa (m ²) | 0.101 | 0.101 | 0.101 | 0.101 | 0.101 | 0.101 |
| Absorption (m ²) | 0.097 | 0.0032 | 0.026 | 0.082 | 0.083 | 0.083 |
| Coefficient d'absorption de panneau d'Alfa | 0.096 | 0.032 | 0.26 | 0.82 | 0.83 | 0.83 |

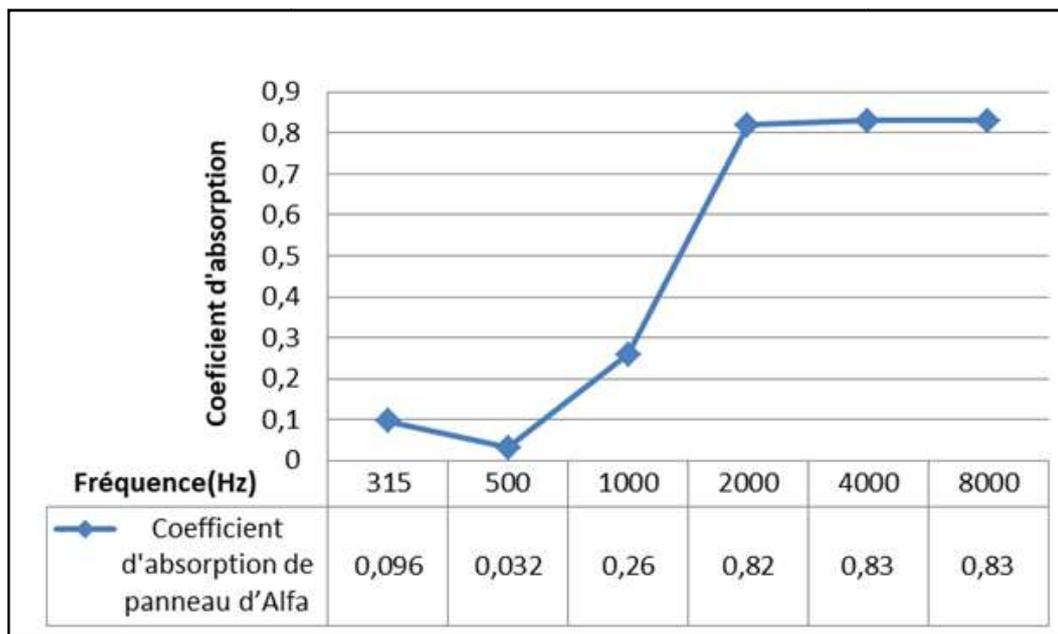


Planche 6.3 : Résultats des mesures cas de la maquette +Panneau acoustique de l'Alfa. Source: Auteur.

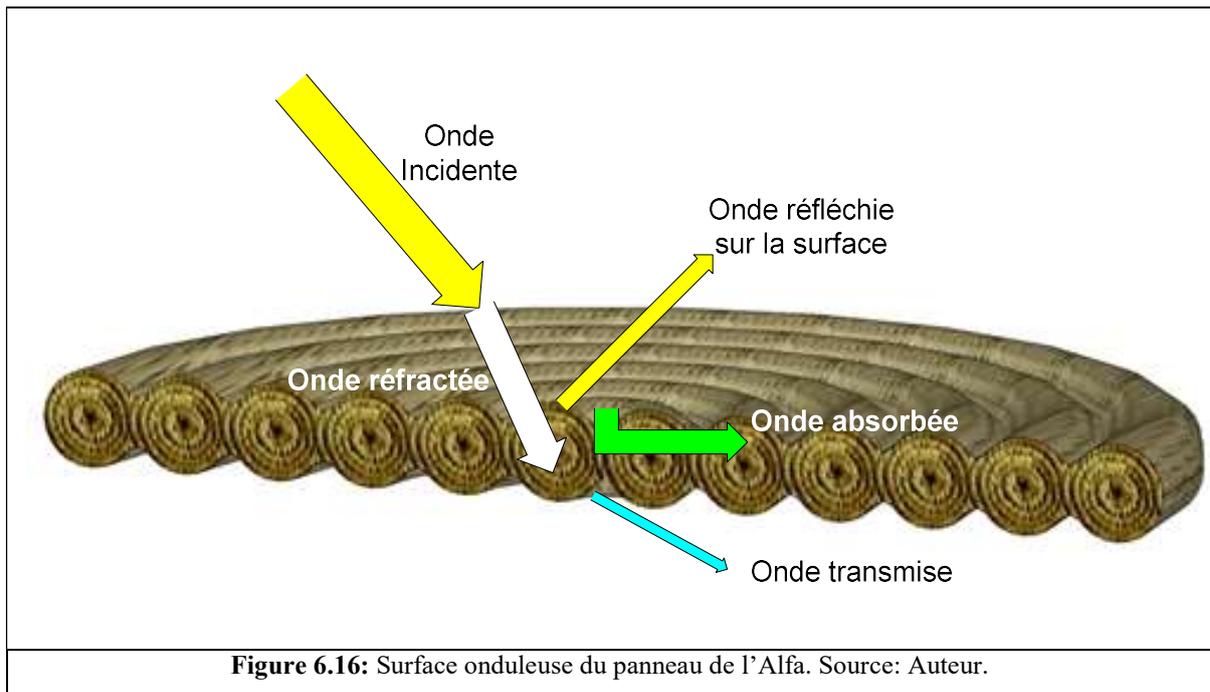


Figure 6.16: Surface ondulée du panneau de l'Alfa. Source: Auteur.

6.2. Essais des corrections acoustiques sur les salles de conférence étudiées

Afin d'améliorer le comportement acoustique des salles de conférences étudiées, l'introduction d'une série de mesures correctives est proposée dans le but d'apporter une amélioration acoustique mais également proposer des solutions ayant un bon rapport cout/performance et en plus écologique que ceux employés comme la laine de verre et la laine de roche et qui demande beaucoup d'énergie de fabrication.

6.2.1. Corrections proposées pour la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad.

6.2.1.1. Application du panneau acoustique mixte MDF-paille

La proposition de réhabilitation acoustique est basée sur l'introduction d'un revêtement absorbant constitué d'un panneau acoustique mixte MDF-paille placé dans des zones acoustiquement stratégiques comme l'arrière de la salle (Fig6.17). Cette solution réduit le temps de réverbération pour. L'amélioration de ce dernier influe directement sur d'autres paramètres acoustiques tels que l'intelligibilité de la parole, la clarté, la réduction de l'énergie des longues réflexions et l'augmentation du rapport signal sur bruit aux différents points de réception. L'agencement des matériaux proposés pour le conditionnement acoustique de la salle est représenté par la figure ci-dessous (Fig6.18).

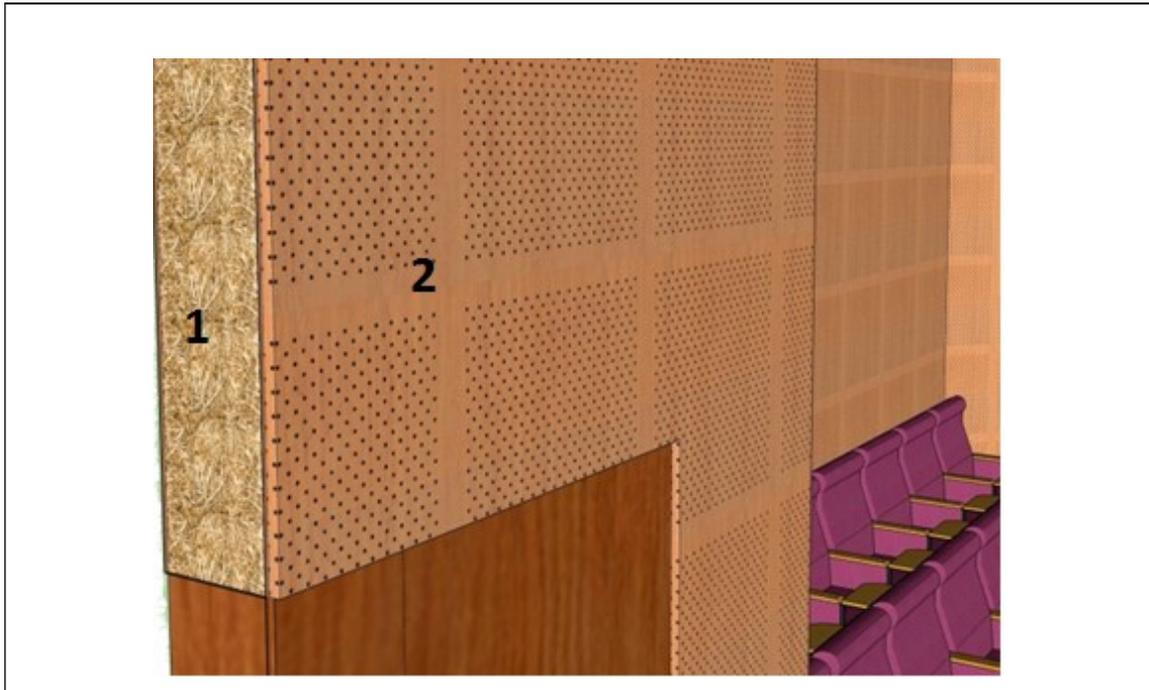


Figure 6.17: Détail du revêtement mural proposé pour la correction. 1-Panneau mural en paille Ep 10 cm densité 6 kg /m² ; 2-panneau perforé en MDF, de 12 mm d'épaisseur soutenu sur des crampons à 60 cm d'écart, Le pourcentage de perforation est à 15% de la surface totale du panneau. Source: Auteur.

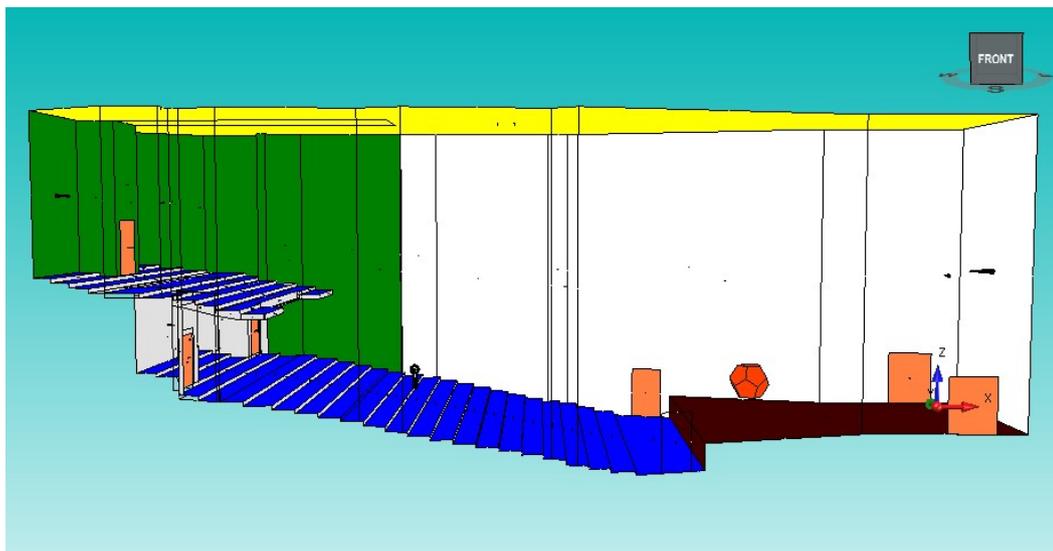


Figure 6.18: Agencement des matériaux proposés dans la salle de conférence de Malek Hadad. Source: Auteur.

6.2.1.2. Modélisation et simulation

Nous avons travaillé avec le même modèle numérique de la salle de conférence de Malek Hadad utilisé pour la simulation dans le chapitre IV ainsi que le logiciel **Olive Tree Lab Suite**, avec l'introduction des caractéristiques acoustiques du **panneau acoustique mixte**

MDF-paille calculées dans la première partie de ce chapitre dans le programme du logiciel Olive Tree Lab Suite (Fig6.19).

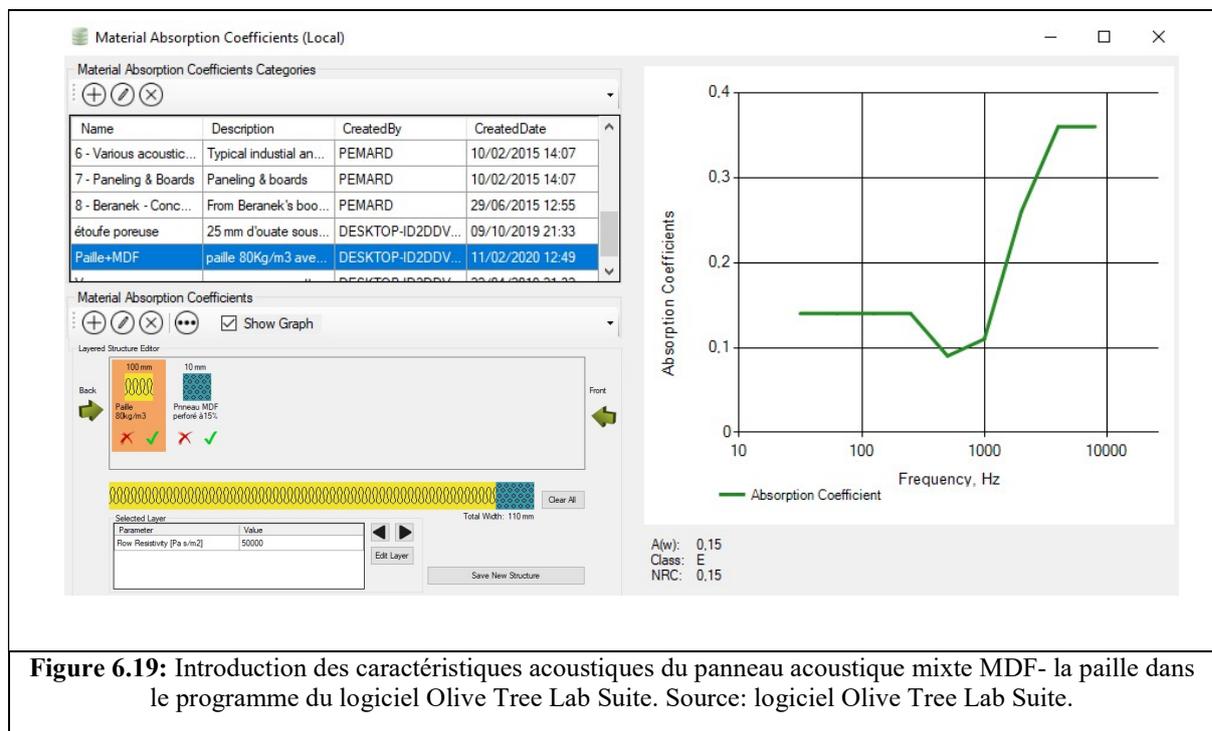


Figure 6.19: Introduction des caractéristiques acoustiques du panneau acoustique mixte MDF- la paille dans le programme du logiciel Olive Tree Lab Suite. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite.

6.2.1.3. Résultats et Interprétation

Nous présenterons dans cette partie les résultats des mesures qui influent directement sur la qualité acoustique de la salle.

A. Résultats du critère TR 60

L'application de panneaux MDF et de la paille avec son coefficient d'absorption acoustique élevé sur les surfaces réfléchissantes de fond de la salle a contribué à la diminution significative des valeurs de temps de réverbération, pour la fréquence 1000Hz le TR60 est passé de 3.34 à 0.93. (Planche 6.4). Les résultats de la simulation ont montré que la correction a modifié en grande partie l'environnement acoustique de la salle de conférence, La diminution du temps de réverbération représente jusqu'à -48% pour (125Hz), -69% pour (250Hz), -74% pour (500Hz) -73% pour (1000Hz) et -67% pour (4000Hz). En comparant ces résultats avec la valeur optimale de TR60 pour la fréquence de 500 Hz nous remarquons que le temps de réverbération après correction est devenu, 0.90s est très proche du temps de réverbération optimale qui est de 0.84s ce qui confirme l'efficacité des corrections proposées.

L'ajout d'une absorption supplémentaire dans des zones éloignées de la source sonore améliore la clarté à travers le coefficient C80. Ceci se traduit par l'augmentation de la quantité d'énergie sonore précoce par rapport à l'énergie sonore tardive.

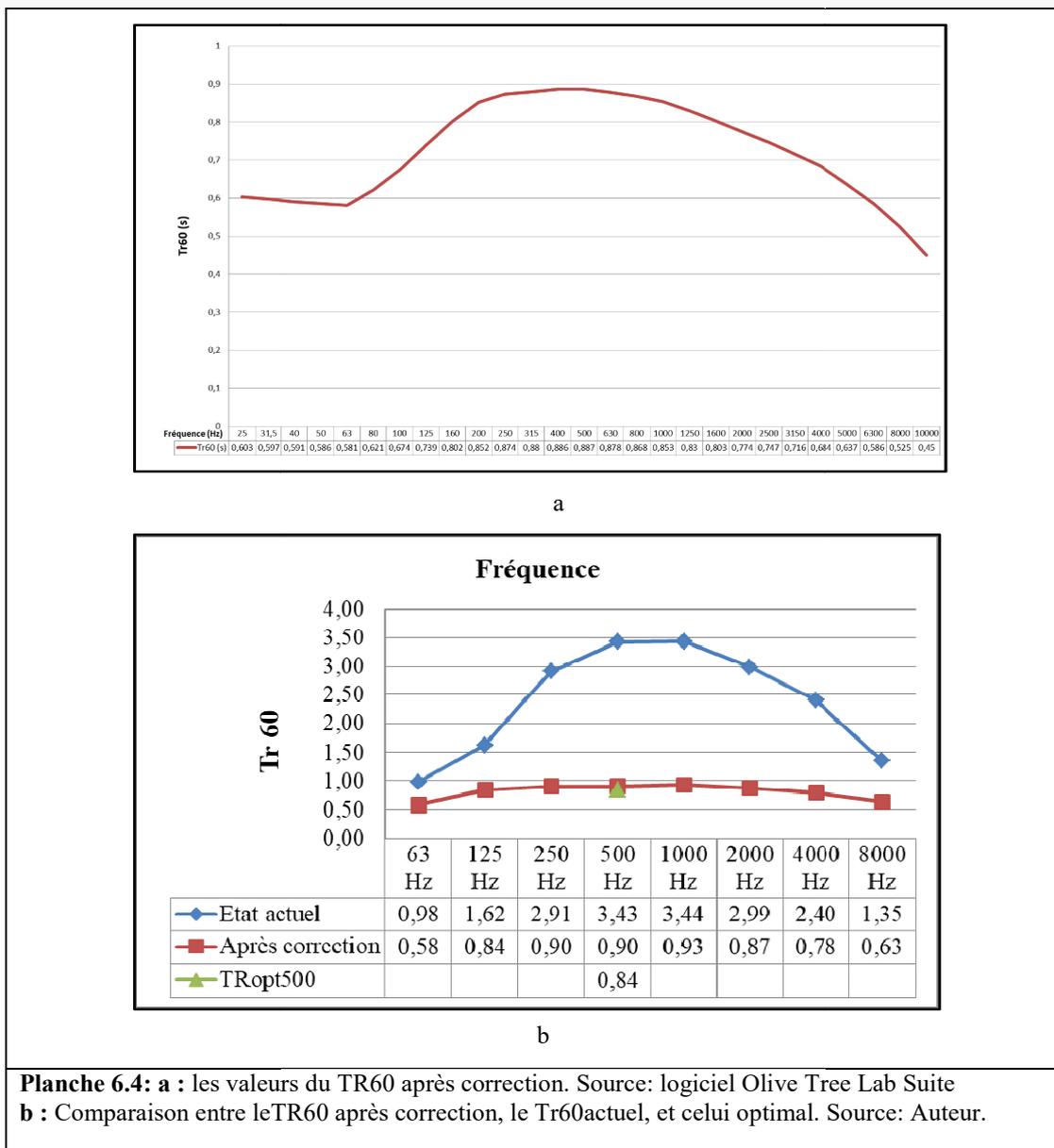
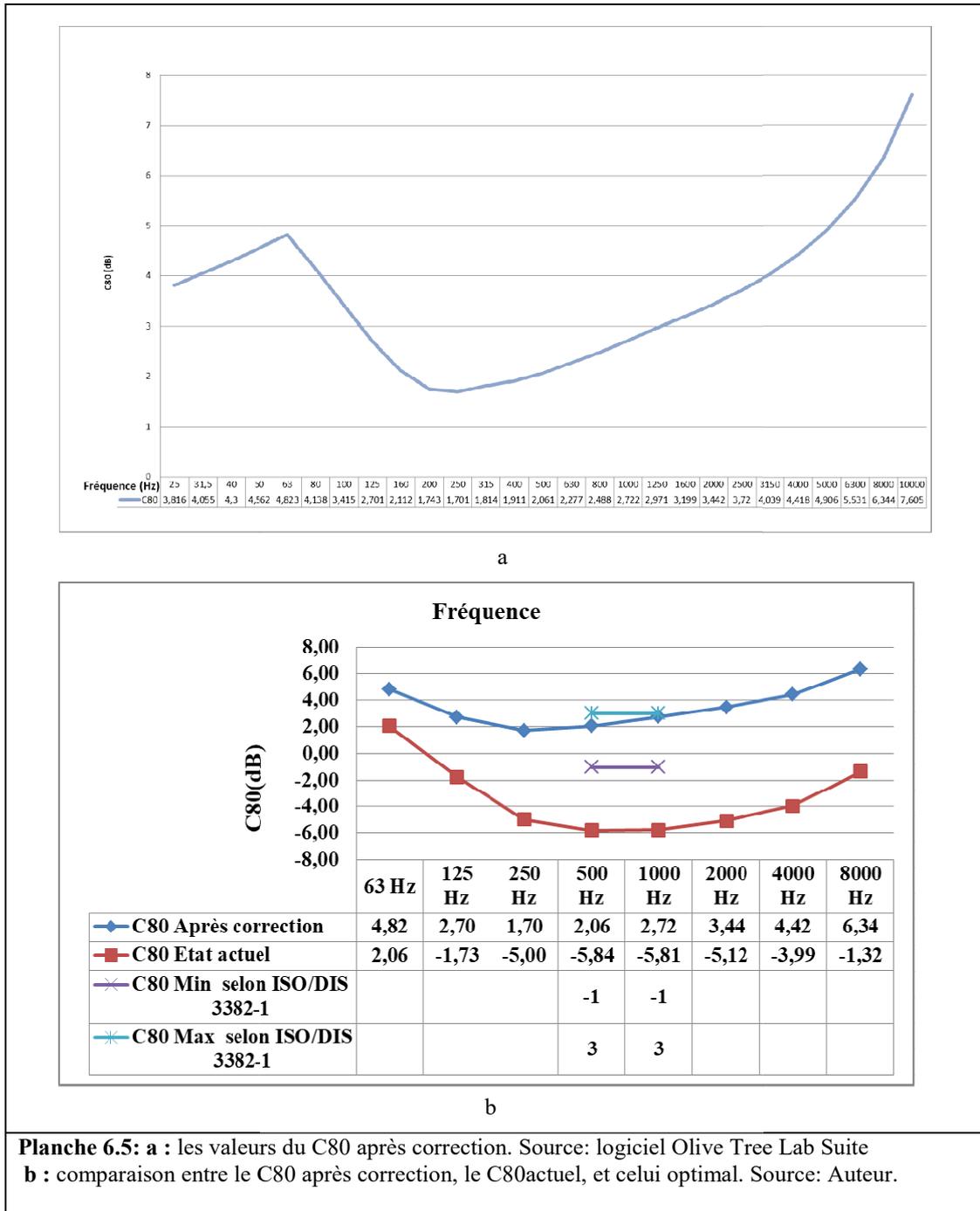


Planche 6.4: a : les valeurs du TR60 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite
 b : Comparaison entre leTR60 après correction, le Tr60actuel, et celui optimal. Source: Auteur.

B. Résultats du critère C80

Les valeurs du C80 après correction sont illustrées sur la (planches 6.5). Le deuxième graphe de la (planche 5-6) représentant la comparaison des valeurs du C50 actuel et après correction, nous indique une nette amélioration sur les principaux récepteurs. Cette augmentation est de 6,16 dB pour (250 Hz), 7,10 dB pour (500 Hz), 7,43 dB pour (1000 Hz) et 7,22 dB pour (2000 Hz). Les valeurs optimales de C80 selon la norme ISO/DIS 3382-1 se situent entre (-1 et 3) pour les fréquences 500 Hz et 1000 Hz donc les valeurs de

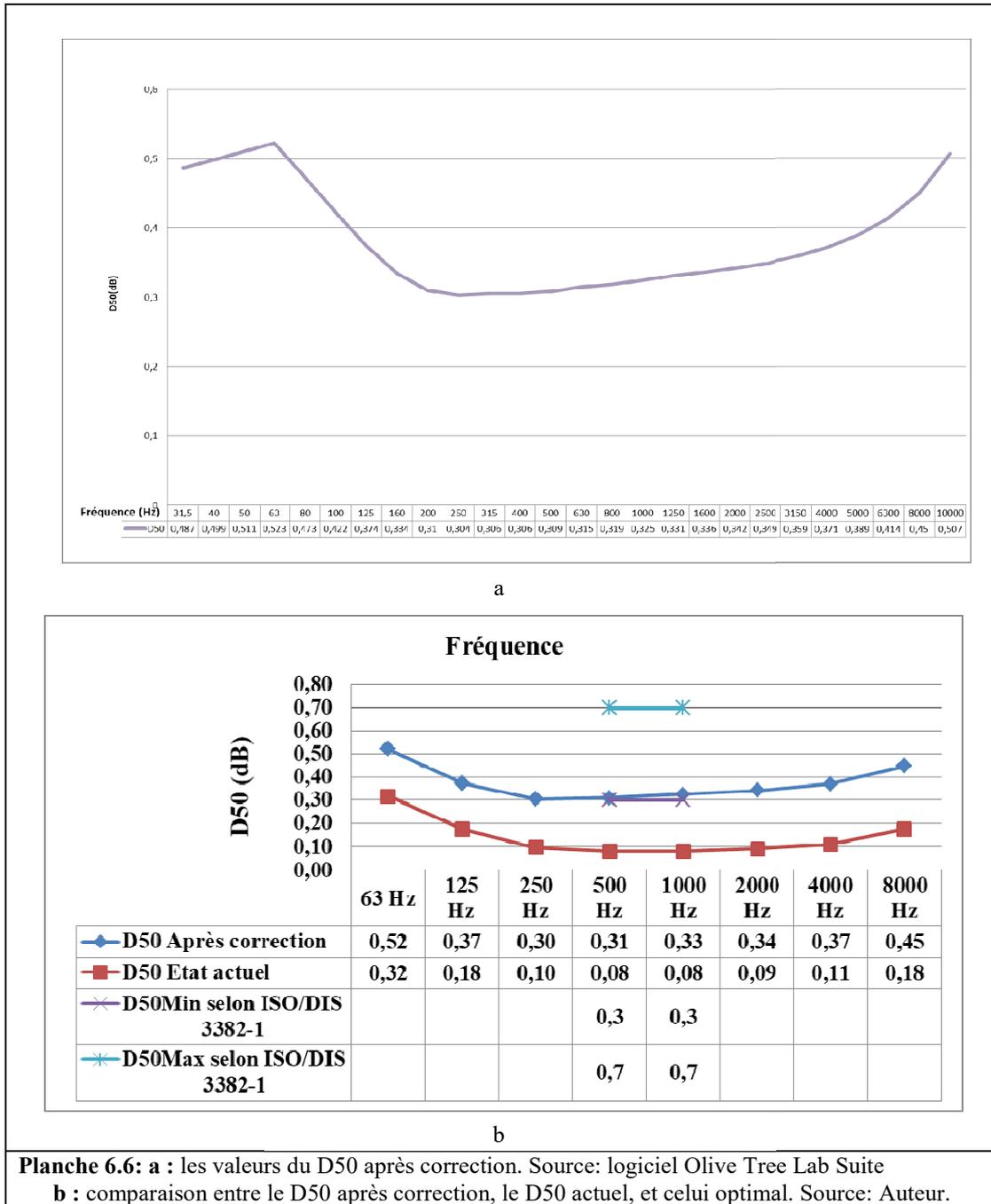
C80 après correction rentrent dans la plage de la norme avec ces valeurs 2.06 pour 500Hz et 2.72 pour 1000Hz.



C. Résultats du critère D50

Les valeurs du D50 après correction sont illustrées sur la (planche 6.6). La valeur moyenne du D50 après correction varie considérablement entre 0,3 et 0,52 dans les différentes

fréquences, cette valeur s'intègre parfaitement dans la plage optimale de D50 selon les normes ISO 3382-1 (voir annexe II). Les améliorations du critère acoustique D50 accompagnent les résultats précédents du critère C80 puisque ces critères reflètent de la même manière la clarté acoustique de la salle.

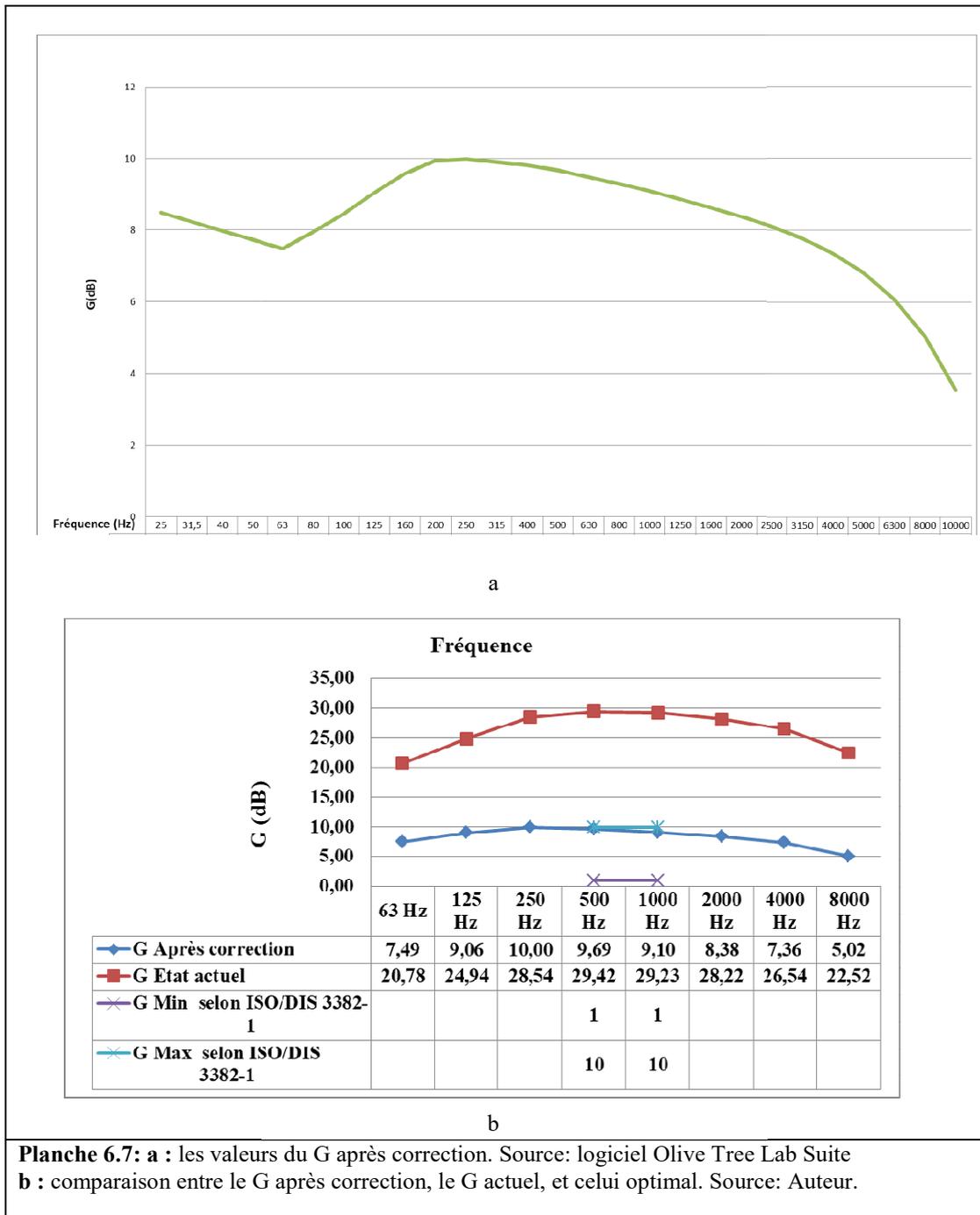


C. Résultats du critère G

Les valeurs de la force G après correction sont illustrées sur la (planche 6.7), la correction a eu un impact majeur sur la force d'énergie G. Nous remarquons une diminution de -18,54

dB pour (250 Hz), -19,73 dB pour (500 Hz), -20,13 dB pour (1000 Hz) et -19,84 dB pour (2000 Hz) ce qui représente une amélioration de 10 %

L'indice G optimal selon la norme ISO/DIS 3382-1 se situe entre (-1dB et 10dB) pour les fréquences 500 Hz et 1000 Hz donc les valeurs de G après correction rentrent dans la plage de la norme avec ces valeurs de 9.69dB pour 500Hz et 9.10dB pour 1000Hz



E. Critère de l'intelligibilité STI

Une bonne intelligibilité est nécessaire lorsqu'on désire écouter et comprendre la parole dans une salle de conférence, d'où l'intérêt d'un critère objectif permettant de quantifier l'influence d'une salle sur l'intelligibilité. La définition du STI (Speech Transmission Index) comme nous l'avons décrit précédemment permet d'évaluer le degré d'intelligibilité de la parole, il dépend de la différence entre le signal sonore et le bruit de fond. Il est compris entre 0 et 1, une bonne intelligibilité doit être supérieure à 0,6, une intelligibilité moyenne est comprise entre 0,4 et 0,5. Les valeurs du STI après correction sont illustrées sur le tableau 5-2, le STI est passé d'un état actuel très mauvais à un bon état après la correction.

Tableau 6-2 : les valeurs de STI après correction, et comparaison avec le STI actuel, et celui optimal

| Indication | Etat actuel | Après correction | Valeurs optimales |
|------------|--|--|---|
| STI | 0,39 Sur l'échelle STI de la qualité est mauvaise. | 0,62 Sur l'échelle STI est de bonne qualité acoustique | 0 à 0,30 Très mauvaise 0,30 à 0,45 mauvaise 0,45 à 0,60 satisfaisante 0,60 à 0,75 bonne 0,75 à 1 Très bonne |

Tableau 6-3 : Récapitulation des différents résultats.

| Indication | Etat actuel | Proposition | Valeurs optimales |
|------------|---|---|--|
| T60 | TR60 a atteint 3.34s en moyenne fréquence et basse fréquence 0,97 s et en haute fréquence 1,25 s. | TR60 augmente de 0,58 s (63Hz) et 0,93s (1000 Hz) et eu delà la courbe s'inverse jusqu'au 0,63 s(8000 Hz) | $TR_{opt500}=0,85$ s |
| | C80 en diminution de basse au en moyenne fréquence de 2,06(63Hz) jusqu'au | C80 en diminution de 4,82 dB (63Hz) jusqu'au 1,70 dB(250 Hz) au minimum et | -1dB<C80<+3dB En fréquence 500Hz et |

| | | | |
|-----|---|---|--|
| C80 | -5,81(1000Hz) au minimum et après la courbe s'inverse a 1,32(8000Hz). | après en augmentation jusqu'à attendre la valeur 6,34 dB(8000 Hz) | 1000 Hz |
| G | G varie entre 20,78 dB (63Hz) et 29,42 dB (500 Hz) | G varie entre 5,02 dB (8000 Hz) et 10 dB (250 Hz) | +1<G<+10 En fréquence 500Hz et 1000 Hz |
| D50 | indice D50 est de 0,08 en moyenne fréquence et 0,18 en basse et haute fréquences. | indice D50 est de 0,33 en moyenne fréquence et 0,37 en basse et haute fréquences. | 0,3<D50<+0,7 En fréquence 500Hz et 1000 Hz |
| STI | 0,39 Sur l'échelle STI de la qualité est très mauvaise. | 0,62 Sur l'échelle STI est de bonne qualité acoustique | 0 à 0,30 Très mauvais 0,30 à 0,45 mauvais 0,45 à 0,60 satisfaisant 0,60 à 0,75 bon 0,75 à 1 Très bon |

6.2.2. Corrections proposées pour la salle de conférence de la maison de la culture d'El Khalifa

6.2.2.1. Application des réflecteurs

Pour une meilleure diffusion du son et une meilleure qualité acoustique dans la salle de conférence d'El Khalifa nous avons opté pour l'insertion des surfaces réfléchissantes de contre-plaqué au plafond. Plusieurs calculs ont été faits pour identifier le nombre des relecteurs ainsi que ces dimensions dans le but que le son atteigne la totalité des auditeurs. Un réseau de six réflecteurs en contre-plaqué de 12mm d'épaisseur sont placés au plafond de la salle sur le plan xy, d'une dimension de 3X2, 67 m² chacun. La projection du point de réflexion géométrique sur le plan est représentée comme indiqué sur la coupe (Fig.6.20).

L'angle de réflexion pour le point le plus bas des réflecteurs est de 63° qui atteint la première rangée des auditeurs. Le point le plus haut est d'un angle de 32° qui atteint la dernière rangée des auditeurs (Rindel, Jens Holger., 2005). Le champ sonore direct et indirect après l'insertion de réflecteurs est indiqué sur la figure ci-dessous (Fig.6.21).

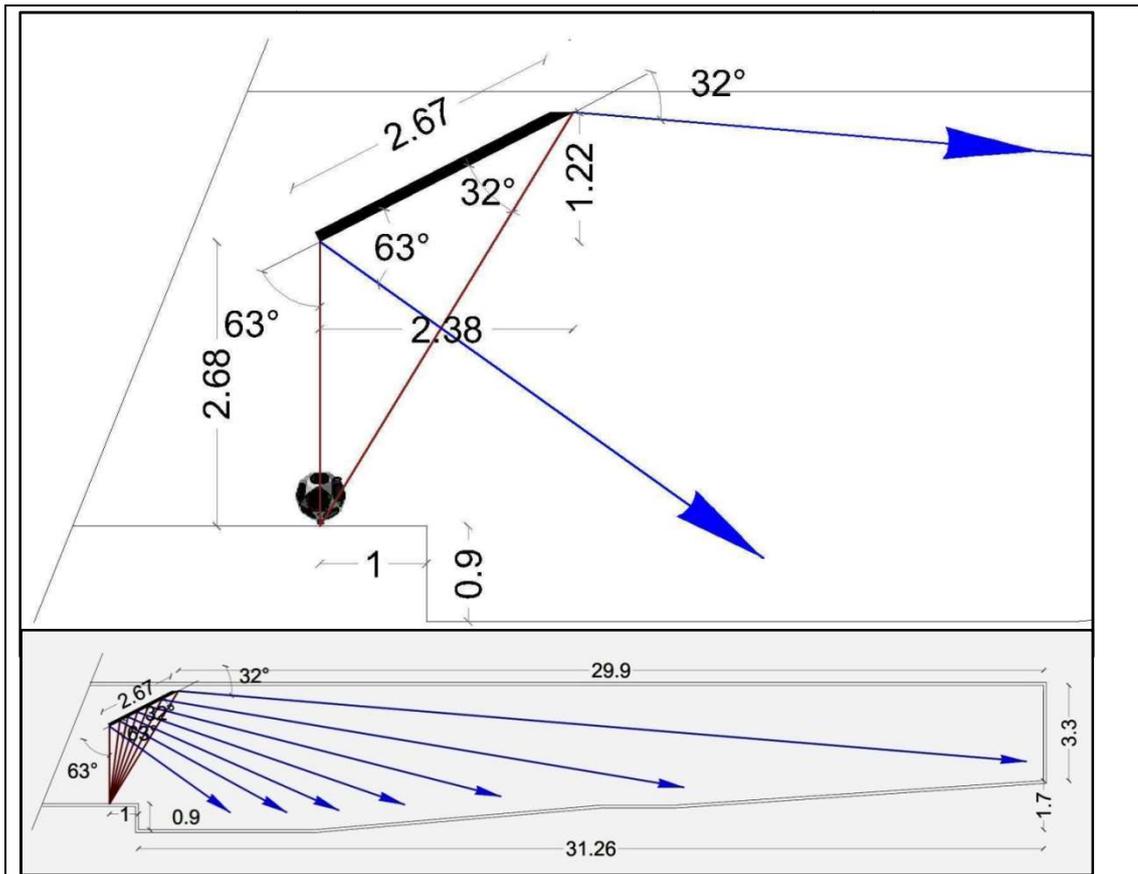


Figure 6.20 : Position des réflecteurs sur coupe. Source: Auteur.

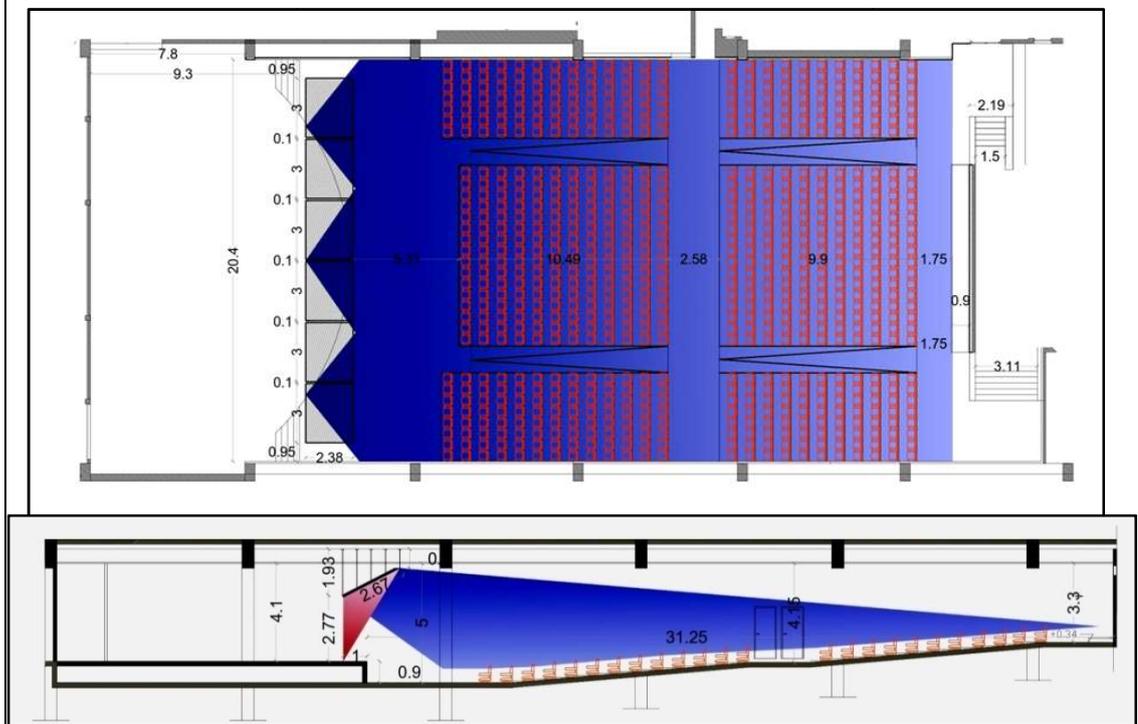


Figure 6.21 : Champ sonore direct et indirect après l'insertion des réflecteurs. Source: Auteur.

6.2.2.2. Modélisation et simulation

Nous avons introduit les caractéristiques acoustiques des réflecteurs en contre-plaqué dans la base de données des matériaux du logiciel Olive Tree Lab Suite (Fig6.22) afin d'évaluer l'impact de ces réflecteurs sur la performance acoustique de la salle et la qualité des diffuseurs sonores (Fig6.23).

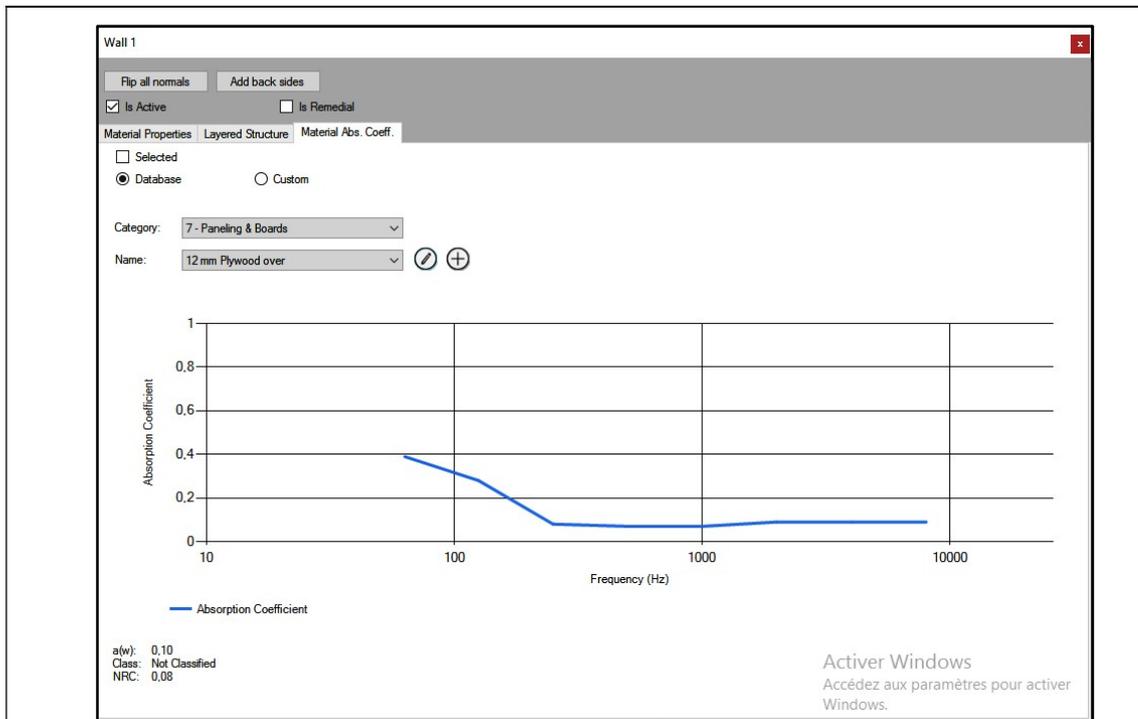


Figure 6.22 : Introduction des caractéristiques acoustiques des réflecteurs dans le programme du logiciel. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite.

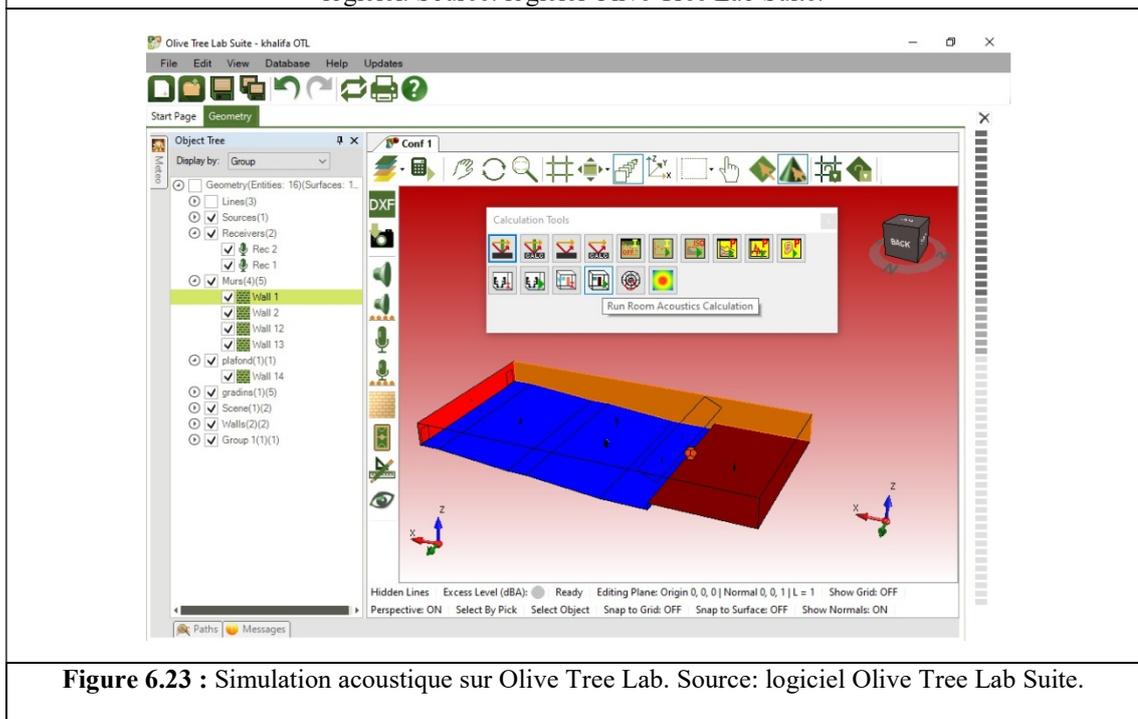


Figure 6.23 : Simulation acoustique sur Olive Tree Lab. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite.

6.2.2.3. Résultats et Interprétation

Les résultats de la durée de réverbération TR60, de la clarté C80, de la force G, de D50 et de l'intelligibilité STI, étaient très satisfaisants. Sur la (planche 5.8) la valeur du Tr 60 nominal est de 0,77 s donc parfaitement compatible à la valeur préconisée de 0.74 s. Sur la (planche 6.9) les valeurs du C80 rentrent dans la marge de la norme, la même chose pour les autres indices G (planche 6.10), D50 (planche 6.11) et STI (tableau 6.4).

Dans l'ensemble les résultats des différents critères acoustiques sont très satisfaisants. On peut conclure que notre stratégie de correction a donné de bons résultats. On remarque ainsi que la correction a suscité une amélioration des conditions d'écoute très significative.

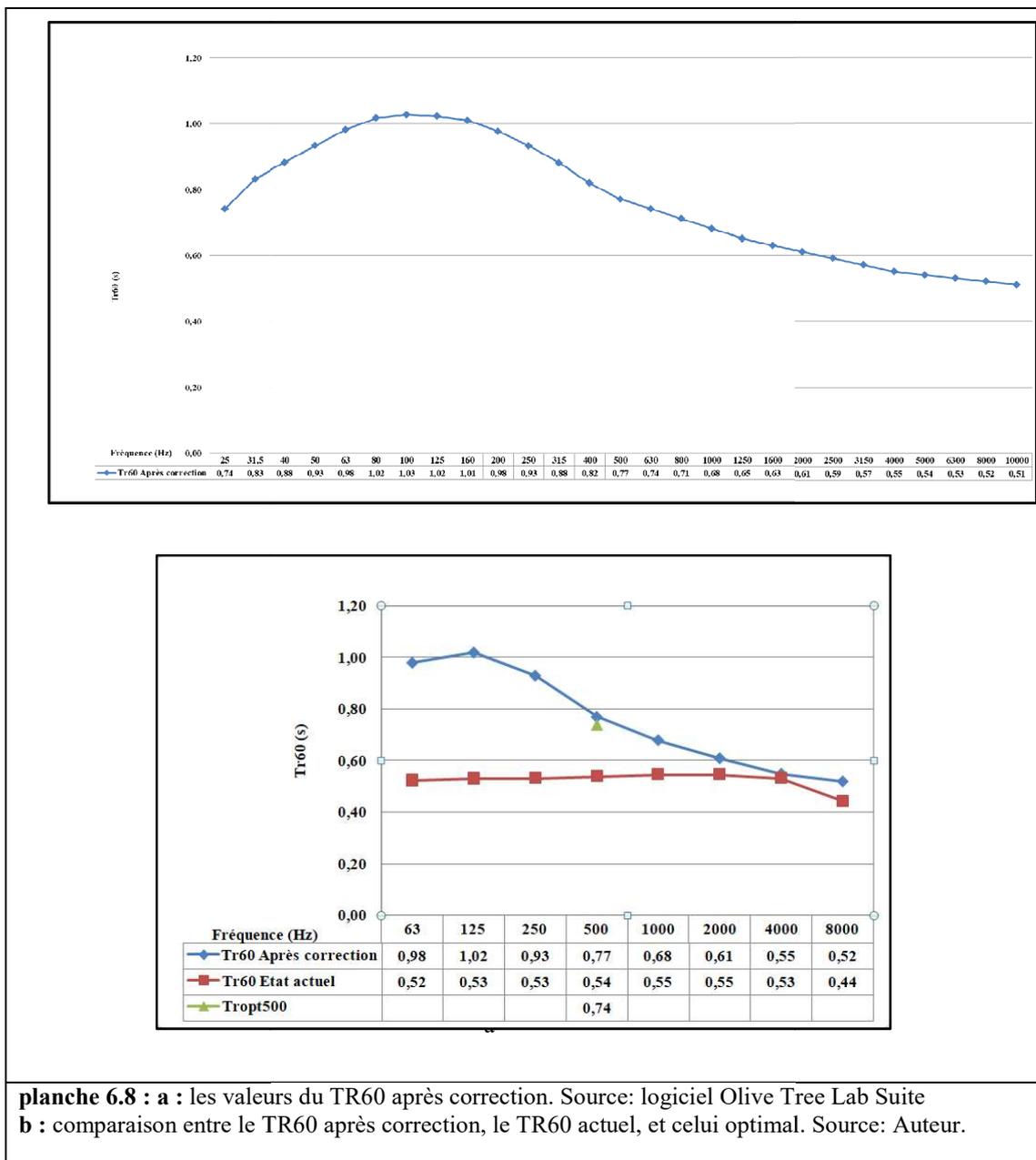
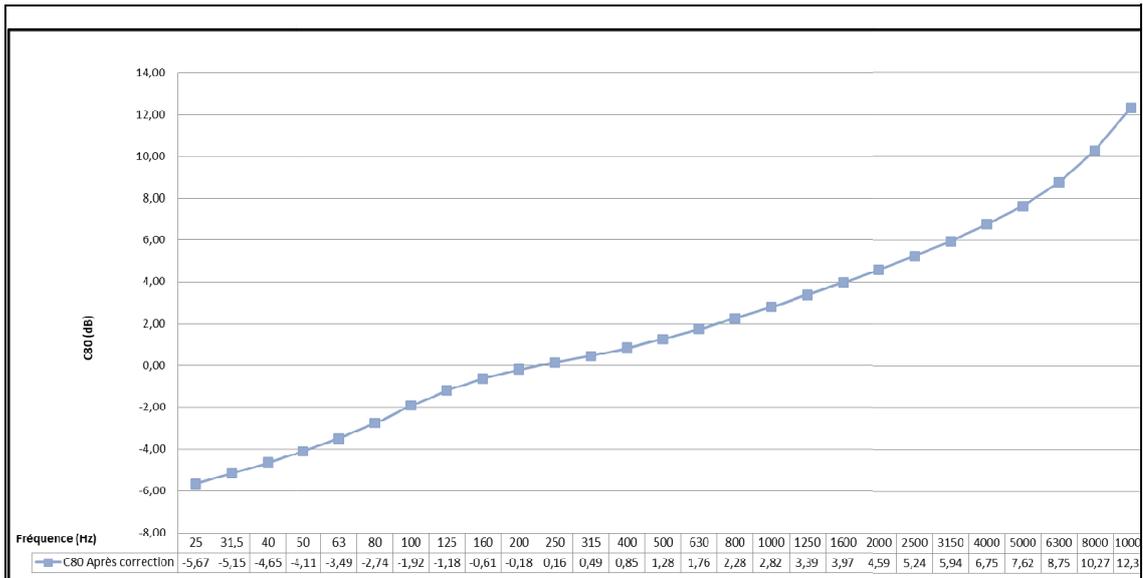
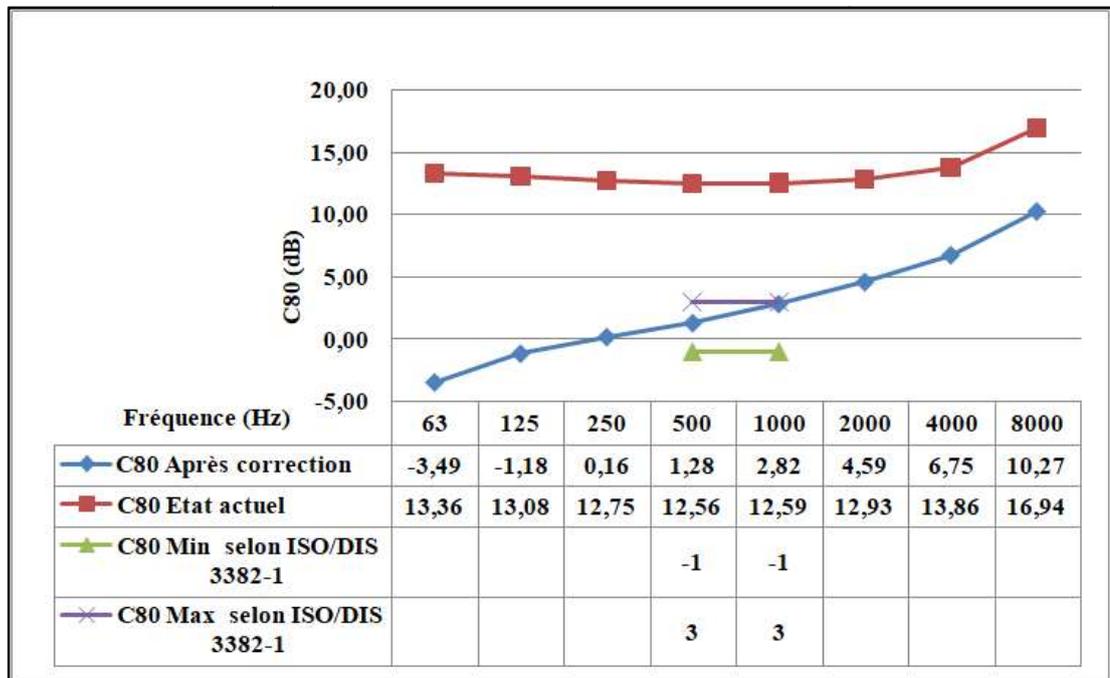


planche 6.8 : a : les valeurs du TR60 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite
 b : comparaison entre le TR60 après correction, le TR60 actuel, et celui optimal. Source: Auteur.



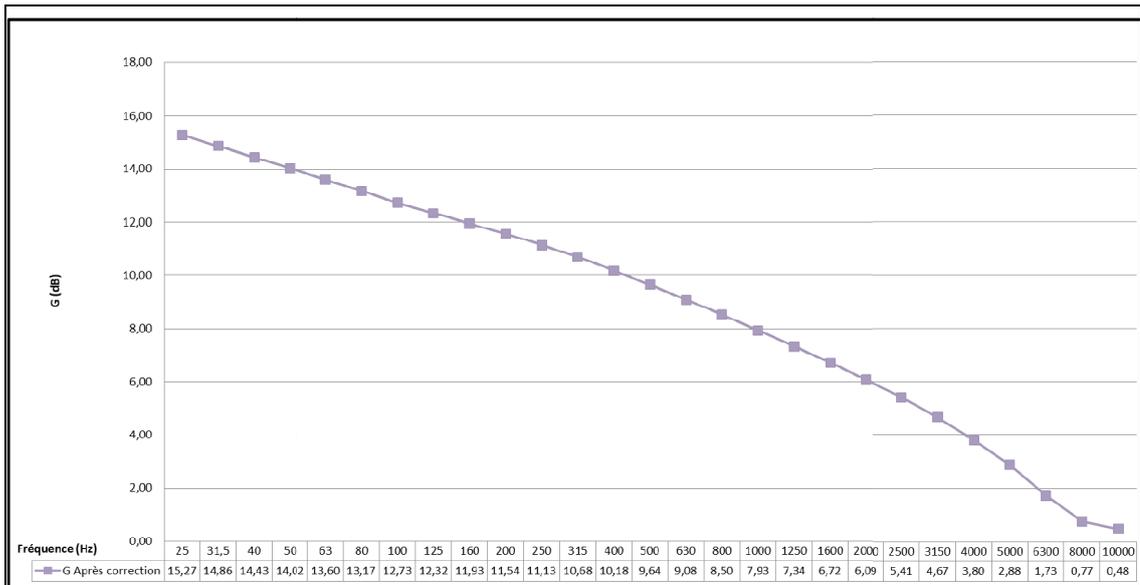
a



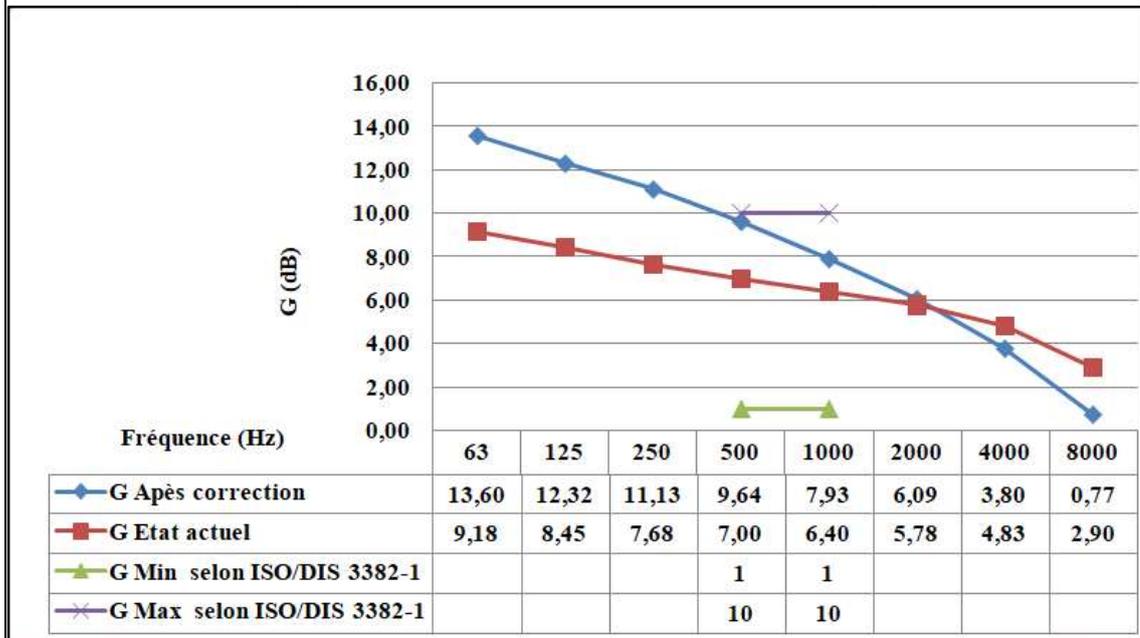
b

Planche 6.9 : a : les valeurs du C80 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite

b : comparaison entre le C80 après correction, le C80actuel, et celui optimal. Source: Auteur.



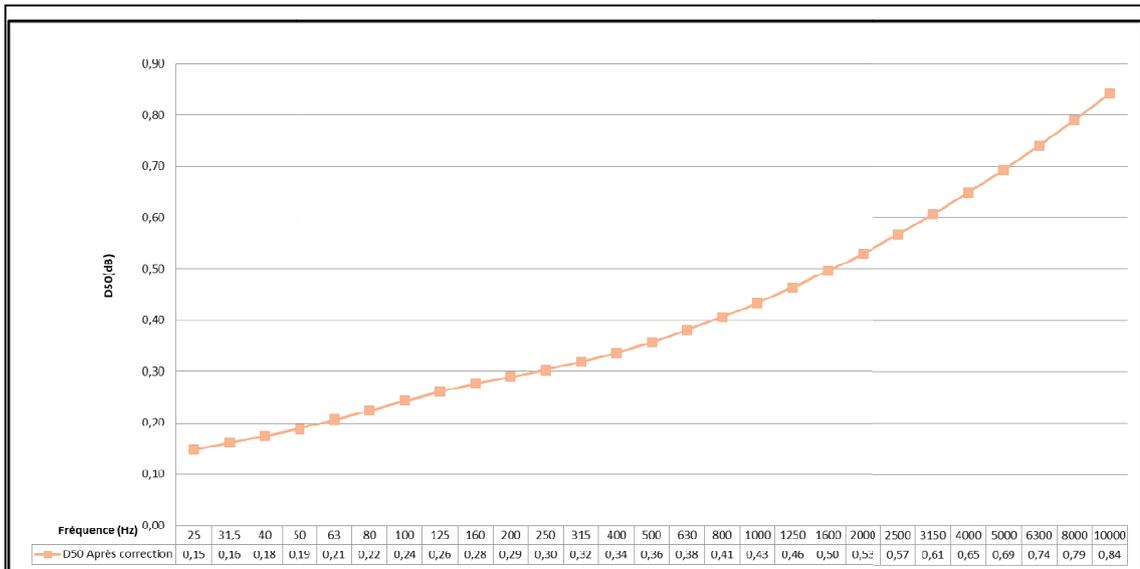
a



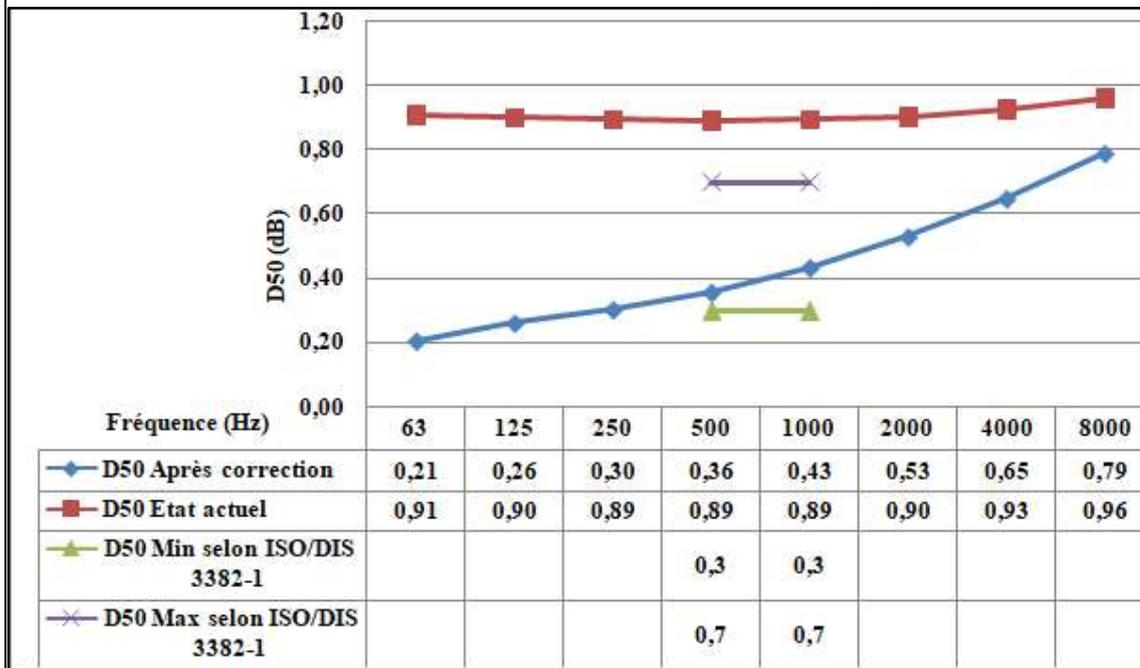
b

planche 6.10 : a : les valeurs du G après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite

b : comparaison entre le G après correction, le G actuel, et celui optimal. Source: Auteur.



a



b

Planche 6.11: a : les valeurs du D50 après correction. Source: logiciel Olive Tree Lab Suite

b : comparaison entre le D50 après correction, le D50 actuel, et celui optimal. Source: Auteur.

Tableau 6-4 : les valeurs de STI après correction, et comparaison avec le STI actuel, et celui optimal.

| Indication | Etat actuel | Après correction | Valeurs optimales |
|------------|---|---|---|
| STI | 0,67 Sur l'échelle STI de la qualité est bonne. | 0,87 Sur l'échelle STI est de très bonne qualité acoustique | 0 à 0,30 Très mauvaise 0,30 à 0,45 mauvaise 0,45 à 0,60 satisfaisante 0,60 à 0,75 bonne 0,75 à 1 Très bonne |

Conclusion

Dans la première partie du chapitre nous avons pu déduire le coefficient d'absorption de deux panneaux composés essentiellement des matériaux écologiques et durables, le panneau acoustique mixte MDF + Paille et le panneau de l'alfa.

La paille et l'alfa sont des fibres synthétiques qui présentent plusieurs avantages spécifiques, notamment leur l'abondance, leur capacité de renouvellement, leur recyclabilité et leur haute résistance spécifique.

Les résultats enregistrés dans la deuxième partie du chapitre (à travers la simulation) ont montré que les modifications proposées pour les corrections acoustiques ont été largement significants, grâce à l'intégration des panneaux acoustiques mixtes de paille et de MDF perforé dans les zones stratégiques de la première salle de conférence (salle du palais de la culture Malek Hadad), et à la pose des réflecteurs en contre-plaqué dans la deuxième salle (salle de la maison de la culture d'El Kalifa). Une nette amélioration a été constatée pour tous les indices d'évaluation de la qualité acoustique, Tr60, C80, G, D50, STI.

**CHAPITRE VII : CONCLUSION ET
PERSPECTIVES**

Conclusion

La présente recherche a soulevé le problème de la réverbération acoustique dans les salles de conférence. Nous avons examiné plus précisément la réhabilitation acoustique durable des salles de conférences par les outils de l'expérimentation et de la modélisation. Notre approche a consisté en l'utilisation de la maquette acoustique en complément des outils expérimentaux et de modélisation pour améliorer les conditions sonores des salles. L'enjeu consiste à effectuer un traitement particulier de l'acoustique des salles adapté aux lieux d'écoute à travers l'ajustement du temps de réverbération de l'onde sonore pour contrôler la réverbération dans ces espaces.

La perception des sources sonores présentes dans ces lieux est associée au mode de propagation du son. Elle est traitée dans le cadre de la modélisation de la propagation des ondes sonores et son influence sur l'acoustique de deux salles de conférences, en l'occurrence, la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad et celle de la maison de la culture El Khalifa qui ont fait l'objet de notre étude. L'apport de la maquette acoustique en complément aux simulations numériques a été validé dans de nombreux travaux de recherche traitant les ambiances sonores des salles de conférence et a permis l'apport de solutions pour améliorer les conditions d'écoute.

La démarche adoptée dans le cadre de cette étude a consisté :

- dans un premier temps à faire l'étude de la caractérisation acoustique d'un espace architectural qui a dévoilé l'importance des paramètres acoustiques des salles pour quantifier leurs qualités acoustiques.
- dans un deuxième temps à déterminer les paramètres les plus influents sur la qualité acoustique des salles de conférence, qui se résument principalement en : **la Forme architecturale, le Temps de réverbération, le Temps de décroissance précoce EDT, La clarté (C80), la Force sonore G, l'Indice D50 (Deutlichkeit), ainsi que le STI : indice de transmission de la parole.** Il est important de signaler que nous n'avons retenus, pour notre cas d'étude, que les critères perceptifs liés à l'appréciation de la parole.
- et le corpus théorique qui nous a permis de cerner le phénomène de la réhabilitation acoustique à partir de plusieurs études qui s'accordent toutes à la détection des problèmes sonores des salles existantes à travers des mesures expérimentales ou des simulations numériques.

L'amélioration de la qualité acoustique des salles adaptée aux lieux d'écoute apparaît comme l'aboutissement d'une multitude d'actions, et ce à plusieurs niveaux :

- Remplacement des revêtements muraux et/ou plafond par des matériaux absorbants afin d'atteindre le temps de réverbération optimale, ainsi que les autres indices d'évaluation qualitative des salles de parole (D50, C80, STI, G).
- Changement de la forme géométrique des salles, en intégrant des réflecteurs qui améliorent la propagation du son dans la salle.
- Utilisation des matériaux naturels qui de plus en plus s'avèrent une option valable pour les traitements d'absorption acoustique, en particulier les fibres naturelles (chanvre, l'écorce, la moelle de tournesol, la paille etc...), les matériaux recyclés qui ont reçu une attention croissante en raison de leurs bonnes propriétés d'isolation acoustique et thermique ainsi que l'absence d'effets nocifs sur la santé humaine et leurs disponibilités.
- Dans le volet expérimental notre recherche s'est penchée sur l'étude acoustique de deux salles de conférences de la ville de Constantine, celle du palais de la culture Malek Hadad, et de la maison de la culture El Khalifa. Les deux salles ont bénéficié d'une opération de réhabilitation dans le cadre de l'événement « Constantine capitale de la culture arabe ».

- Nous avons entrepris un diagnostic acoustique des deux salles, en se basant sur des mesures in-situ et des simulations numériques à l'aide du logiciel Olive Tree Lab Suite. Les résultats fournis par le logiciel ont indiqué que malgré l'amélioration des conditions acoustiques après l'opération de réhabilitation, il a été constaté des écarts entre les aspects perceptifs et objectifs des deux salles.

En ce qui concerne la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad, l'utilisation des panneaux de BA13 et de la laine de roche a diminué considérablement le temps de réverbération de la salle mais néanmoins ce dernier reste loin du temps de réverbération optimal, la même remarque et valide pour les autres indices (D50, C80, STI, G), ce qui influe d'une manière négative sur la qualité acoustique de la salle.

Pour la salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa, les résultats ont montré que le temps de réverbération avait diminué au-dessous du seuil optimal, ce qui a diminué considérablement la diffusion ainsi que la qualité sonore de la salle.

- Dans le but d'améliorer le comportement acoustique des deux salles de conférences étudiées nous avons proposé une étude corrective spécifique à chaque salle.

Dans un premier lieu, nous avons évalué les caractéristiques acoustiques des nouveaux matériaux durables (paille et alfa) à travers la méthode de la chambre réverbérante. Sur la base des résultats obtenus nous avons proposé l'introduction d'un revêtement absorbant (panneau MDF + la paille) dans des zones acoustiquement stratégiques de la salle de conférence du palais de la culture Malek Hadad, ce qui a réduit le temps de réverbération actuel par rapport à celui jugé optimal. Ce rajustement a contribué à améliorer les autres paramètres acoustiques tels que l'intelligibilité de la parole et la clarté.

Pour la salle de conférence de la maison de la culture El Khalifa et dans le but d'une bonne diffusion sonore nous avons opté pour l'insertion des surfaces réfléchissantes de contre-plaqué au plafond. Les résultats des simulations obtenus en utilisant le logiciel Olive Tree Lab Suite ont montré que la proposition de correction a procuré une amélioration des conditions d'écoute très significative.

En fait les corrections acoustiques apportées aux deux salles de conférences ne constituent pas une fin en soi, puisque notre objectif est d'orienter nos résultats sur la réhabilitation durable d'un espace de conférence articulé sur des critères sonores de qualité. Comme il a été précisé dans la problématique, la notion de réhabilitation des salles d'écoute, devrait être abordée dans une perspective durable et pluridisciplinaire. En se basant sur les résultats de nombreux travaux de recherche, nous avons été amené à émettre l'hypothèse que «la réhabilitation acoustique des salles existantes doit respecter l'environnement en utilisant des matériaux absorbants durables qui sont des produits qui procurent des avantages environnementaux, sociaux et économiques tout en protégeant l'environnement tout au long de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur élimination finale. Aussi qu'une bonne maîtrise du volume de la salle existante à travers l'utilisation des réflecteurs améliore d'une manière significative la qualité acoustique de ces salles». Nous avons pu relever dans la partie empirique, à l'issue de l'étude expérimentale et numérique, l'importance de la réhabilitation acoustique et son rôle dans

l'amélioration qualitative des salles de conférences à travers l'utilisation des matériaux durables et la maîtrise du volume, ce qui confirme notre hypothèse de départ.

Perspectives de la recherche :

Le champ de réflexion sur la réhabilitation acoustique est large et très actuel. De plus en plus les acousticiens et les chercheurs s'y intéressent vu son importance sur le bien-être de l'homme et sur les espaces qu'il fréquente.

En complément à nos conclusions nous proposons des perspectives afin :

- D'évaluer l'impact des panneaux absorbant en Alfa sur la qualité acoustique des salles en utilisant les résultats obtenus dans le chapitre cinq.
- D'évaluer le coefficient d'absorption acoustique des autres matériaux durables en utilisant la maquette acoustique qui constitue un laboratoire expérimental au service des chercheurs.
- D'élargir le champ d'étude à d'autres types de salles exemples les salles de classes, salles de concert, salles de spectacles
- De faire un couplage entre l'effet des matériaux et l'effet des autres paramètres notamment la géométrie de l'espace, sur le confort acoustique des salles.
- D'utiliser d'autres paramètres aussi bien subjectifs qu'objectifs pour évaluer la qualité acoustique des salles.

Toutes ces propositions ouvrent des brèches à de futures investigations sur la réhabilitation acoustique, tout en enrichissant le domaine de l'architecture acoustique en Algérie, qui est à l'heure actuelle toujours un terrain vierge. Les propositions et les études de recherches dans ce domaine pourront contribuer à instaurer une réglementation acoustique propre au pays et qui concernera aussi bien les nouvelles constructions que la réhabilitation de l'ancien bâti.

CHAPITRE VIII : BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- **Abrahams I David.** *Sound radiation from a line forced perforated elastic sandwich panel*, The Journal of the Acoustical Society of America n° 105(6), 1999, P 3009-3020.
- **Adolphe Luc.** *Ambiances architecturales et urbaines*, Editions Parenthèses, 1998, 251 P.
- **André, Anne.** *La médiation théâtrale*, Editions Lansman « sociologie », 1998, 249 P.
- **Aretz, Marc. Orłowski, Raf.** *Sound strength and reverberation time in small concert halls*, Applied Acoustics, 2009, P 1099-1110.
- **Aris D, Henry É, Pitard A.** *Architectures de la culture*, Culture de l'architecture, Éditions de patrimoine, Centre des monuments nationaux, 2009, 351P.
- **Anselmet, Fabien. Mattei, Pierre-Olivier.** *Acoustique, aéroacoustique et vibrations*, ISTE éditions LTD, Angleterre, 2015, 514 P.
- **Barney, Federico Cruz.** *Evaluation des performances d'un environnement informatique d'acoustique prévisionnelle*, Thèse de doctorat, Université du Maine, 1999, 222 P.
- **Barron, Michael.** *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Routledge, 2010, 505 P.
- **Benmagsoula Zohra.** *Relations entre composante acoustique et conception architecturale : caractérisation et amélioration acoustique de l'espace de la mosquée*, Sciences & Technologie D n°46, 2017, P : 35-45.
- **Benmagsoula Zohra.** *Relations entre composante acoustique et conception architecturale : caractérisation et amélioration acoustique de l'espace de la mosquée*, thèses de doctorat, Université 3, 2017, 259 P.
- **Beranek, Leo L.** *Music. Acoustics and architecture*, John Wiley and sons, New York. 1962, 661 P.
- **Berardi Umberto, Iannace Gino.** *Predicting the sound absorption of natural materials: Best fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant*, Applied Acoustics n°115, 2017, P : 131-138.

- **Bianconi, Lorenzo, Pestelli Giorgio.** Histoire de l'opéra italien: Les systèmes. L'opéra spectacle, Editions Mardaga, 1992, 508 P.
- **Bistafa Sylvio R, Bradley John S.** *Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption*, The Journal of the Acoustical Society of America n°109(4), 2001, P 1474-1482.
- **Bouaziz, Samia.** Elaboration d'un consensus de réhabilitation du patrimoine industriel pérennisant son authenticité dans le contexte Algérien: cas des ateliers maintenance S.N.T.F. El-Hammam, Alger, mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011, 124 P.
- Boukadoum Amina.** Evaluation du confort acoustique dans les Salles de cours des établissements scolaires (Cas des lycées de Constantine), mémoire de magister, Université de Constantine, 2012, 192 P.
- **Buratti C, Belloni E, Lascaro E, Lopez G A, Ricciardi P.** *Sustainable panels with recycled materials for building applications: environmental and acoustic characterization*, Energy Procedia n°101, 2016, P 972-979.
- **Buratti C, Belloni E, Lascaro E, Merli F, Ricciardi, P.** *Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials*, Construction and Building Materials n°171, 2018, P 338-349.
- **Chabriac P A, Gourdon E, Gle P, Fabbri A, Lenormand H.** *Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters*, Construction and Building Materials n°112, 2016, P : 158-167.
- **Chaigne, Antoine.** Ondes acoustiques. Edition école polytechnique, 2001, 218 P.
- **Chrisler V L.** *Dependence of sound absorption upon the area and distribution of the absorbent material*, Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards n°13, 1934, P 169-187.
- **Connelly M, Hodgson M.** *Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs*, Building and Environment n° 92, 2015, P 335-346.

- **Couasnet Yves**, Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction, Le Moniteur, 2005, 248P.
- **Cox Trevor J, D'Antonio Peter**. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application, CRC Press, 2009, 478 P.
- **Daumal, F.** *L'architecture acoustique, un nouveau concept*, Journal de Physique Colloques n° 51, 1990, P 1059-1062.
- **Debache Benzagouta, Samira**. La conception sonore des bâtiments d'habitation, Cas du logement collectif, thèses de doctorat d'état en architecture, université de Constantine, 2004, 285 P.
- **Dekoumi, Djamel**. Pour une nouvelle politique de conservation de l'environnement historique bâti algérien : cas de Constantine, thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007, 292 P.
- **Diaz C, Velazquez C**. A Live Evaluation of the RASTI-Method, Applied Acoustics n°46 (4), 1995, P 363-372.
- **Echeverria C A, Pahlevani F, Handoko W, Jiang C, Doolan C, Sahajwalla V**. *Engineered hybrid fibre reinforced composites for sound absorption building applications*, Resources, Conservation & Recycling n°143, 2019, P 1-14.
- **El-Abbassi F E, Assarar M, Ayad R, Bourmaud A, Baley C**. *A review on alfa fibre (Stipatenacissima L.): From the plant architecture to the reinforcement of polymer composites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing n°128, 2020, P 1-10.
- **Eldakdoky Soha, Elkhateeb Ahmed**. Acoustic improvement on two lecture auditoria: Simulation and experiment, Frontiers of Architectural Research n°6, 2017, P 1-16.
- **Elkhateeb, Ahmed**. *Sounds in Lecture Rooms in Ain Shams University, Acoustic Environment Assessment for the Main Auditoria, Problem Analysis and Solution Discussion, Part I: Faculty of Engineering*, International Conference in Environmental Engineering, Ain Shams University n° 2, 2005, P 1-35.
- **Elwaleed A K, Nikabdullah N, Mohd Nor M J, Mat Tahir M F, Zulkifli R**. *Sound absorption properties of a low-density perforated date palm fibres panel*, International Journal of Computer Applications in Technology n° 52(4), 2015, P 213-219.

- **Eurich B, Klenzner T, Oehler M.** *Impact of room acoustic parameters on speech and music perception among participants with cochlear implants*, Hearing Research n°377, 2019, P 122-132.
- Farid-Ibrir Dalal, Benzagouta -Samira Debache.** *La Réhabilitation acoustique durable des salles de conférences : Impact de la paille sur la correction acoustique de la salle de conférence du centre culturel MALEK HADDAD à Constantine*, Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre n°46, Constantine 1, 2017, P183-191.
- **Filippini, Mikael.** *Etude acoustique de l'auditorium de Pigna*, Université de corse Pascal Paoli Faculté des sciences et techniques, 2003, 44 P.
- **Foreman, John.** *Sound analysis and noise control*, Springer Science & Business Media, 2012, 461 P.
- **Fry, Alan.** *Noise control in building services*, Sound Research Laboratories, Pergamon Press, 1988, 441 P.
- **Gagliano A, Nocera F, Cicero A, Gioia M C, Agrifoglio A.** *Analysis and acoustic correction of a contemporary Italian church*. Energy Procedia n°78, P 1623-1628.
- **Guigou Carter C, Bailhache S, Harnois S.** *Comparaison des réglementations acoustiques pour les locaux d'enseignements en Europe*, Conference: CFA/VISHNOAt: Le Mans, France, 2016, P 01-08.
- **Gramez Abdelghani, Boubenider Fouad.** *Acoustic comfort evaluation for a conference room: A case study*, Applied Acoustics n°118, 2017, P 39-49.
- **Gramez, Abdelghani.** *Etude du comportement acoustique des salles*.10ème congrès Français d'acoustique, Lyon, 2010, P 1-6.
- **Hald J, Song W, Haddad K, Jeong C, Richard A.** *In-situ impedance and absorption coefficient measurements using a double-layer microphone array*, Applied Acoustics, n° 143, 2019, P 74-83.
- Halliwell R E.** *Inter-laboratory variability of sound absorption measurement*, The Journal of the Acoustical Society of America n°73, 1983, P 880-886.

- **Hamayon, Loïc.** Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments, Editions Le Moniteur, Paris, 2008, 237 P.
- **Hamayon, Loïc.** Réussir l'Acoustique du Bâtiment (Conception architecturale- Isolation et correction acoustique), 3ème édition, Editions Le Moniteur, Paris, 2013, 286 P.
- **Hodgson Murray, Nosal Eva-Marie.** *Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms.* Journal of the Acoustical Society of America n°111(2), 2002, P : 931-939.
- **Hoshi K, Hanyu T, kuzono T, Sakagami K, Yairi M, Harada Shinji, Takahashi S, Ueda Y.** *Implementation experiment of a honeycomb-backed MPP sound absorber in a meeting room,* Applied Acoustics n° 157, 2020, P 1-9.
- **Huang S, Li S, Wang X, Mao D.** *Micro-perforated absorbers with incompletely partitioned cavities,* Applied Acoustics n° 126, 2017, P 114-119.
- **Januševičius T, Mažuolis J, Butkus D.** *Sound reduction in samples of environmentally friendly building materials and their compositions,* Applied Acoustics n°113, 2016, P 132-136.
- **Jedidi Malek et Soussi Chokri.** Acoustique du bâtiment Cours et exercices corrigés, Edilivre-Aparis, 2013, 148 P.
- **Jouhaneau Jacques.** Acoustique des salles et sonorisation, Collection Acoustique Appliquée, Technique et Documentation, 2000. 610 P.
- **Kahle, Eckhard.** Validation d'un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique dans un ensemble de salles de concerts et d'opéras, Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine Le Mans, 1995, 243 P.
- **Kleiner M, Klepper D L, Torres R R.** *Worship Space Acoustics,* J. Ross Publishing, 2010, 328 P.
- **Lamantia, Frédéric.** *Les territoires de l'opéra,* Cafés Géographiques de Toulouse, 2006, P 1-13
- **Laumont P, Berbigier A.** *L'Alfa et l'Expérimentation alfatière en Algérie, internationale d'agriculture tropicale,* 1953, P 125-140.

- **Le Houérou Henry Noël.** *Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique*, Science et changements planétaires / Sécheresse n° 6(2), 1995, P167-182.
- **Leppington Francis Godfrey.** *The transmission of randomly incident sound through an elastic panel*, Royal Society n° 426, 1989, P153-165.
- **Long, Marshall.** *Architectural acoustics*, Elsevier, Applications of Modern Acoustics Series, 2005, 872 P.
- **Maa Dah-You.** *Potential of microperforated panel absorber*, The Journal of the Acoustical Society of America n° 104(5), 1998. P 2861-2866.
- **Mamtaz H, Fouladi M, Nuawi M, Namasivayam S, Ghassem M, Al-atabi M.** *Acoustic absorption of fibro-granular composite with cylindrical grains*, Applied Acoustics, n° 126, 2017, P 58-67.
- **Mazri, Mouna.** *La Culture en tant que fait urbain. Lecture sur des indicateurs de développement culturel. Cas du secteur sauvegardé de Constantin, mémoire de magistère*, Université de Constantine, 2007, 188 P.
- **Merlin P, Choay C.** *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, Presses univ, France, 2009, 963 P.
- **Michel, Chagué.** *L'acoustique de l'habitat (principes fondamentaux. Application de la réglementation Française et Européenne)*, Editions Le Moniteur, paris 2001, 242 P.
- **Mirosław, Meissner.** *Analytical and numerical study of acoustic intensityfield in irregularly shaped room*, Applied Acoustics n°74, 2013, P 661-668.
- **Mir Sabeer, Abdou Adel,** *Investigation of Sound-Absorbing Material Configuration of a Smart Classroom Utilizing Computer Modeling*, Building Acoustics n°12(3), 2005, P 175-188.
- **Mohamed Dallel.** *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2012, 142 P.

- **Morales L, Leembruggen G, Dance S, Shield B M.** *A revised speech spectrum for STI calculations*, Applied Acoustics n°132, 2018, P: 33-42.
- **Mario, Rossi.** Audio, PPUR presses polytechniques, 2007, 782 P.
- **Munteanu C, Tamas-Gavrea D R, Cobirzan N, Aciu C, Fernea R, Demeter L D.** *Study on the Acoustic Rehabilitation of an Educational Building*, Procedia Engineering n°181, 2017, P131-138.
- **Nash Anthony.** *On the reproducibility of measuring random incidence sound absorption*, in Proceedings of Internoise n° 4, New York, 2012, p 1-12.
- **Navi, Parviz.** Propriétés acoustiques des matériaux: propagation des ondes planes harmoniques, PPUR presses polytechniques, 2006, 260 P.
- **Naylor G. M.** ODEON_ Another hybrid room acoustical model, Applied Acoustics n° 38, (2-4), 1993, P 131-143.
- **Nowoświat A, Olechowska M, Ślusarek J.** *Prediction of reverberation time using the residual minimization method*, Applied Acoustics, n° 106, 2016, P 42-50.
- **Octavio, Inácio.** Fundamentals of room acoustics, IACMA – International Advanced Course on Musical Acoustics, Bologna, Italy, 2005, 31 P.
- **ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas**, Applied Acoustics n° 71(12), 2010, P 1204-1210.
- **Or H K, Putra A, Selamat M Z,** Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber, Applied Acoustics n° 119, 2017, P 9-16.
- **Othmani C, Taktak M, Zain A, Hantati T, Dauchez N, Elnady T, Fakhfakh T, Haddar M.** *Acoustic characterization of a porous absorber based on recycled sugarcane wastes*, Applied Acoustics n°120, 2017, P 90-97.
- **Ouertani, Aida.** Acoustique appliquée aux bâtiments : Cours et problèmes résolus, Centre de publication universitaire USTOMB, 2004, 163 P
- **Pacheco-Torgal, F.** *Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020*, Construction and Building Materials n°51, 2014, 151-162.

- **Palmieri N, Forleo M B, Giannoccaro G, Suardi A.** *Environmental impact of cereal straw management: An on-farm assessment*, Journal of Cleaner Production n°142(4), 2017, P 2950-2964.
- **Ramrem Youssef.** Polycopié de cours Electroacoustique, Faculté d'Electronique et Informatique, USTHB, 2015, 95 P.
- **Passero C, Zannin P.** *Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with --* - **Qian Y J, Zhang J, Sun N.** *A strategy for extending the effective application of micro-perforated panel absorbers to high sound intensity*, Applied Acoustics n° 130, P 124-127.
- **Rhanem Mustapha.** *L'alfa (Stipa tenacissima L.) dans la plaine de Midelt (haut bassin versant de la Moulouya, Maroc) - Éléments de climatologie*, Géographie Physique et Environnement n°3, 2009, P 1-20.
- **Ricard Brigitte, Garon Rosaire.** *Les équipements culturels et la pratique culturelle dans la ville québécoise*, Loisir et société / Society and Leisure n°27(02), 2005, P 327-354.
- **Rindel, Jens Holger.** *Reflection of sound from finite-size plane and curved surfaces*, The Journal of the Acoustical Society of America n°118(3), 2005, P 1-43.
- **Rindel Jens Holger.** *Scattering in Room Acoustics and the Related Activities in ISO and AES*, Conference: 17th ICA, Rome, Italy, 2001, P 1-3.
- **Rudi, Joran.** *Sound and Meaning*, in Rudi, J. (Ed.) Absorption and Resonance - Sound and Meaning, Oslo: NOTAM, 2008, P 118-127.
- **Sabapathy Karthik A, Gedupudi Sateesh.** *Straw bale based constructions: Measurement of effective thermal transport properties*, Construction and Building Materials n°198, 2019, P 182-194.
- **Sakagami K, Morimoto M, Koike W.** *A basic study on double-leaf microperforated panel absorbers*, CD-ROM Proc. 18th ICA, Kyoto, Japan 2004, P 2393- 2396.
- **Sarah B, Knight E.I.T, Jack B. Evans P.E.** *Case Study: Four University Law Lecture Auditoria Renovated for Improved Acoustics*, Cleveland, Ohio NOISE-CON, 2003. P 1-7.

- **Schroeder, Manfred R.** *Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses*, The Journal of the Acoustical Society of America n° 66, 1979, p: 1-19.
- **Simonin-Adam Christine**, *Acoustique et réhabilitation: améliorer le confort sonore dans l'habitat existant*, Eyrolles, 2003, 381 P.
- **Szela A, Rubacha J, Pilch A, Majchrzak A, Kamisinski T.** *Reflective panels with Schroeder diffusers – a measure to broaden the effective frequency range of sound reflection from overhead stage canopies*, Applied Acoustics n° 157, P 1-8.
- **Taban E, Khavanin A, Ohadi A, Putra A, Jafarid A J, Faridan M, Soleimanian A.** *Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibres: Experimental and theoretical approaches*, Building and Environment n° 161, 2019, 106274.
- **Takahashi D, Tanaka M,** *Flexural vibration of perforated plates and porous elastic materials under acoustic loading*, The Journal of the Acoustical Society of America n° 112(4), 2002. P 1456-1464.
- **Tămaş-Gavrea D R, Munteanu C, Fernea R, Babotă F, Mureşan L.** *Study on the acoustic rehabilitation of a church*, Procedia Manufacturing n°22, 2018, P 384-391.
- **Toyoda M, Takahashi D.** *Sound transmission through a microperforated-panel structure with subdivided air cavities*, The Journal of the Acoustical Society of America n° 124(6), 2008. P 3594-3603.
- **Varin, Virgile.** *Le système Echo Bloc : traitement du signal dans les milieux réverbérants, mémoire en vue de l'obtention du Diplôme d'Etat d'Audioprothésiste*, Université Henri Poincaré, Nancy I Faculté de Pharmacie, 2011, 74 P.
- **Wang Z B, Choy Y S.** *Tunable parallel barriers using Helmholtz resonator*, Journal of Sound and Vibration n°443, 2019, P 109-123.
- **Yan Lei, Chena Yi.** *Finite Element Simulation in Fabrication of High Precision Reflector Panels*, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2012, P 1-10.

WEBOGRAPHIE

http://www.lam.jussieu.fr/Individu/Pellerin/pub/Acoustique_Architecturale_CNAM_2003.pdf

<http://www.coursgeniecivil.com>

<https://www.rex-montbrison42.fr/les-salles/>

<https://www.liberte-algerie.com/culture/un-joyau-darchitecture-257010>

<https://www.mediterraneanacoustics.com/olive-tree-lab-suite.html>

<http://www.euphonia.fr/presentation-catt.html>

<https://www.geonoise.com/odeon-room-acoustics-software/>

<https://www.esera.org/news/esera-announcements/250-new-phds-9>

LISTE DES ANNEXES

Annexe A

Caractérisation de la source omnidirectionnelle

Les mesurages en acoustique du bâtiment requièrent l'emploi de sources sonores conformes à la réglementation et à la normalisation (par exemple ISO 140). Pour les bruits de type aérien, la source omnidirectionnelle est indispensable. Dans cette optique une source omnidirectionnelle dotée de 11 haut-parleurs a été construite pour répondre à ce besoin. Tous les haut-parleurs de la source sont reliés par un réseau série parallèle assurant leur fonctionnement en phase et une impédance de sortie de 4.12Ω assurant l'adaptation d'impédance avec l'amplificateur de puissance sortant avec une impédance de 4Ω . Cette source, d'une masse ne dépassant pas les 15 Kg, est munie d'un adaptateur pouvant se fixer sur un trépied. Cette source sera pilotée par un amplificateur de puissance de type M-Audio 4000 doté d'une puissance de 120 Watts efficace. Cette puissance élevée de la source est idéale pour les mesurages des caractéristiques des grandes salles telles que le temps de réverbération et l'intelligibilité acoustique.

Les mesures de la directivité ont été réalisées en chambre anéchoïque de la faculté d'électronique et informatique de l'USTHB afin de mesurer uniquement le champ acoustique directe provenant de la source sans l'interférence des réflexions des murs. Ces mesures ont été effectuées par un sonomètre intégrateur professionnel de type soundtek ST107 et la source posée sur une table tournante assurant un pas de résolution d'angle de 7.5° . Le tableau de mesure comprend les réponses à 500Hz, 1KHz et 4KHz. On peut voir à travers ces résultats que l'omnidirectionnalité de la source est respectée pour l'ensemble des fréquences couvrant la bande de fréquence de la parole. Les mesures qui seront prises seront donc compatibles et normalisées aux normes des mesures acoustiques dans les bâtiments ISO 140.

Tableau des mesures de directivité pour les fréquences 500Hz, 1000 Hz et 4000 Hz en fonction de l'angle avec une résolution de 7,5°

| Angles en degrés | Fréquence 500Hz | Fréquence 1KHz | Fréquence 4KHz |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| - | Niveaux en dB | Niveaux en dB | Niveaux en dB |
| 0 | 67,1 | 69,3 | 63,9 |
| 7,5 | 68,7 | 70,2 | 62,6 |
| 15 | 69,6 | 71,7 | 63,4 |
| 22,5 | 70,4 | 72,4 | 62,8 |
| 30 | 69,6 | 71,6 | 62,1 |
| 37,5 | 71,8 | 71,9 | 61,1 |
| 45 | 70,3 | 71,4 | 62,8 |
| 52,5 | 71,6 | 70,8 | 63,2 |
| 60 | 71,9 | 69,5 | 64,1 |
| 67,5 | 70,2 | 67,9 | 62 |
| 75 | 68,9 | 68 | 60,2 |
| 82,5 | 68 | 65,9 | 60,8 |
| 90 | 69,9 | 64,4 | 60,3 |
| 97,5 | 68,6 | 67,8 | 58,7 |
| 105 | 67,8 | 71,5 | 60,2 |
| 112,5 | 67 | 73,8 | 66,6 |
| 120 | 66,7 | 74,5 | 69,6 |
| 127,5 | 67,7 | 74,1 | 70,3 |
| 135 | 67,9 | 72,6 | 71,4 |
| 142,7 | 69,7 | 71 | 71,8 |
| 150 | 69,9 | 69,9 | 73,3 |
| 157,5 | 68,1 | 66,6 | 71,5 |
| 165 | 66 | 64,6 | 62,3 |
| 172,5 | 65,8 | 64,9 | 63,4 |
| 180 | 65,4 | 68,1 | 68,8 |
| 187,5 | 65 | 71,5 | 69,8 |
| 195 | 65,1 | 73,2 | 61,1 |
| 202,5 | 65,3 | 74,3 | 60,9 |
| 210 | 67,5 | 74,8 | 59,6 |
| 217,5 | 68,5 | 73,8 | 58,2 |
| 225 | 69,6 | 71 | 61,9 |
| 232,5 | 70,2 | 70,8 | 60,8 |
| 240 | 69,7 | 68,8 | 60,9 |
| 247,5 | 69,4 | 67,8 | 60,4 |
| 255 | 69,1 | 66,9 | 58,8 |
| 262,5 | 68,6 | 67,7 | 60,6 |
| 270 | 68 | 70,1 | 62,3 |
| 277,5 | 67,2 | 71,8 | 66 |
| 285 | 65,9 | 73,3 | 64,1 |
| 292,5 | 65 | 73,8 | 62,5 |
| 300 | 64,5 | 73,4 | 60,5 |
| 307,5 | 65,5 | 72,3 | 62,8 |
| 315 | 67,4 | 70,4 | 63 |

| | | | |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| 322,5 | 67,8 | 68,2 | 64,4 |
| 330 | 67,9 | 66,3 | 66,3 |
| 337,5 | 67,7 | 64 | 65,1 |
| 345 | 67,4 | 64,3 | 64 |
| 352,5 | 67,4 | 64,1 | 63,1 |
| 360 | 67 | 69,4 | 63,5 |

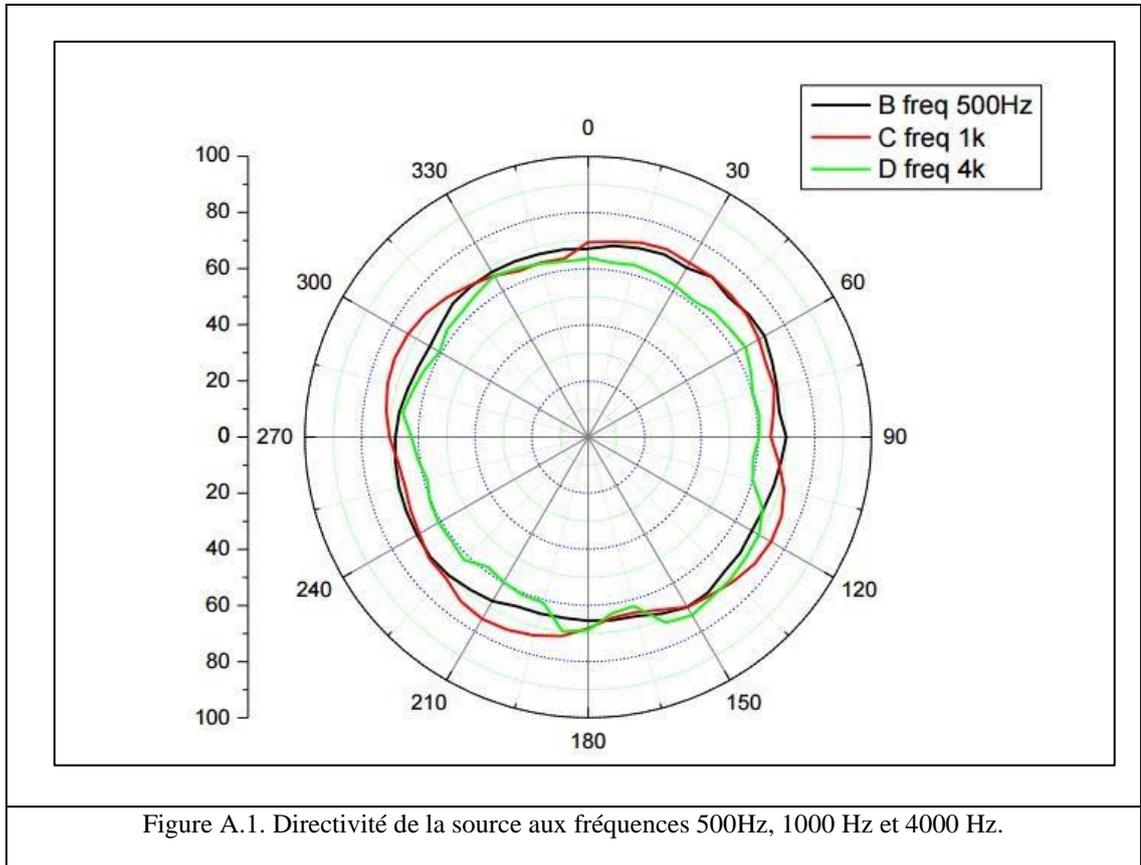


Figure A.1. Directivité de la source aux fréquences 500Hz, 1000 Hz et 4000 Hz.

Annexe B

Résultats obtenus pour la salle de conférence de la maison de culture El Khalifa

Les résultats de la simulation numérique pour la salle de conférence de la maison de culture El Khalifa avant et après sa réhabilitation sont représentés sur les figures (figure A.2, figure A.3, figure A.4, figure A.5).

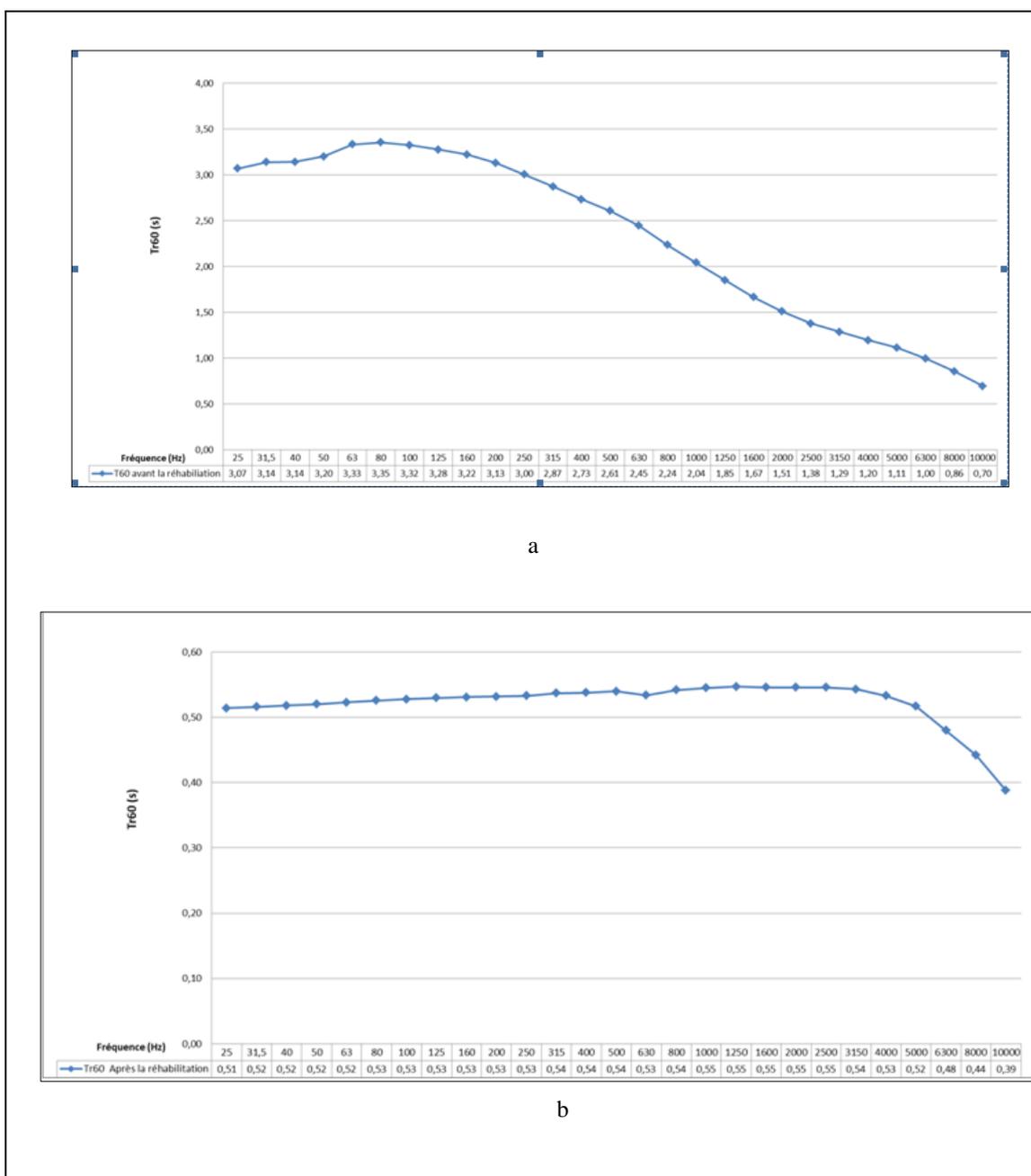
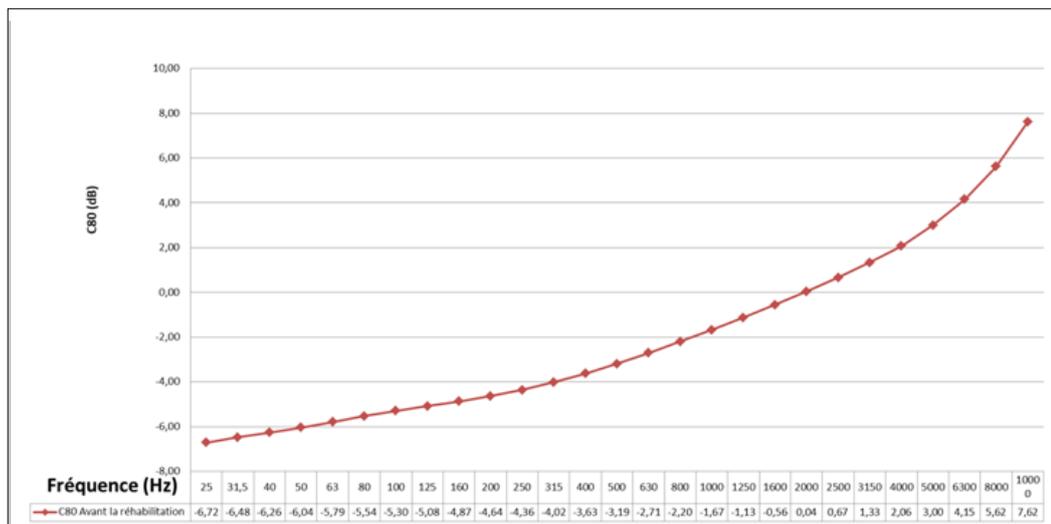
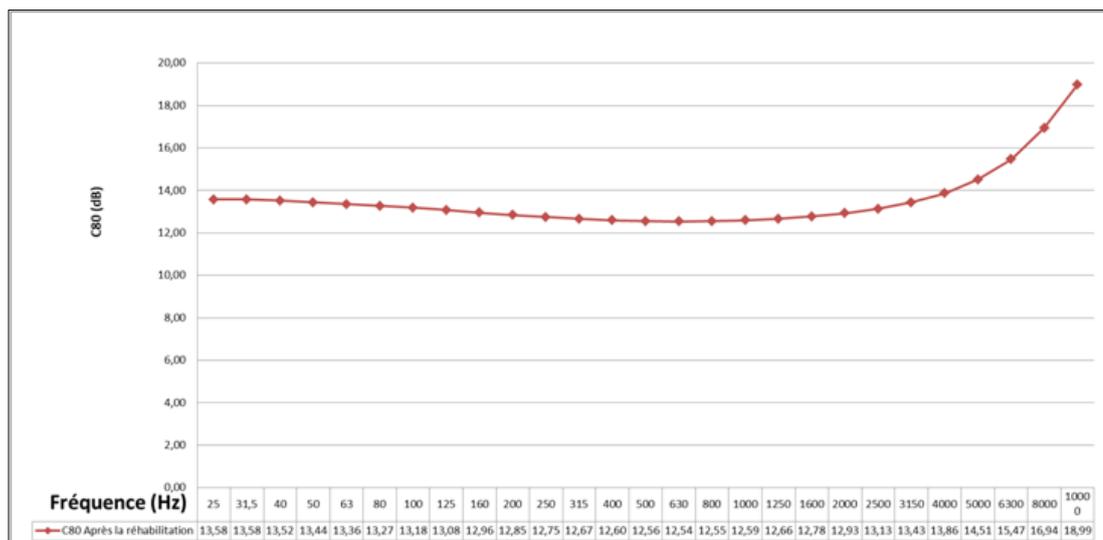


Figure A 2: a : Valeurs du TR60 avant la réhabilitation de la salle. **b** : Valeurs du TR60 après la réhabilitation de la salle. Source: auteur 2019.

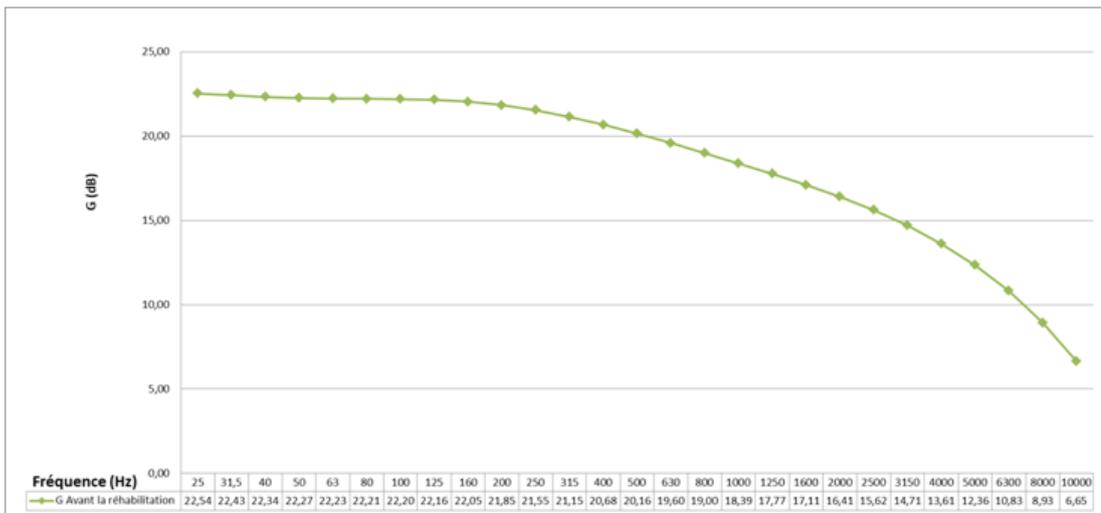


a

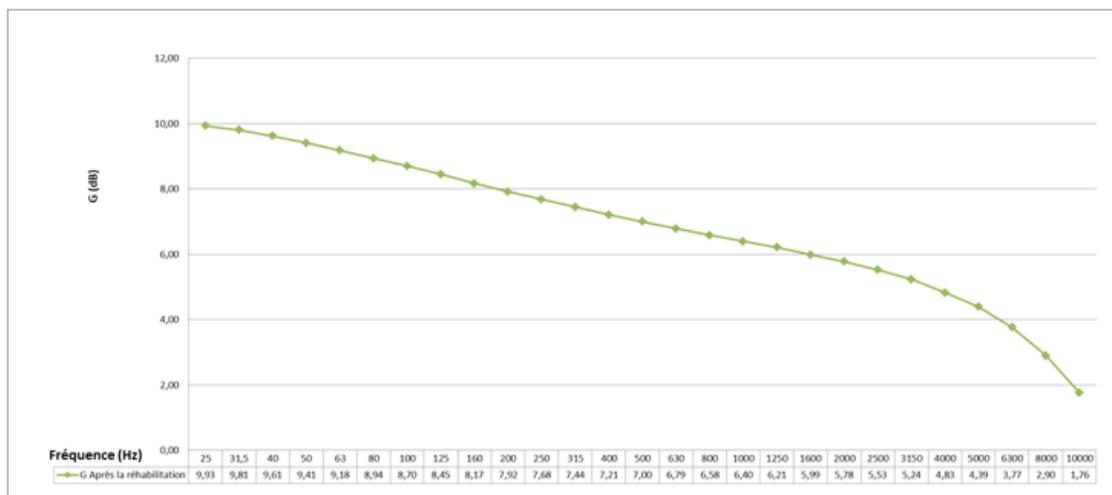


b

Figure A.3 : a : Valeurs du C80 avant la réhabilitation de la salle. **b :** Valeurs du C80 après la réhabilitation de la salle. Source: auteur 2019.

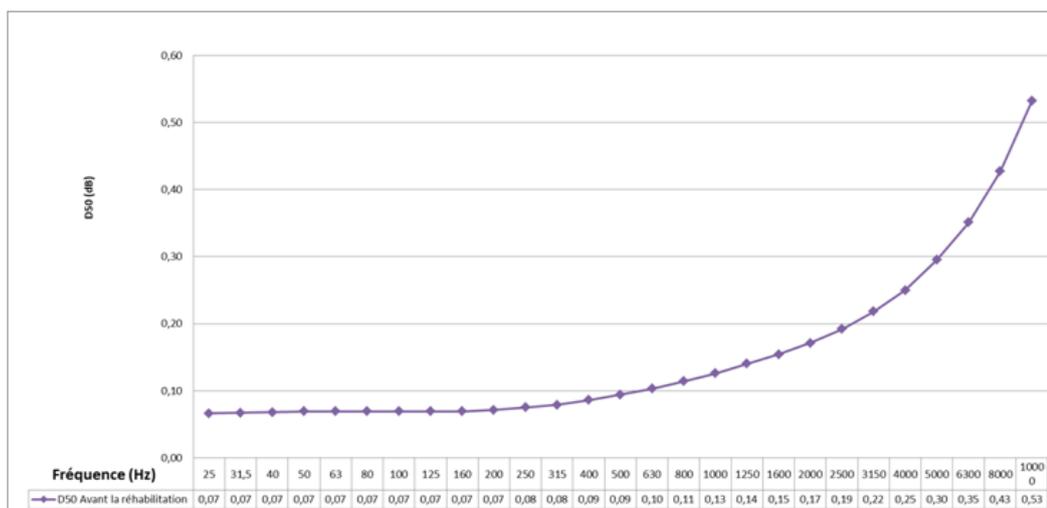


a

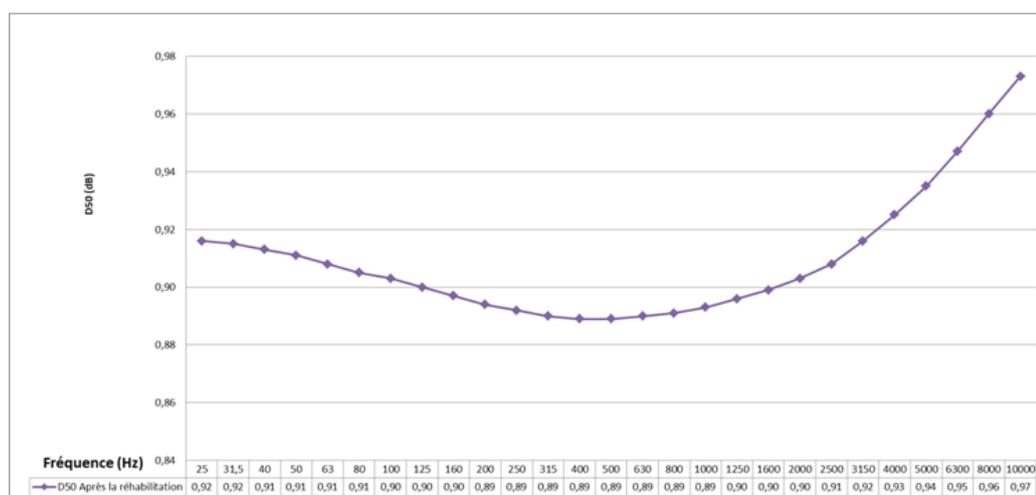


b

Figure A.4 : a : Valeurs du G avant la réhabilitation de la salle. **b :** Valeurs du G après la réhabilitation de la salle. Source: auteur 2019.



a



b

Figure A.5 : a : Valeurs du G avant la réhabilitation de la salle. b : Valeurs du G après la réhabilitation de la salle. Source: auteur 2019.

Annexe C

Iso 3382

Licensed Copy: Southampton ATHENS, University of Southampton, 10/09/2009 14:41, Uncontrolled Copy, (c) BSI

BRITISH STANDARD

BS EN ISO
3382-1:2009

Acoustics — Measurement of room acoustic parameters

Part 1: Performance spaces (ISO
3382-1:2009)

ICS 91.120.20

NO COPYING WITHOUT BSI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW

BSi
British Standards

BS EN ISO 3382-1:2009
ISO 3382-1:2009(E)

- a) the materials of the boundary surfaces and any suspended elements are such that, judged in terms of their absorption and diffusion properties, they are reasonably evenly distributed among the surfaces which surround the room, and
- b) all parts of the room volume communicate reasonably equally with each other, in which case three or four microphone positions will be adequate — these positions being chosen to cover the seating area, in an evenly spaced array — and the results of the measurements may be averaged.

For a) above, if the ceiling, side, front and rear walls, when assessed individually, have no regions covering more than 50 % of their respective areas, with properties different from those of the remaining surfaces, then it may be considered that the distribution is acceptably even (in some spaces it can be helpful to approximate the room geometry to a rectangular parallelepiped for this assessment).

For b) above, the room volume may be considered to operate as a single space if there are no parts of the floor area which have their lines-of-sight blocked to any other part of the room that is more than 10 % of the total room volume.

If these conditions are not satisfied, then the room is likely to show areas with differing reverberation times, and these shall be investigated and measured separately.

5 Measurement procedures

5.1 General

Two methods of measuring the reverberation time are described in this part of ISO 3382: the interrupted noise method and the integrated impulse response method. Both methods have the same expectation value. The frequency range depends on the purpose of the measurements. Where there is no requirement for specific frequency bands, the frequency range should cover at least 250 Hz to 2 000 Hz for the survey method. For the engineering and precision methods, the frequency range should cover at least 125 Hz to 4 000 Hz in octave bands, or 100 Hz to 5 000 Hz in one-third octave bands.

5.2 Interrupted noise method

5.2.1 Excitation of the room

A loudspeaker source shall be used and the signal fed into the loudspeaker shall be derived from broadband random or pseudo-random electrical noise. When using a pseudo-random noise, it shall be randomly ceased, not using a repeated sequence. The source shall be able to produce a sound pressure level sufficient to ensure a decay curve starting at least 35 dB above the background noise in the corresponding frequency band. If T_{30} is to be measured, it is necessary to create a level at least 45 dB above the background level in each frequency band.

For measurements in octave bands, the bandwidth of the signal shall be greater than one octave, and for measurements in one-third-octave bands, the bandwidth of the signal shall be greater than one-third octave. The spectrum shall be reasonably flat within the actual octave band to be measured. Alternatively, the broadband noise spectrum may be shaped to provide a pink spectrum of steady-state reverberant sound in the enclosure from 88 Hz to 5 657 Hz. Thus, the frequency range covers the one-third-octave bands with mid-band frequencies from 100 Hz to 5 kHz or octave bands from 125 Hz to 4 kHz.

For the engineering and precision methods, the duration of excitation of the room needs to be sufficient for the sound field to have achieved a steady state before the source is switched off. Thus, it is essential for the noise to be radiated for at least a few seconds and not less than half the reverberation time.

For the survey method, a short excitation or an impulse signal may be used as an alternative to the interrupted noise signal. However, in that case, the measuring accuracy is less than that stated in 7.1.

Auditorium measures derived from impulse responses

A.1 General

Subjective studies of the acoustical characteristics of auditoria have shown that several quantities that can be obtained from measured impulse responses are correlated with particular subjective aspects of the acoustical character of an auditorium. While reverberation time is one fundamental description of the acoustical character of an auditorium, the addition of values of these newer quantities gives a more complete description of the acoustical conditions in the auditorium. The quantities included in this annex are limited to those that have been found to be subjectively important and that can be obtained directly from integrating impulse responses. The introduction of an audience into an auditorium can be expected to influence the reverberation time and the quantities listed below.

There are five groups or types of quantities (see Table A.1). Within each group there is often more than one measure, but values of the different quantities in each group are usually found to be strongly correlated with each other. Thus, each group contains a number of approximately equivalent measures and it is not necessary to calculate values of all of them; nevertheless, at least one quantity should be included from each of the five groups.

Table A.1 — Acoustic quantities grouped according to listener aspects

| Subjective listener aspect | Acoustic quantity | Single number frequency averaging ^a Hz | Just noticeable difference (JND) | Typical range ^b |
|-----------------------------|--|--|----------------------------------|----------------------------|
| Subjective level of sound | Sound strength, G , in decibels | 500 to 1 000 | 1 dB | -2 dB; +10 dB |
| Perceived reverberance | Early decay time (EDT) in seconds | 500 to 1 000 | Rel. 5 % | 1,0 s; 3,0 s |
| Perceived clarity of sound | Clarity, C_{80} , in decibels | 500 to 1 000 | 1 dB | -5 dB; +5 dB |
| | Definition, D_{50} | 500 to 1 000 | 0,05 | 0,3; 0,7 |
| | Centre time, T_{50} , in milliseconds | 500 to 1 000 | 10 ms | 60 ms; 260 ms |
| Apparent source width (ASW) | Early lateral energy fraction, J_{LF} or J_{LFC} | 125 to 1 000 | 0,05 | 0,05; 0,35 |
| Listener envelopment (LEV) | Late lateral sound level, L_L , in decibels | 125 to 1 000 | Not known | -14 dB; +1 dB |

^a The single number frequency averaging denotes the arithmetical average for the octave bands, except for L_L which shall be energy averaged [see (A.17)].

^b Frequency-averaged values in single positions in non-occupied concert and multi-purpose halls up to 25 000 m³.

A.3 Measurement procedure

A.3.1 Source

The source and associated equipment should be adequate to radiate a sufficient signal level in all of the octave bands for 125 Hz to 4 000 Hz, so that an adequate decay range is achieved in each octave band. The source shall be as omnidirectional as possible (see 4.2.1).

For tests relating to conditions with a human speaker, a source with a directivity approximating a human speaker may be used. Dummy heads that comply with Reference [6] may be used without an explicit check of the directivity pattern.

A.3.2 Microphones

An omnidirectional microphone should be used to measure the impulse response for all of the measures.

For J_{LF} values, a figure-of-eight pattern microphone is also required, and the relative sensitivities of the omnidirectional and figure-of-eight microphones in the direction of maximum sensitivity should be calibrated in a free sound field.

For G values, the sensitivity of the omnidirectional microphone shall be calibrated.

A.3.3 Impulse responses

Octave band impulse responses are necessary for the calculation of all quantities. These can be obtained using an impulsive source, such as a blank pistol, or from more complex techniques requiring the calculation of the impulse response from various types of signals radiated from loudspeakers. If the resulting impulse response is not exactly repeatable, then results should be the average of several repeated measurements at the same position.

Blank pistols can be modified to be closely omnidirectional, but do not produce exactly repeatable impulse responses. They can produce very high sound levels, providing results with a desirable large dynamic range, but this can lead to non-linear effects close to the gun.

Methods using a loudspeaker source are limited by the frequency and directional response of the loudspeaker. The average frequency response can, to some extent, be corrected, but variations with direction cannot be eliminated and become significantly large at higher frequencies. Using a loudspeaker to radiate various pulse signals is usually not very successful because of the limited dynamic range of the resulting impulse response, unless many pulse responses are synchronously averaged. Cross-correlation of the source signal and the received signal can provide impulse responses with good dynamic range and immunity to noise (see ISO 18233). The use of fast Hadamard transforms and MLS signals is one successful correlation-type approach [14]. Other signals with broad smooth spectrum, such as chirps and linear sweeps, can also be successfully used.

A.3.4 Time-windowing and filtering of responses

Impulse responses should be filtered into octave bands.

Filters create signal delays which can be quite significant for the narrower bandwidth, lower frequency octave bands. Thus, the start of the filtered impulse is delayed relative to the unfiltered signal, and the filtered signal also continues on after the end of the unfiltered signal. This creates particular problems for measures such as C_{50} or fraction of energy J_{LF} , where the short early time interval portions of the signals are filtered into octave bands.

The best approach for avoiding the filter delay problems is to time-window the broadband impulse response before any filtering. The start of the impulse response for the equations given in A.2 should be determined from the broadband impulse response, where the signal first rises significantly above the background but is

more than 20 dB below the maximum. The early and late components of the impulse response are filtered separately, and the integration periods in the equations of A.2 are increased to include the energy delayed by the filters.

An approximation to the above window-before-filtering approach can be obtained using a window correction^[7]. If the impulse signals are first filtered into octave bands, the start of the integrations for the equations of A.2 should be determined as the point where the filtered signal first rises significantly above the background but is more than 20 dB below the maximum. The early time interval, t_{e1} , shall start from this trigger point and continue for t_{e1} , in seconds, plus half the filter delay time. The late time interval should start from the point t_{e1} , in seconds, plus half the filter delay time after the trigger point. In this context, the filter delay time is the time for half the energy from the filter when fed with an impulse.

Because the direct and early-arriving low frequency sound can be significantly attenuated, determining the start of the low frequency responses may not be possible. It may be necessary to determine the start time from the broadband or high frequency impulse responses and the measured delay of the filters.

A.3.5 Decay curves

The integrated impulse response technique (reverse integration) according to 5.3.3 should be used to obtain integrated octave band decay curves from which decay times are calculated. For convenience, other measures can also be calculated from these decay curves, assuming the correct time-windowing is carried out. This approach requires that the start time of each octave band response be correctly obtained from the broadband response. In other situations, forward integration can be used to separately obtain values of other quantities.

A.4 Measurement positions

The various measures are not statistical properties of the entire auditorium and will vary systematically from seat to seat. It is therefore important to include an adequate number of source and receiver positions to characterize the entire hall.

Normally, a minimum of three on-stage source positions should be used. In halls with large stages or orchestra pits, more source positions should be used. In small lecture theatres where the normal source has only one location in the room, a single source position would be acceptable.

The source should be at positions representative of those used by performers in the hall. Because most halls are symmetrical about the centre line, receiver positions can be arranged on only one side of the hall with source positions located symmetrically about the centre line. Thus there could be one central source position with other source positions at equal distances stage-right and stage-left of the centreline. A source height of 1,5 m is recommended to avoid low frequency modification of the output power of the source in the frequency range of the measurements.

If the source directivity is close to the minimum limits given in Table 1, the measurement should be repeated with the source turned in at least three steps totally. The resulting parameters related to the different angles of the source should be arithmetically averaged.

A minimum of between 6 and 10 representative microphone positions should be used, depending on the size of the hall. Table A.2 gives the minimum recommended number of receiver positions as a function of hall size. The receiver positions should be evenly distributed over all audience seating areas. Where a hall is broken up into separate areas, such as balconies and under-balcony areas, more receiver locations will be necessary.

The microphone should be placed at a height of 1,2 m above the floor at audience seat locations in order to be representative of a seated listener's ear height.

Source and receiver positions and heights should be noted with the results. Similarly, on-stage conditions such as the presence of chairs and music stands should be noted because they will produce measurable effects on the results.

LA REHABILITATION ACOUSTIQUE DURABLE DES SALLES DE CONFÉRENCES : IMPACT DE LA PAILLE SUR LA CORRECTION ACOUSTIQUE DE LA SALLE DE CONFÉRENCE DU CENTRE CULTUREL MALEK HADDAD A CONSTANTINE.

Dalal Farid-Ibrir, Samira Debache-Benzagouta

Université Salah BOUBNIDER, Constantine 3

Reçu le 11/10/2016 – Accepté le 07/12/2017

Résumé

La présente recherche s'articule autour d'une étude critique sur la caractérisation acoustique de la salle de conférence du centre culturel Malek Haddad. La modélisation et la simulation acoustique sur le logiciel Olive Tree Lab SUITE a permis de définir les performances des matériaux utilisés dans la réhabilitation acoustique. Les réponses impulsionnelles intégrées ont été mesurées pour déterminer les paramètres objectifs acoustiques : le temps de réverbération (TR), la clarté (C80), la force sonore (G), l'indice (D50) et l'intelligibilité de la parole (STI) selon les normes internationales ISO/DIS 3382-1 [1]. Suite à ces résultats, une recherche approfondie sur les matériaux écologiques disponibles a été entamée dans le but d'apporter des améliorations au cas étudié et la possibilité de généraliser les résultats. Notre choix a été fait sur les panneaux de paille épais 0,10 m recouvert par des panneaux MDF (Medium Density Fiber board ; qui sont des panneaux composites de fibres de bois à densité moyenne) perforés, et qui présentent deux objectifs : protéger les matériaux absorbants contre les dommages et améliorer dans une large mesure leur apparence. Le rôle de la paille en tant que matériau absorbant s'est avéré capital dans l'optimisation du temps de réverbération et les autres indices de la qualité acoustique de la salle.

Mots clés : réhabilitation-acoustique des salles-correction- paille- matériau écologique- temps de réverbération - intelligibilité de la parole.

Abstract

The present research is based on a critical study on the acoustic characterization of the conference room of the Malek Haddad Cultural Center. Modeling and acoustic simulation on the Olive Tree Lab SUITE software enabled to define the performances of the materials used in acoustic rehabilitation. Integral impulse responses were measured to determine the acoustic objective parameters: reverberation time (TR), clarity (C80), sound force (G), index (D50) and speech intelligibility (STI) According to international standards ISO / DIS 3382-1. Following these results, an in-depth research on the available ecological materials was initiated with the aim of making improvements to the case studied and the possibility of generalizing the results. Our choice was made on 0.10 m thick straw board covered with perforated MDF (Medium Density Fiber Board) panels with two lenses; Protect absorbent materials from damage and improve their appearance to a large extent. The role of the straw as an absorbing material proved to be crucial in the optimization of the reverberation time and other indices of the acoustic quality of the room.

Keywords: rehabilitation - room acoustics - correction - straw - ecological material - reverberation time - speech intelligibility.

ملخص

يدور هذا البحث حول دراسة نقدية على التوصيف الصوتي لقاعة المؤتمرات في المركز الثقافي مالك حداد. حيث حددت النمذجة والمحاكاة الصوتية على برنامج Olive-Tree-Lab-SUITE الذي أتاح لنا معرفة أداء المواد المستخدمة في إعادة التأهيل الصوتي. تم قياس رنود دفعة متكاملة لتحديد المعايير الموضوعية الصوتية: وقت الصدى (RT)، الوضوح (C80)، البريق (L) المؤشر (D50) و وضوح الكلام (STI) وفقا للمعايير الدولية [1, ISO / DIS 3382-1]. بعد هذه النتائج، تم الشروع في بحث معمق على المواد الصديقة للبيئة والمتاحة من أجل إدخال تحسينات على دراسة الحالة وإمكانية تعميم النتائج. وجاء خيارنا على ألواح من القش 0.10 متر مغطاة بألواح ليغية متوسطة الكثافة متقبة، والتي لها غرضين. كمواد ماصة للصوت. حماية ضد التلف وتحسين إلى حد كبير المظهر. وقد ثبت دور القش كمادة امتصاص حاسمة في تحقيق الاستفادة المثلى من وقت الصدى وغيرها من مؤشرات الجودة الصوتية للقاعة.

الكلمات المفتاحية: إعادة التأهيل - صوتيات القاعات - تصحيح - القش - المواد الصديقة للبيئة - وقت الصدى - وضوح الكلام.

Introduction :

L'acoustique des salles de conférences est une discipline très spécifique, mais qui toutefois a fait l'objet d'études standards et plutôt générales. Les anciennes et les nouvelles conceptions de ces salles ne prennent pas en compte les principes acoustiques qui privilégient une intelligibilité optimisée et un temps de réverbération adéquat. C'est pourquoi, nous nous intéressons dans cet article, à travers une enquête expérimentale, à l'étude de la performance acoustique de la salle de conférence de MALEK HADDAD. L'objectif étant de caractériser la répartition de l'énergie sonore et la qualité acoustique, avant et après sa réhabilitation à l'aide d'une simulation du logiciel Olive Tree Lab SUITE et proposer des interventions adaptées aux corrections acoustiques en intégrant des matériaux durables.

II. METHODOLOGIE ADOPTEE :

Dans le cadre de ce travail, une analyse acoustique de la salle de conférence du centre culturel MALEK HADDAD a été établie à l'aide du logiciel Olive Tree Lab SUITE ce qui nous a permis de définir le temps de réverbération TR60 et les indices d'intelligibilité (C80, G, D50 et STI) avant et après réhabilitation. Les résultats obtenus ont été utilisés pour faire une comparaison entre les différents indices et leurs valeurs optimales selon les normes ISO/DIS 3382-1 [1]. Le temps de réverbération optimal de la salle a été calculé en utilisant la formule (2005a, 2005b, William et Joseph, 1999) : $T_{CR,300} = 0.3 \log_{10} \frac{V}{s}$ [2].

Cette analyse nous a permis de définir, les défaillances acoustiques et les problèmes sonores de la salle. En conséquence, des propositions ont été suggérées pour améliorer la qualité acoustique et atteindre les valeurs optimales (Figure 1).

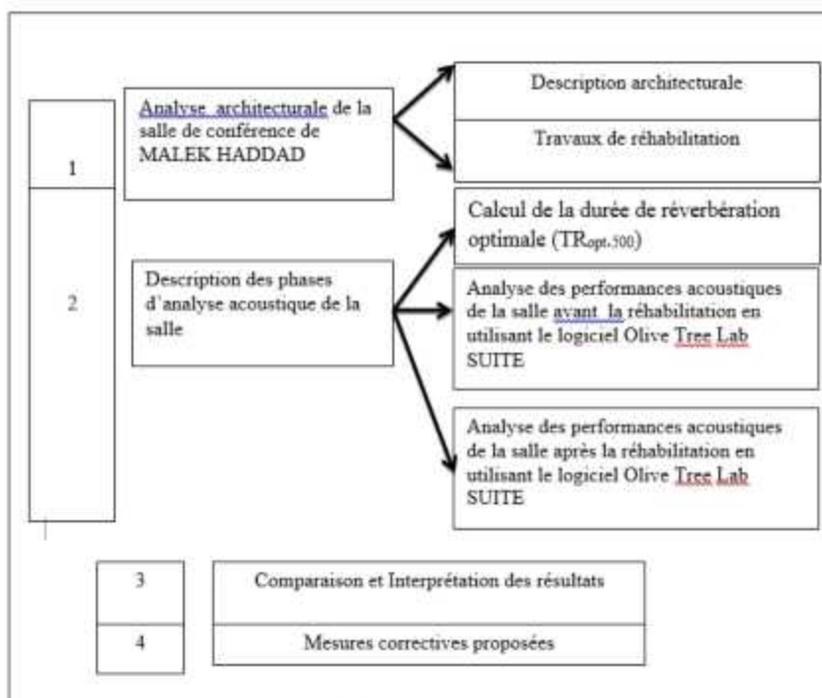


Figure 1 - Méthodologie adoptée. Source : auteur.

III. MATERIELS UTILISE

Les outils utilisés lors de ce travail d'investigation sont :

- **Olive TreeLab Suite** : un logiciel couvrant un large éventail de domaines en acoustique: terrain, salles, bureau, il est un environnement unique, pratique, exact et précis de simulation acoustique basée sur l'état des méthodes de l'art. Il offre aux utilisateurs un laboratoire virtuel où ils peuvent expérimenter et étudier les effets des paramètres acoustiques et leurs conceptions.
- **AutoCAD** : un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO) créé en décembre 1982 par Autodesk¹.
- **TrimbleSketchUp** : un logiciel de modélisation 3D, d'animation et de cartographie orienté vers l'architecture. Initialement édité par la société @Last Software (racheté ensuite par Google), ce logiciel se caractérise par des outils simples (rotation, extrusion, déplacement, etc.), qui en font un logiciel de 3D très différent des modéliseurs 3D classiques. Il a été racheté en 2012 par la société Trimble².

IV. Analyse architecturale de la salle de conférence du centre culturel MALEK HADDAD :

IV.1.Présentation du centre culturel :

Le centre culturel MALEK HADDAD est considéré comme l'un des plus importants équipements culturels à Constantine; il est situé dans la cité urbaine des combattants au sud du centre-ville de Constantine, Algérie (Figure 2). Le projet est entouré par des équipements résidentiels, pédagogiques et militaires. Il a été conçu par le bureau d'étude de la wilaya de Constantine (SAU), et inauguré le 16 avril 1996. Il a connu une opération de réhabilitation en 2014 par l'architecte Med Yzid Cheribet en collaboration avec l'architecte espagnole Marc Vidal.

Cet édifice comprend plusieurs ateliers (informatique, art plastique, musique, théâtre, etc...), une salle de conférence et un immense hall d'exposition ouvert au public.

IV.2.Description architecturale de la salle de conférence :

La salle de conférence de Malek Haddad est en forme d'éventail (Figure 3). Elle se compose de trois parties; scène, salle et balcon (Figure 4). La superficie totale des trois parties est de 785,25 m². Le volume total de la salle (y compris la scène et le volume au-dessus du plafond suspendu) est d'environ 5583,05 m³. La capacité totale de la salle est d'environ 620spectateurs répartis entre le sol

(environ 74%) et le balcon (environ 26%). Avec cette capacité, la salle peut être considérée comme l'une des plus grandes salles de conférence de la ville de Constantine. Le tableau N°1 présente les données architecturales et géométriques les plus importantes de la salle.



Figure 2 - Plan de situation .Source : googleEarth 2017

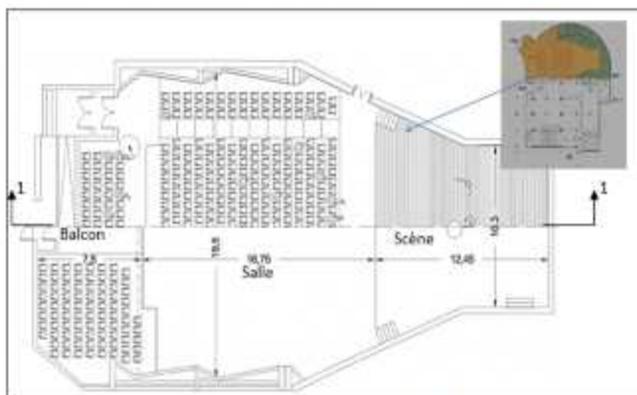


Figure 3 -Plan des deux niveaux de la salle. Source : auteur

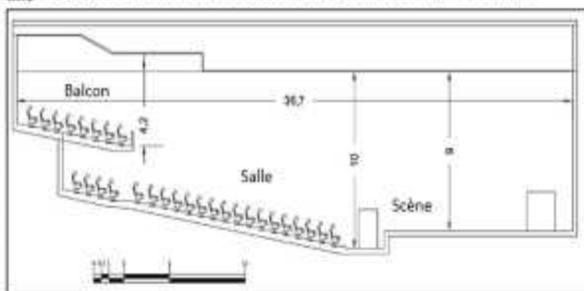


Figure 4 : Coup longitudinal I.1. Source : auteur.

¹www.autodesk.fr/products/autocad-lt/overview

²<https://www.sketchup.com/fr>

Tableau 1. Données architecturales et géométriques de la salle de conférence [3]

| Surface et périmètre | | | | | | | |
|--|---------|---------|----------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Scène | Salle | Balcon | Total (sol + balcon) | Superficie nette d'audience | | périmètre | Sh ⁰ m ¹ |
| | | | | Salle | Balcon | | |
| 143 | 494,55 | 147,7 | 642,25 | 214,15 | 80,25 | 107,8 | 0,15 |
| Volumen ^b (m ³) | | | | Capacité max de pers. | | D _{MAX} ^d (m) | |
| Scène | Salle | Total | Ff ^c % | Sol | Balcon | Sol | Balcon |
| 1716 | 3867,05 | 5583,05 | 1,27 | 460 | 160 | 14,8 | 25 |
| Données géométriques | | | | | | | |
| Surface/personne (m ²) | | | | Volume/personne (m ³) | | | |
| Net | | Brut | | | | | |
| Sol | Balcon | Sol | Balcon | Sol | Sous balcon | le Balcon | |
| 0,47 | 0,50 | 1,08 | 0,92 | 9,8 | 4,62 | 6,46 | |

^a Facteur de forme (principalement, c'est le rapport périmètre / surface)

^b Sous le plafond suspendu

^c Pour la pièce considérée, la hauteur de la salle est prise comme la hauteur moyenne, calculée comme suite : le volume total de la pièce / surface nette = 7.82 m

^d La distance entre la source sonore (située au milieu de l'étage) et l'auditeur distant

^e Calcul (surface brute / personne x hauteur moyenne de la salle, sous le balcon ou le balcon)

IV.2. Réhabilitation acoustique de la salle de conférence de MALEK HADDAD:

Les travaux de réhabilitation ont consisté à l'habillage de tous les murs et du plafond de la salle par les panneaux de **Placoplatre (BA13) perforé et la laine de roche** afin d'améliorer et renforcer la qualité acoustique sans modifier la forme. (Figure 5) et (Figure 6).



Figure 5 : La salle avant réhabilitation. (Source : Auteur)



Figure 6 : La salle après réhabilitation. (Source :Auteur)

V. Détermination des valeurs optimales des indices de la qualité acoustique :

V.1. Temps de réverbération- TR: le critère acoustique le plus important dans n'importe quelle salle de conférence. La meilleure conception phonique est celle qui assure aux oreilles une réception non distordue des sons de la parole. Cela nécessite de maintenir TR_{0,1-500} à sa limite inférieure acceptée. Une bonne approximation pour l'optimum TR_{0,1-500} dans une salle de parole (de volume V, m³) peut être obtenue à partir de la formule : $T_{0,1-500} = 0.3 \log_{10} \frac{V}{s}$ [2]. Après le calcul nous avons obtenu un temps de réverbération optimal TR_{0,1-500} de 0,85 s.

V.2. Clarté sonore (C80) : elle représente le rapport de l'énergie parvenant à l'auditeur durant les 80 premières millisecondes à l'énergie arrivant après ces 80 ms jusqu'à l'extinction du signal exprimée en dB [4].

V.3. Force sonore G : est l'écart entre le niveau de pression acoustique L_p observé en un emplacement donné et le niveau de puissance acoustique de l'émission L_w elle est exprimée en dB [4].

V.4. Indice D50 : La clarté de la parole peut être évaluée objectivement par la mesure d'un paramètre dérivé de la réponse impulsionnelle de la salle, appelée «Deutlichkeit» D50 est défini comme le rapport de l'énergie sonore, directe et réfléchie, contenu dans les 50 premières minutes de la courbe de décroissance et de l'énergie totale de l'impulsion sonore exprimée en points de pourcentage. Le paramètre est calculé séparément par Olive TreeLab Suite pour chaque bande de fréquences de 63 Hz à 8000 Hz. La valeur obtenue à partir de la moyenne des bandes à 500 et 1000 Hz.

V.5. Intelligibilité de la parole: dont l'indicateur est STI (Indices de Transmission de la Parole): La méthode du STI permet d'obtenir des mesures objectives de l'intelligibilité de la parole en pourcentage [4].

Tableau 2. Les valeurs optimales sont obtenues selon ISO/DIS 3382-1 [1]

| L'indice | Valeurs optimales selon ISO 3382-1[1] | | | | | |
|----------|---|----------|---------------|-------|------------|---|
| C80 | -1dB<C80 _{opt} <+3dB En fréquence 500Hz et 1000 Hz | | | | | |
| G | 1<G _{opt} <10 En fréquence 500Hz et 1000 Hz | | | | | |
| D80 | -0,3<D50 _{opt} <+0,7 | | | | | |
| STI | 0 | 0,30 | 0,45 | 0,60 | 0,75 | 1 |
| | Très mauvaise | mauvaise | satisfaisante | bonne | Très bonne | |

VI. Analyse des performances acoustiques avant et après réhabilitation :

En utilisant le logiciel de SKETCHUP, un modèle 3D a été construit (Figure 7). Ce modèle contient tous les détails architecturaux et les différents matériaux de finition. Il comprend également les positions suggérées pour deux haut-parleurs en plus de la source sonore principale située au milieu de la scène à la position du locuteur. Le modèle a été analysé acoustiquement en utilisant le logiciel Olive Tree LabSUITE pour calculer les indicateurs acoustiques considérés : relatifs à l'intelligibilité de la parole et pour vérifier leur compatibilité avec leurs valeurs optimales, (Figure 8). En simulation, la salle était considérée comme étant occupée. Les coefficients d'absorption «a» pour les différentes faces des modèles ont été choisis dans le tableau standard donné par Olive Tree Lab SUITE, sauf pour la paille dont le «a» a été introduit au programme du logiciel (Tableau 3), [1]. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 3 : Coefficient d'absorption acoustique de la paille

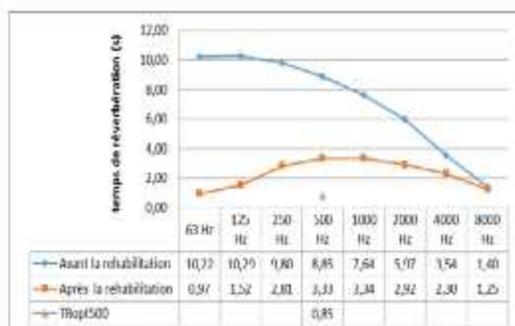
| Matériau | Fréquences(Hz) | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Panneau de paille ep.10cm | - | 0,21 | 0,25 | 0,63 | 0,96 | 0,92 | - | - |

Tableau 4 : Comparaison entre les différentes caractéristiques acoustiques de la salle avant et après réhabilitation et leurs valeurs optimales.

| Indication | avant réhabilitation | après réhabilitation | Valeurs optimales |
|------------|---|---|--|
| T60 | temps réverbération haut, en particulier dans les bandes basses (125Hz) 10,29s et moyennes (1000Hz) 7,65 s. | TR60 à atteint 3,34s en moyenne fréquence et basse fréquence 0,97 s et en haute fréquence 1,25 s. | TR _{opt1000} =0,85 s |
| C80 | C80 en augmentation de- 6,51(63Hz) jusqu'au- 0,87(800Hz) | C80 en diminution de basse et moyenne fréquence de 2,06(63Hz) jusqu'au - 5,81(1000Hz) au minimum et après la courbe s'inverse a 1,32(8000Hz). | - 1dB<C80<+3 dB En fréquence 500Hz et 1000 Hz |
| G | G varie entre 25,05 dB en 8000Hz et 33,48 dB en 250 Hz | G varie entre 20,78 dB en 63Hz et 29,42 dB en 500 Hz | 1<C80<10 En fréquence 500Hz et 1000 Hz |
| D50 | indice D50 est de 0,10 de 63Hz au 2000Hz il augmente jusqu'à 0,26(8000Hz). | indice D50 est de 0,08 en moyenne fréquence et 0,18 en basse et haute fréquences. | - 0,3<C80<+0,7 En fréquence 500Hz et 1000 Hz |
| Indication | avant réhabilitation | après réhabilitation | Valeurs optimales |
| STI | 0,19 Sur l'échelle de la qualité est très mauvais | 0,39 Sur l'échelle de la qualité est très mauvais. | 0 à 0,30 Très mauvais 0,30 à 0,45 mauvais 0,45 à 0,60 satisfaisant 0,60 à 0,75 bon 0,75 à 1 Très bon |

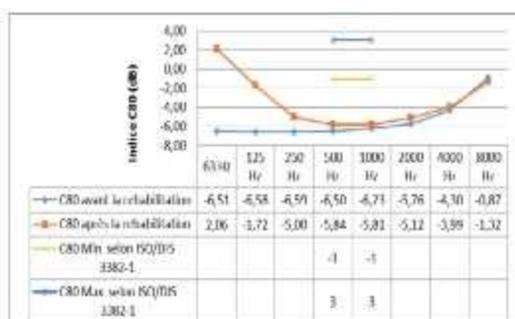
VII. Interprétation des résultats

- Les résultats ont montré que la réhabilitation a modifié en grande partie l'environnement acoustique de la salle de conférence, grâce à l'élimination des motifs de réflexion indésirables. La diminution représente jusqu'au -85% (125Hz), -62% (500Hz) et -35 (4000Hz) après les travaux de réhabilitation. Graphe 1.



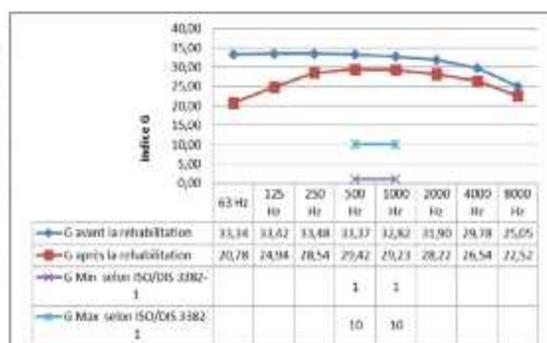
Graphe 1. Comparaison du temps de réverbération Avant et après la réhabilitation et TR_{opt500}

- Indice C80, les changements sont apparus entre 63 Hz et 500 Hz le reste des résultats sont presque identiques, Graphe 2.



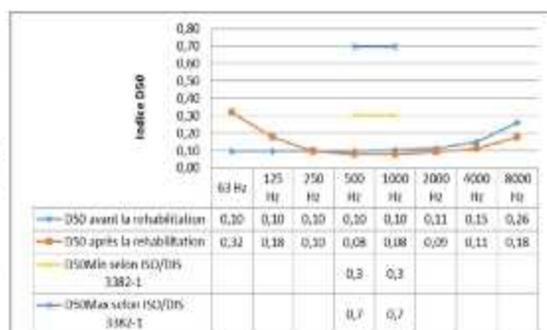
Graphe 2. Indice C80 avant et après réhabilitation et les valeurs optimales

- Indice de G a eu une amélioration de 10% après les travaux Graphe 3.



Graphe 3. Indice G : avant et après la réhabilitation et les valeurs optimales.

-La réhabilitation n'a pas eu un impact sur l'indice D50 sauf une légère amélioration entre 63 Hz et 250 Hz Graphe 4.



Graphe 4. Indice D50 : avant et après la réhabilitation et les valeurs optimales.

Le dernier indice de l'intelligibilité STI est passé d'un état très mauvais à mauvais (voir Tableau 4). L'estimation préliminaire de l'absorption requise par Olive Tree Lab SUITE après la réhabilitation a dévoilé une amélioration de la qualité phonique de la salle mais elle n'a pas atteint les valeurs optimales TR_{opt500} et les recommandations de ISO/DIS 3382-1 [1] concernant le confort acoustique à l'intérieur de la salle.

VII. Mesures correctives proposées :

Afin d'améliorer le comportement acoustique de la salle Malek Haddad, l'introduction d'une série de mesures correctives est proposée dans deux conditions: écologique et économique.

La proposition de réhabilitation acoustique est basée sur l'introduction d'un revêtement absorbant dans des zones acoustiquement stratégiques (Figure 6), qui réduit le

temps de réverbération actuel et à celui jugé optimal. Ce revêtement cherche également à améliorer d'autres paramètres tels que l'intelligibilité de la parole et la clarté, la réduction de l'énergie des longues réflexions et l'augmentation du rapport signal sur bruit aux différents points de réception. L'agencement des matériaux proposés pour le conditionnement acoustique de la salle est représenté sur la figure7 et figure8.

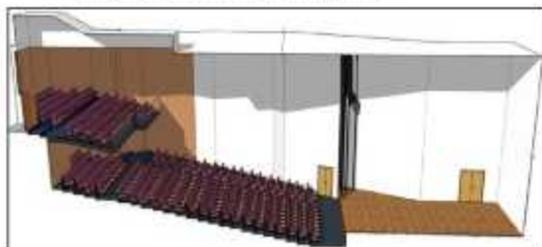


Figure 7. Coupe 3D longitudinale. Source : auteur

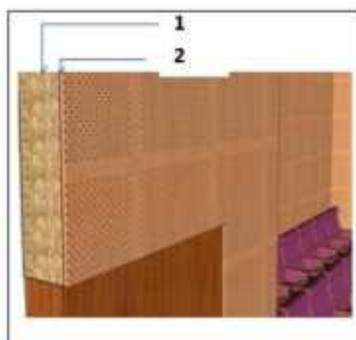
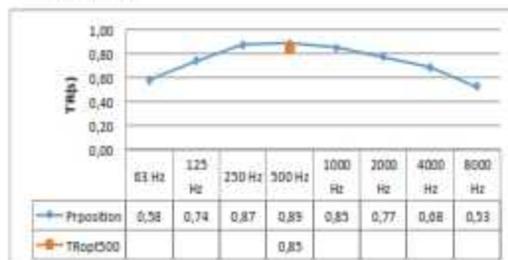
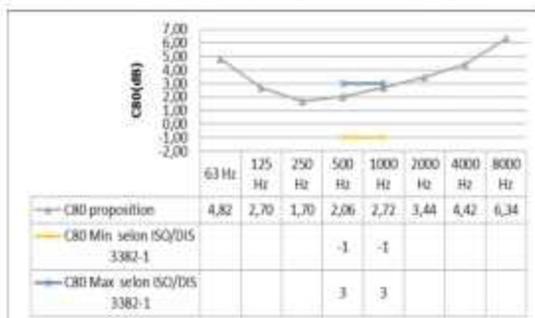


Figure 8. Détail du revêtement mural. Source : auteur

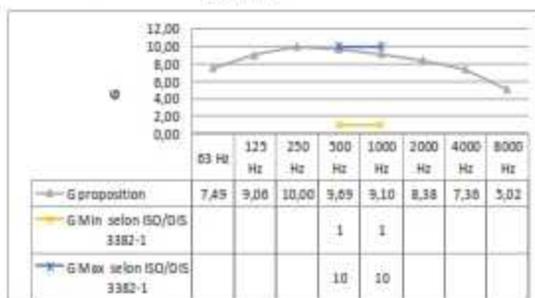
1-Panneau mural en paille Ep 10 cm densité 6 kg /m²
2-panneau perforé en MDF, de 12 mm d'épaisseur soutenus par des crampons à 60 cm d'écart. Le pourcentage de perforation à 15% de la surface totale du panneau.



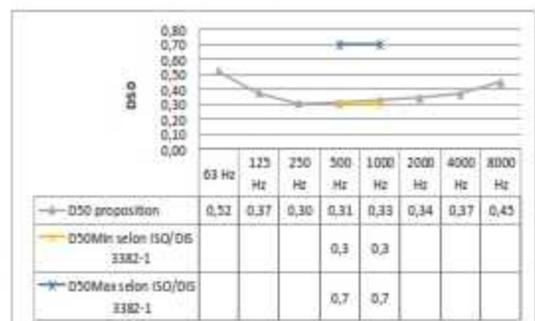
Graphe 5. Le temps de réverbération de la proposition et TRopt500



Graphe 6. Indice C80 de la proposition et les valeurs optimales



Graphe 7. Indice G de la proposition et les valeurs optimales



Graphe 8. Indice D50 de la proposition et les valeurs optimales

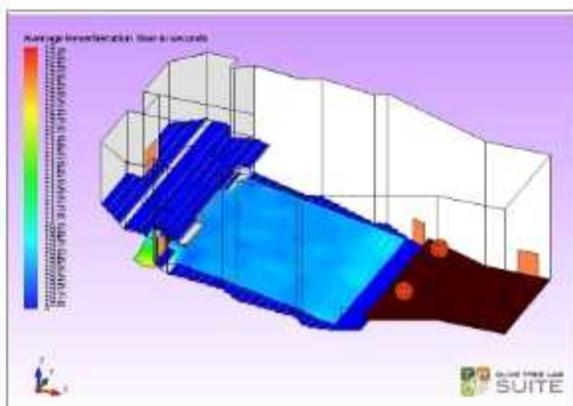


Figure 9. Les mesures de TR60 indiquent l'uniformité du champ acoustique dans la salle Source : auteur

Les résultats ont montré que les modifications proposées ont été couronnées de succès, (Graphe 5, Graphe 6, Graphe 7, Graphe 8 et Figure 9), grâce à l'intégration des panneaux composites de paille et de MDF perforé dans les zones stratégiques.

Conclusion

Les mesures enregistrées en utilisant le logiciel OTL SUITE ont prouvé l'importance des matériaux écologiques (la paille), utilisés dans la création de bonnes conditions auditives comme on peut en conclure à partir des résultats présentés sur les tableaux. Le temps de réverbération T60 était très proche de l'optimale TR60 : 0,89 s, notamment les autres indices, C80, G et D50 se sont avérées dans leur plage acceptable selon ISO/DIS 3382-1 [1].

La valeur mesurée de STI était de 0,62 qui présente une « bonne » intelligibilité acoustique.

Ce travail, en plus de démontrer la validité de la méthode expérimentale et la proposition de réhabilitation acoustique et écologique, ambitionne de donner une solution valable à un problème acoustique réelles salles de conférences.

La grande disponibilité de la paille résultant de sous-produits agricoles et ces performances acoustiques notamment les coefficients d'absorption acoustique supérieurs à 0,80 constamment supérieurs à 630 Hz [3], nous permet d'adopter cette fibre comme matériau principal dans la correction acoustique. Cette méthode pourrait aussi être mise en œuvre et généralisée pour améliorer les conditions acoustiques des salles de conférences.

REFERENCES

1. ELDAKDKOY, S. ELKHATEEB, A., « Acoustic improvement of two lecture auditoria: Simulation and experiment », *Frontiers of Architectural Research* (2017).
2. Umberto Berardi, Gino Iannace. « Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverselaws for the acoustic impedance and the propagation constant », *Applied Acoustics* 115 (2017) 131–138.
3. LOÏC Hamayon, *Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments*, Editions le moniteur, France, 2008, 237p.
4. LAURENT Galbrun, KIVANC Kitapci, « Speech intelligibility of English, Polish, Arabic and Mandarin under different room acoustic conditions », *Applied Acoustics* 114 (2016) 79–91
5. BUENO, Ana Maria. LEÓN, Angel Luis. GALINDO, Miguel « Acoustic Rehabilitation of the Church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid » *ARCHIVES OF ACOUSTICS* Vol. 37, No. 4, pp. 435–446 (2012).
6. V. Gómez Escobar, J.M. Barrigón Morillas, « Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms », *Applied Acoustics* 96 (2015) 1–10.
7. MADBOULY, Ayman I. NOAMAN, Amin Y. RAGAB, Abdul Hamid M. KHEDRA, Ahmed M. FAYOUMI, Ayman G. « Assessment model of class room acoustics criteria for enhancing speech intelligibility and learning quality », *Applied Acoustics* 114 (2016) 147–158.
8. Panagiotis Charalampous I, Despina Michaeli. « Tree Traversal Algorithms for Real Time Sound Propagation Calculation », *AES 55TH INTERNATIONAL CONFERENCE*, Helsinki, Finland, 2014 August 27–29.
9. Panos Economou, Panagiotis Charalampous. « Improved room acoustics calculations using complex impedance and spherical wave reflection & diffraction coefficients », *ICSV23*, Athens (Greece), 10-14 July 2016
10. Jin Yong Jeon, Jong Kwan Ryu, Yong Hee Kim, Shin-ichi Sato. « Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model tests », *Applied Acoustics* 70 (2009) 615–625.
11. Bui Van Tran, *Acoustique architecturale*, Office des publications universitaires, Alger, 1996, 169p.
12. LOÏC Hamayon, *Réussir l'acoustique d'un bâtiment Conception architecturale-isolation et correction acoustique*, Editions le moniteur, France, 2013, 281p.
13. CHRISTINE Simonin-Adam, *Acoustique et réhabilitation Améliorer le confort sonore dans l'habitat existant*, Editions EYROLLES, France, 2003, 381p.
14. MICHEL & CHRISTOPHE Branchu, *Isolation thermique et acoustique*, Editions EYROLLES, France, 2003, 381p.

15. LOÏC Hamayon, Réussir l'acoustique d'un bâtiment Conception architecturale-isolation et correction acoustique, Editions le moniteur, France, 2013,281p.
16. YVES Couasnet, Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction, Editions le moniteur, France, 2005,248p.
- Olive Tree Lab,URL <http://www.otterrain.com/>

L'amélioration de la qualité acoustique des salles de classe pour un meilleur confort psychologique des élèves.

تحسين الجودة الصوتية للأقسام الدراسية من أجل راحة نفسية أفضل للطلاب

Dalal Farid^{1*}, Samira Debache-Benzagouta²

¹ Doctorante, laboratoire ABE Université Salah Boubnider, Constantine 3. Maitre assistant classe A université larbi ben m'hidi oum el bouaghi, farid.dalal@univ-oeb.dz

² Professeur, Université Salah Boubnider, Constantine 3, samira.debache@univ-constantine3.dz.

Date de réception:

Date de révision:

Date d'acceptation:

Résumé

Les salles de classe sont des environnements pleins de sons et de bruits, l'apprentissage des élèves dépend en grande partie de la façon dont les messages sont discernés. La présente recherche s'articule autour d'une étude psycho acoustique des salles de classe de l'école de Halima Saadia qui se trouve à Constantine. À travers des enquêtes et des analyses nous avons pu conclure que l'état psychologique des élèves et leurs résultats scolaires ont une relation étroite avec la qualité acoustique des salles de classe, généralement les élèves assis en arrière profite moins de la clarté des leçons ce qui influe d'une manière négative sur leurs compréhension et leurs concentration.

Afin de trouver un remède a cette situation, nous allons proposer une correction acoustique de ces classes .La solution proposée est basée sur l'introduction d'un revêtement absorbant constitué d'un panneau acoustique mixte MDF plus paille placé dans des zones acoustiquement stratégiques comme l'arrière de la salle. Cette solution a amélioré d'une manière significative la qualité acoustique ainsi que l'ambiance sonore des salles de classe.

Mots clés : qualité acoustique, salles de classe, état psychologique, correction acoustique, compréhension.

الملخص

الفصول الدراسية عبارة عن فضاءات مليئة بالصوت والضوضاء ، حيث يعتمد تعلم الطلاب إلى حد كبير على كيفية تمييز الرسائل الصوتية. يدور هذا البحث حول دراسة نفسية صوتية لصفوف مدرسة حليلة السعيدية في قسنطينة. من خلال الاستبيانات والتحليلات تمكنا من استنتاج أن الحالة النفسية للتلاميذ وتناجهم الأكاديمية لها علاقة وثيقة بالجودة الصوتية للفصول الدراسية ، وعموماً فإن التلاميذ الجالسين في اخر القسم يستفيدون بشكل أقل من وضوح الدروس الشيء الذي يؤثر سلباً على فهمهم وتركيزهم.

من أجل إيجاد علاج لهذه الإشكالية ، سنقترح تصحيحاً صوتياً لهذه الأقسام. يعتمد الحل المقترح على إدخال طبقة ماصة تتكون من لوح ليفي متوسط الكثافة إضافة إلى طبقة من القش موضوعة في مناطق إستراتيجية مثل الجزء الخلفي من القسم. أدى هذا الحل إلى تحسين جودة الصوت بشكل كبير في كامل القسم

الكلمات المفتاحية: الجودة الصوتية, أقسام الدراسة, الحالة

النفسية, التصحيح الصوتي, الفهم.

*Dalal Farid, farid.dalal@univ-oeb.dz

1. Introduction:

Pour réussir un apprentissage, les étudiants doivent se concentrer sur les sons importants, comme la parole, sans se soucier du bruit de fond. L'environnement sonore de la classe influe sur l'effort que les élèves doivent fournir pour recevoir et comprendre tous les messages audibles qui sont pertinents pour leur apprentissage. Les élèves doivent être capables de distinguer les différents sons des mots pour comprendre clairement ce qu'ils entendent (Crandell et Smaldino, 2000, p.362). La création d'un environnement auditif favorable à l'élève et à l'apprentissage prend en compte plusieurs paramètres : notamment la réverbération, le bruit de fond et la distance entre le locuteur et les auditeurs (Zannin et Zwirter, 2009, p.626) Dans de nombreux cas les enseignants ne sont pas clairement entendus par les élèves en raison du niveau de bruit ou d'autres aspects de l'environnement sonore de la classe.

Dans le cadre de cette recherche nous allons procéder en deux parties indispensables. Une première partie consistant en une étude globale du thème dans le but d'une compréhension aisée des éléments de base relatifs à l'acoustique des salles de classe.

Une partie pratique basée sur une enquête in situ afin de déterminer les problèmes de compréhension liée à la qualité acoustique des classes, ce qui va nous permettre d'envisager une réhabilitation acoustique adéquate.

2. Acoustique des salles

L'acoustique des salles, constitue un sous-domaine de l'acoustique architecturale, définie comme étant l'articulation entre deux champs disciplinaires, celui de l'architecture et de l'acoustique (Benmagsoula, 2017, p.16). Elle est le domaine de l'acoustique qui décrit comment le son se propage dans un espace fermé ou semi-fermé. Chaque espace a sa propre « empreinte acoustique » qui affecte la qualité du son, qu'il s'agisse de parole, de musique ou de tout type de bruit. Les spécialistes essaient de comprendre le comportement du son dans les espaces et de les rendre adaptés à différentes fins. Une salle de classe doit être bien conçue pour une transmission claire de la parole du professeur aux élèves, tandis qu'une salle de concert doit prolonger et enrichir le son d'un orchestre pour le rendre impressionnant.

2.1. La qualité acoustique d'une salle

La qualité acoustique d'une salle ne peut pas uniquement être décrite par un jugement de type (mauvais | bon). Il existe des salles qui sonnent très différemment, mais qui peuvent être aussi bonnes l'une que l'autre (Kahle, 1995, p.10). Il faut donc rassembler le plus d'informations possible pour une définition plus précise.

La qualité acoustique d'une salle, ou même de différents emplacements à l'intérieur d'une salle, sera définie grâce à la totalité des aspects perceptifs qui permettront de distinguer les différentes situations acoustiques.

La qualité, dans le sens de préférence subjective, n'est donnée qu'après l'évaluation de tous ces aspects, tenant compte en outre du goût personnel de l'auditeur et de l'adaptation de la salle à un type de musique ou ce lui d'une parole (Moch, 1989, p.131).

L'acoustique des salles vise à offrir la meilleure qualité possible d'écoute à différents lieux dédiés au spectacle ou non : salle de classe, théâtre, opéra, salle de conférence mais aussi aux lieux publics comme des halls d'entrée, des gymnases, des piscines, des réfectoires...

Mario Rossé précise que l'acoustique des salles vise à obtenir pour tout espace les propriétés acoustiques optimales tant au point de vue du confort d'écoute qu'à celui des conditions de production, c'est à dire de musique ou de la parole (Mario, 2007, p.180).

2.2. Critère de la qualité acoustique

La qualité du son dans une salle de classe est généralement déterminée par le bruit de fond, la propagation du son ainsi que le temps de réverbération et l'intelligibilité de la parole (Hodgson et Nosal, 2002, p.933).

2.2.1. Bruit de fond

Le bruit de fond est le bruit total existant en un point pendant une certaine durée. Il contient l'ensemble des sons émis par les sources sonores qui influent au point de mesure : les conversations, les bruits de ventilation, les bruits de machines ou d'équipements, les sons provenant des couloirs, des autres pièces ou des bruits de circulation. Les sources de bruit de fond dans les salles de classe comprennent le bruit externe (bruit généré à l'extérieur du bâtiment, comme le trafic aérien, la construction locale, le trafic automobile et les terrains de jeux), le bruit interne (bruit généré à l'intérieur du bâtiment, mais à l'extérieur de la salle de classe, comme les pièces adjacentes aux cafétérias, aux salles de conférence, aux gymnases et/ou aux couloirs très fréquentés) et le bruit ambiant (bruit généré dans la salle de classe) (Crandell et Smaldino, 1994, p.294).

Dans une salle de classe, en plus de nuire à la reconnaissance vocale, Le bruit de fond peut également compromettre les résultats scolaires, les capacités de lecture et d'orthographe, la concentration, l'attention, et le comportement des élèves (Ando, 1975, p.690). Le bruit a aussi des effets néfastes sur le stress et la fatigue. Il peut engendrer des maux de tête, perturber le sommeil, mais aussi, à long terme, être un facteur aggravant sur d'autres maladies comme la dépression ou des troubles cardio-vasculaires, respiratoires ou digestifs (Botte, 1989, p.114, 115). Selon la norme le niveau du bruit de fond doit être compris entre 30 et 35dB (DTR C3.1.1).

2.2.2. Le temps de réverbération.

Le temps de réverbération est le critère acoustique le plus important dans n'importe quelle salle. La meilleure conception phonique est celle qui assure aux oreilles une réception non distordue des sons de la parole. Le temps de réverbération (TR) est le temps nécessaire pour qu'un signal descende de 60 décibels (dB) sous son niveau initial. La perception de la parole est plus négativement affectée plus la TR est longue (Barron, 2010, p.280).

Chaque salle à son temps de réverbération optimal selon son volume et sa destination. Le temps de réverbération optimale d'une salle de classe est compris entre (0.8 et 1.2s) (Hamayon, 2013, p.135).

2.2.3.L'intelligibilité de la parole.

L'intelligibilité de la parole ou du chant est une composante essentielle de la qualité acoustique d'un grand nombre de salles. Son impact est particulièrement évident en ce qui concerne les salles destinées à la parole : cinémas, théâtres, salles de conférence, etc. Mais elle constitue un élément d'évaluation non négligeable pour des salles à finalité plus musicale dans la mesure où elle peut constituer un très bon indicateur d'homogénéité. Si l'intelligibilité d'une voix est bonne, il est presque assuré que la fidélité de celle-ci soit préservée et l'écoute en sera améliorée (Bistafa et Bradley, 2001, p.1477). La parole d'une salle nécessitant qu'elle soit intelligible, il existe des critères pour la caractériser. Le calcul de l'Indice de Transmission de la Parole STI s'impose de plus en plus comme critère pour caractériser l'intelligibilité du message parlé. Cependant.

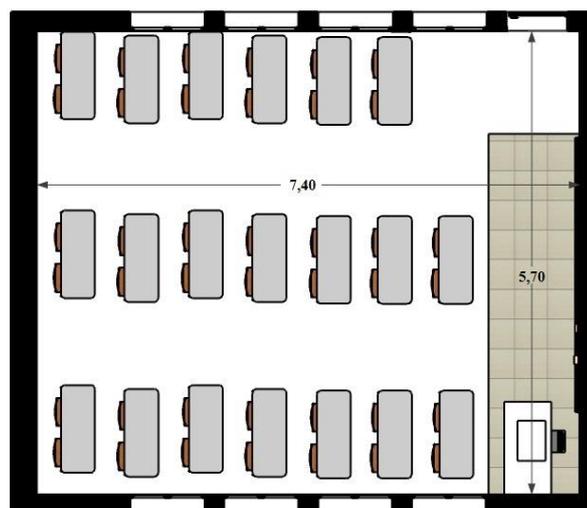
3. Réhabilitation acoustique

La réhabilitation Acoustique essaye de donner des solutions concrètes aux problèmes générés par un design acoustiquement malade, un nouvel usage, ou variation de ratio de confort. (Daumal, 1990, p.1062) Le plus souvent, la réhabilitation acoustique est un élément de réhabilitation totale d'un équipement ou d'un immeuble. Elle doit également être entreprise, au moins partiellement, dans le cadre d'une réhabilitation thermique. La réhabilitation se fait à travers deux interventions principales : Correction acoustique et isolation acoustique, pour assurer un meilleur confort acoustique du local.

4. Présentation du cas d'étude (l'école primaire Halima Saadia de Constantine)

L'école primaire Halima Saadia de 400 places est un Etablissement scolaire situé au Sud –Est de la wilaya de Constantine. Elle comprend 10 salles de classes, bibliothèque, restaurant, et une administration, le plan type des classes est d'une forme rectangulaire d'une surface de 42,18m² (5,70x7,40) m et d'une hauteur sous plafond de 3m, (Fig.01).

Figure N° 1. Plan de la salle de classe de l'école Halima Saadia



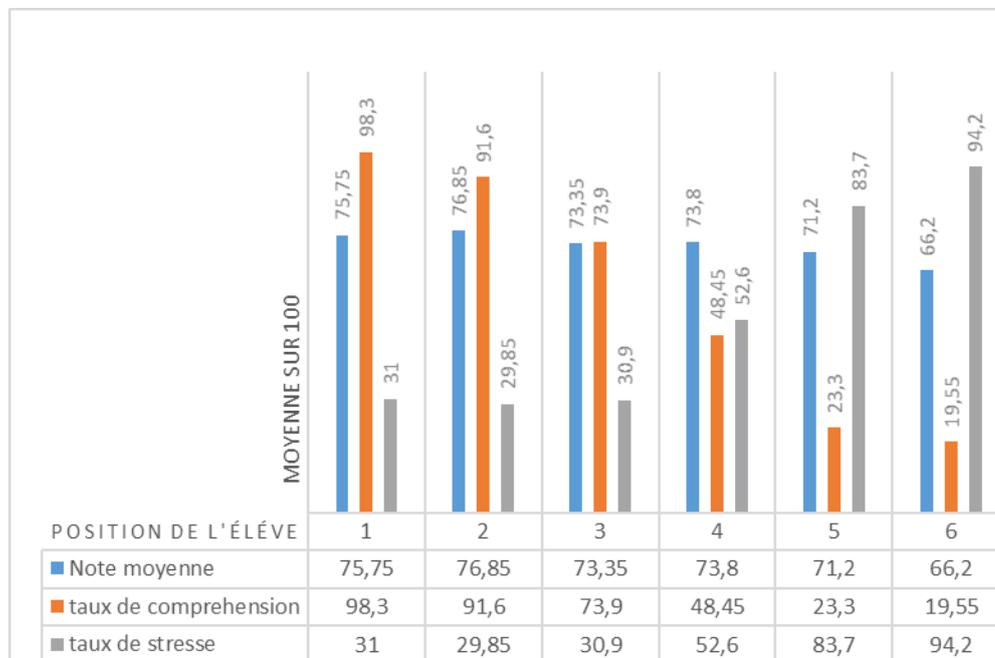
Source : Dalal Farid, 2020, p.4.

4.1. Présentation de l'enquête.

Dans le but de définir les problèmes des élèves liés au paysage sonore des salles de classe nous avons établi un questionnaire composé de 18 questions fermées, achevé par une dernière question ouverte. Le questionnaire débute par des questions de nature globale sur l'emplacement des élèves dans la classe, leurs moyennes, La deuxième partie du questionnaire, concernent la qualité de compréhensions et de concentration des élèves, la qualité du son de l'enseignement, les bruits entendus pendant la leçon ainsi que l'état psychique pendant le cours. Nous avons posé les questions sur l'ensemble de 160 élèves réparties sur 4 salles de classe.

4.2. Interprétation des résultats de l'enquête.

Figure N° 2. Résultats de l'enquête



Source : Dalal Farid, 2020, p.5.

Le traitement des réponses du questionnaire pour le facteur de la compréhension montre que 98,3% des élèves assis à la première position ont signalé une bonne compréhension de la parole en raison de la proximité de la source sonore (enseignant), ce taux diminue jusqu'à 19,55% à la dernière position au fond de la classe, à cette position les élèves ont signalé le besoin d'un grand effort pour une meilleure compréhension de parole.

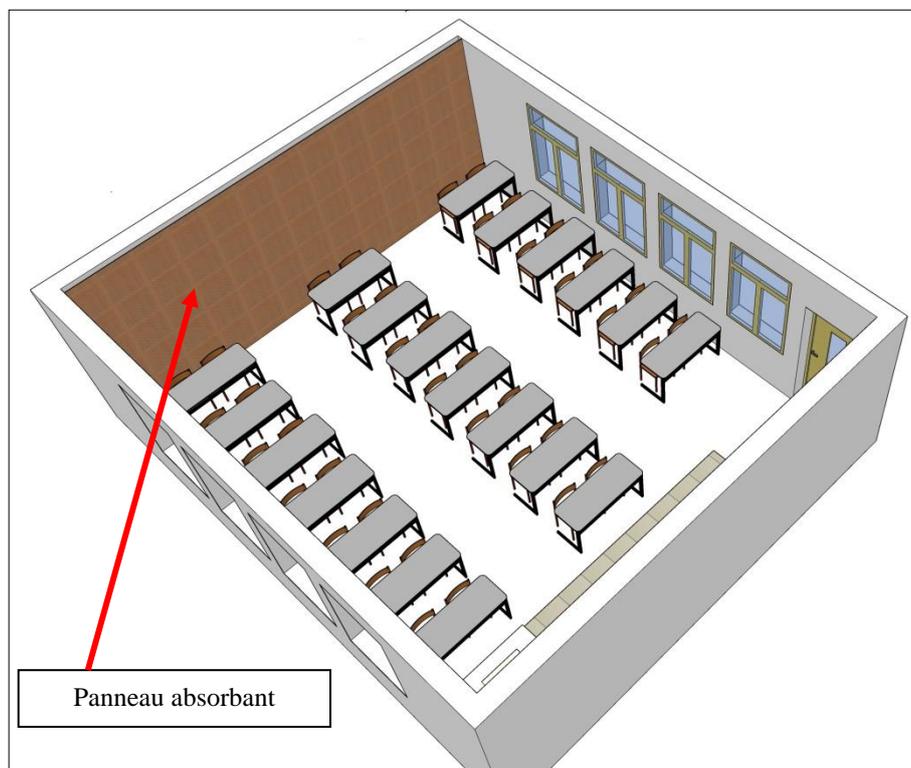
Pour le facteur du taux de stress les résultats montrent que les élèves assis dans les trois dernières positions de la salle se plaignent beaucoup du stress, les valeurs varient entre 52,6% et 94,2% ce qui est en raison directe avec l'impact de bruit de fond ainsi que le temps de réverbération très élevé, le son est réfléchi et perturbe d'une grande manière les élèves et rend le paysage sonore de la salle très agréable (Fig.02).

Quand aux résultats scolaires le graphe montre que les élèves assis en premières tables ont des moyennes très élevées par rapport aux élèves assis en dernières positions, ce la est du essentiellement a la mauvaise compréhension ainsi que le taux de stress très élevé.

4.3. Solutions proposées.

La solution proposée est une réhabilitation acoustique basée sur l'introduction d'un revêtement absorbant constitué d'un panneau acoustique mixte MDF plus paille placé dans des zones acoustiquement stratégiques comme l'arrière de la salle. Cette solution réduit le temps de réverbération. L'amélioration de ce dernier influe directement sur d'autres paramètres acoustiques tels que l'intelligibilité de la parole, la clarté, la réduction de l'énergie des longues réflexions et l'augmentation du rapport signal sur bruit aux différents points de réception. L'agencement des matériaux proposés pour le conditionnement acoustique de la salle est représenté par la figure ci-dessous (Fig.03).

Figure N° 3. Agencement des matériaux proposés dans la salle de classe



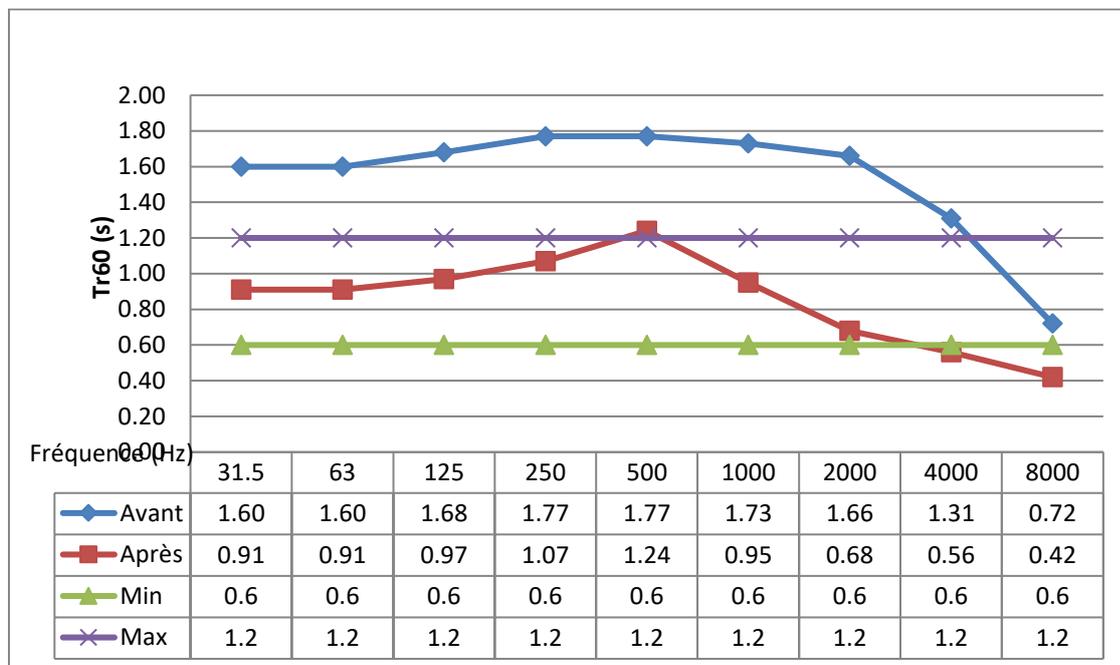
Source : Dalal Farid, 2020, p.6.

4.3. Résultats et interprétation.

L'application du panneau acoustique mixte MDF plus paille avec son coefficient d'absorption acoustique élevé sur la partie arrière de la salle a contribué à la diminution significative des valeurs de temps de réverbération, pour la fréquence 1000Hz le TR60 est passé de 1.73 à 0.95. (Fig.04). Les résultats de la simulation à l'aide du logiciel Olive Tree Lab Suite ont montré que la correction a modifié en grande partie l'environnement acoustique de la salle de classe, La diminution du temps de réverbération représente jusqu'au -43% pour (125Hz),-

40% pour (250Hz), -30% pour (500Hz) -45% pour (1000Hz) et -58% pour (4000Hz). En comparant ces résultats avec la valeur optimale de TR60 pour la fréquence de 1000 Hz nous remarquons que le temps de réverbération après correction est devenu et presque dans toutes les fréquences dans la marge de la valeur optimale qui est entre 0.8 et 1.20s ce qui confirme l'efficacité des corrections proposées.

Figure N° 4. Les valeurs du TR60 de la salle après réhabilitation comparées au TR60 optimal.²



Source : Dalal Farid, 2020, p.7.

5. Conclusion

La présente recherche a abordé plusieurs paramètres qui influencent la qualité de compréhension des élèves dans une salle de classe (bruit, réverbération et emplacement par rapport à l'enseignant). Une mauvaise conception acoustique des salles de classe affecte de manière néfaste non seulement la perception de la parole, mais aussi la réussite psycho-éducative et psychosociale.

Les résultats enregistrés dans la deuxième partie de la recherche (à travers la simulation) ont montré que les modifications proposées pour les corrections acoustiques de la salle de classe ont été largement significatives, grâce à la l'insertion des panneaux absorbant durable une nette amélioration a été constatée dans la qualité acoustique de la salle de classe.

Références

- Ando. Y, Nakane, Y. (1975). Effects of aircraft noise on the mental work of pupils. *Journal of Sound and Vibration*, v 43 n 4.
- Barron, M. (2010). Auditorium Acoustics and Architectural Design, Routledge, London.

- Benmagnsoula, Z. (2017). Relations entre composante acoustique et conception architecturale : caractérisation et amélioration acoustique de l'espace de la mosquée, thèses de doctorat, Université 3 Constantine.
- Bistafa, S., Bradley, J. (2001). Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption, *The Journal of the Acoustical Society of America* v109 n4;
- Botte, M. (1989). Psychoacoustique et perception auditive, INSERM/SFA/CENT, Paris France.
- Crandell, C., Smaldino, J. (1994). An update of classroom acoustics for children with hearing impairment. *The Volta Review*, v 96 n 4.
- Crandell, C., Smaldino, J. (2000). Classroom acoustics for children with normal hearing and with hearing impairment, *Language, Speech and Hearing Services in Schools*, v 31 n 4.
- Daumal, F. (2001). L'architecture acoustique, un nouveau concept, *Journal de Physique* v 5n 51.
- DTR C3.1.1, Isolation acoustique des parois aux bruits aériens. Règles de calcul. Document technique réglementaire. Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiments (CNERIB) 2004. Ministre de l'Habitat et de l'Urbanisme (MHU);
- Filippini, M. (2003). Etude acoustique de l'auditorium de Pigna, Université de Corse Pascal Paoli, France.
- Hamayon, L. (2013). Réussir l'Acoustique du Bâtiment (Conception architecturale- Isolation et correction acoustique), 3ème édition, Editions Le Moniteur, Paris.
- Hodgson, M., Nosal, E. (2002). Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, v111 n 2.
- Kahle, E. (1995). Validation d'un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique dans un ensemble de salles de concerts et d'opéras, Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine Le Mans, France.
- Mario, R. (2007). Audio, PPUR presses polytechniques, France.
- Moch, A. (1989). les stress de l'environnement, Presses universitaires de Vincennes, Paris France.
- Zannin, P., Zwirter, D. (2009). Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools, *Applied Acoustics*, v 70 n 4.



Nom et Prénom : **FARID Dalal**

Titre : **Réhabilitation acoustique durable et son rôle dans le processus d'amélioration environnementale des équipements culturels**

Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de doctorat en Sciences. Filière Architecture. Option Architecture

Résumé

En Algérie, l'acoustique est un domaine qui a très peu été investi par les chercheurs. Si c'est le cas ils s'intéressent plutôt à l'acoustique physique. L'acoustique architecturale reste encore une énigme dans notre pays alors qu'elle concerne la maîtrise des critères de confort et de l'écoute dans les constructions. L'autre spécificité est la qualité acoustique des salles qui reste encore un sujet préoccupant aussi bien pour les physiciens que pour les architectes et les générations de chercheurs.

Il est clair que l'application favorisée de l'acoustique architecturale dans les espaces destinés à recevoir un public, notamment les salles de conférences, améliore d'une manière significative l'échange d'informations orales où les processus d'apprentissage impliquent une communication verbale intensive. C'est pourquoi nous nous intéressons dans cette recherche doctorale, à l'amélioration qualitative des conditions acoustiques des salles de conférences existantes en utilisant des méthodes et des matériaux économiques et durables.

En partant d'un état de l'art sur les expériences de réhabilitations acoustiques durables des salles nous avons identifié les exigences qualitatives des salles d'écoute, ainsi que les méthodes de réhabilitation durables qui procurent des avantages environnementaux, sociaux et économiques.

Pour ce faire une étude expérimentale de mesure in-situ à travers une maquette acoustique a été engagée pour définir les caractéristiques acoustiques de deux matériaux, la paille et l'alfa. Ces deux fibres naturelles présentent plusieurs avantages spécifiques, notamment leur abondance, leur capacité de renouvellement, leur recyclabilité et leur haute résistance spécifique. La simulation numérique pour l'étude des corrections acoustiques, nous a permis de démontrer l'efficacité de l'utilisation des matériaux étudiés dans l'amélioration significative des conditions acoustiques des salles de conférences étudiées.

En termes de conclusion, cette recherche a permis d'établir des lignes directrices et des recommandations qui intègrent la notion de la qualité acoustique durable dans la conception et la réhabilitation des salles de conférences.

Mots clés : Qualité acoustique, confort de l'écoute, réhabilitation acoustique, salle de conférence, matériaux durables.

Directeur de thèse : Pr Debache Benzagouta Samira - Université Constantine 3

Année Universitaire : 2020-2021