

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE CONSTANTINE 3  
FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME  
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE

N° d'ordre :  
Série :

Thèse de doctorat Es-sciences

Spécialité : Architecture

Option : Architecture Bioclimatique

TITRE DE LA THESE :

**Relations entre composante acoustique et  
conception architecturale : caractérisation et  
amélioration acoustique de l'espace de la mosquée**

présentée par : **Zohra BENMAGHSOULA ép. HAMMOU**

sous la direction de : **Pr BOUCHAHM. YASMINA.** Université Constantine 3

Co-Encadré par : **Pr REMRAM YOUSSEF.** USTHB Alger

**Membres du jury :**

Professeur	<b>BENZAGOUTA SAMIRA</b>	Présidente	Université Constantine 3
Professeur	<b>BOUCHAHM. YASMINA.</b>	Rapporteur	Université Constantine 3
Docteur	<b>REMRAM YOUSSEF.</b>	Co-encadreur	USTHB Alger
Docteur	<b>GUENADEZ ZINEDDINE</b>	Membre	Université Constantine 3
Professeur	<b>KAABI ABDENACER</b>	Membre	Université Constantine 1
Docteur	<b>DJAKAB ASSAID</b>	Membre	USTHB Alger

juin 2017

## Table des matières

INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE 1 : L'ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE. ....	9
1.1.    INTRODUCTION .....	9
1.2.    L'ACOUSTIQUE. ....	9
1.2.1.    Le son .....	11
1.2.2.    La fréquence ou la hauteur du son .....	11
1.2.3.    Le niveau sonore .....	12
1.2.4.    L'utilisation des décibels .....	13
1.2.5.    Les mesures. ....	15
1.2.6.    Les instruments de mesure. ....	15
1.3.    L'ACOUSTIQUE DES SALLES .....	16
1.3.1.    Définition de l'acoustique des salles .....	16
1.3.2.    L'énergie sonore induite par une source dans une salle .....	19
1.3.3.    Caractéristiques de l'énergie sonore dans un espace clos. ....	21
1.3.4.    Champs sonore direct et réverbéré. ....	23
1.3.5.    Champ auditif et confort d'écoute .....	24
1.4.    LA COMPOSANTE ACOUSTIQUE DU PROJET ARCHITECTURAL .....	26
1.4.1.    La caractérisation de la qualité acoustique du projet architectural .....	26
1.4.2.    Définition des critères objectifs .....	27
1.4.3.    Relation entre critères objectifs et perceptifs (subjectifs) .....	28
1.5.    CRITERES OBJECTIFS POUR LA QUALIFICATION DES SALLES .....	31
1.5.1.    Les approches physiques pour la caractérisation des salles .....	31
1.5.2.    Réponse impulsionnelle et critères objectifs .....	33
1.5.3.    Décryptage de la réponse impulsionnelle .....	36
1.5.4.    Critères liés à la courbe de décroissance temporelle du niveau sonore .....	37
1.5.5.    Critères liés à la répartition de l'énergie sonore dans l'espace .....	40
1.6.    CONCLUSION DU CHAPITRE 1. ....	41
CHAPITRE 2 : L'ARCHITECTURE DES MOSQUEES ET COMPOSANTE ACOUSTIQUE .....	42
2.1    INTRODUCTION. ....	42
2.2    APERÇU HISTORIQUE SUR L'ARCHITECTURE DE LA MOSQUEE .....	42
2.2.a    La mosquée de quartier ou des cinq prières .....	44
2.2.b    La grande mosquée du vendredi .....	44
2.3    CLASSIFICATION DES MOSQUEES. ....	46
2.3.a.    Les mosquées traditionnelles. ....	46
2.3.b.    Les mosquées contemporaines .....	47
2.4    DIFFERENTES APPROCHES ARCHITECTURALE DE LA MOSQUEE CONTEMPORAINE .....	49
2.5    LA CONSTRUCTION DES MOSQUEES EN ALGERIE .....	51
2.5.1    Disposition administratives et fonctionnelles des mosquées. ....	51
2.5.2    Références architecturales et architectoniques des mosquées. ....	54
2.6    COMPOSANTE SONORE DE L'ESPACE DE LA MOSQUEE. ....	56
2.6.1.    Les pratiques culturelles et fonctions de la mosquée. ....	56
2.6.2    Acoustique des mosquées anciennes. ....	59
2.6.3    Etat de l'art concernant l'acoustique des mosquées contemporaines. ....	61
2.6.4    Les exigences acoustiques de la mosquée .....	65
2.6.5    Définition des valeurs optimales des critères acoustiques. ....	66
2.6.6    Synthèse de l'état de l'art. ....	70
2.7    LES AMBIANCES ARCHITECTURALES ET LA CONCEPTION DU PROJET .....	71

2.7.1	<i>Processus de la conception architecturale</i> .....	71
2.7.2	<i>Les méthodes d'intégration de la composante sonore dans le projet architectural</i> .....	73
2.7.3.	<i>La méthode d'approche exploitant les références</i> .....	74
2.7.4.	<i>Méthodes d'approche exploitant les modèles physiques</i> .....	78
2.7.5	<i>Méthode d'approche exploitant les modèles numériques</i> .....	81
2.8	<b>MODELES NUMERIQUES DEDIES A L'ACOUSTIQUE DES SALLES</b> .....	85
2.8.1	<i>Présentation des logiciels de simulation acoustiques utilisés</i> .....	85
2.9	<b>LES OUTILS DE REFERENCES DANS LA PRATIQUE DE LA CONCEPTION DES MOSQUEES</b> .....	90
2.9.1	<i>Interprétation des résultats de l'enquête</i> .....	90
2.9.2	<i>Conclusion de l'enquête</i> .....	95
2.10	<b>CONCLUSION DU CHAPITRE 2</b> .....	96
<b>CHAPITRE 3. ETUDE EXPERIMENTALE PAR LA SIMULATION ET LA MESURE IN-SITU</b> .....		<b>97</b>
3.1.	<b>INTRODUCTION</b> .....	97
3.2	<b>SPECIFICITES ARCHITECTURALES ET ARCHITECTONIQUES DES MOSQUEES EN ALGERIE</b> .....	97
3.2.1	<i>Choix des mosquées étudiées</i> .....	98
3.3	<b>PRESENTATION DU LOGICIEL DE PREDICTION ACOUSTIQUE EASE4.4</b> .....	107
3.3.1.	<i>Introduction du logiciel EASE4.4</i> .....	107
3.3.2.	<i>Conception du modèle numérique des mosquées</i> .....	110
3.3.3.	<i>Méthode des mesures in-situ</i> .....	112
3.3.4.	<i>Résultats des mesures in-situ de la mosquée Ibn- Arabi</i> .....	116
3.4.	<b>RESULTATS DE LA SIMULATION ACOUSTIQUE DE LA MOSQUEE IBN-ARABI</b> .....	118
3.4.1	<i>L'indice de réverbération</i> .....	118
3.4.2.	<i>L'indice de l'EDT</i> .....	124
3.4.3.	<i>L'indice de clarté C50</i> .....	126
3.4.4.	<i>L'indice de l'intelligibilité</i> .....	128
3.4.6.	<i>Conclusion</i> .....	130
3.4.7.	<i>Comparaison des résultats simulés et mesurés de la mosquée Ibn Arabi</i> .....	130
3.5.	<b>RESULTATS DE LA SIMULATION ACOUSTIQUE DE LA MOSQUEE ENNOUR</b> .....	132
3.5.1.	<i>L'indice de réverbération</i> .....	135
3.5.2.	<i>L'indice de l'EDT</i> .....	138
3.5.3.	<i>L'indice de clarté C50</i> .....	140
3.5.4.	<i>L'indice de l'intelligibilité</i> .....	142
3.5.5.	<i>Résultats des mesures in-situ de la mosquée Ennour</i> .....	144
3.5.6.	<i>Conclusion de la simulation</i> .....	147
3.6	<b>ENQUETE AUPRES DES FIDELES DES DEUX MOSQUEES</b> .....	148
3.6.1.	<i>Mise en œuvre de l'enquête</i> .....	148
3.6.2.	<i>Déroulement de l'enquête</i> .....	149
3.6.3.	<i>Résultat de l'enquête de la mosquée Ibn-Arabi</i> .....	150
3.6.4.	<i>Résultats de l'enquête de la mosquée Ennour</i> .....	155
3.6.5.	<i>Discussion des résultats</i> .....	158
3.7.	<b>CONCLUSION DU CHAPITRE 3</b> .....	160
<b>CHAPITRE 4 : LES PRINCIPES DES CORRECTIONS ACOUSTIQUES ET PROPOSITIONS ARCHITECTURALES</b> .....		<b>161</b>
4.1	<b>INTRODUCTION</b> .....	161
4.2	<b>PRINCIPES FONDAMENTAUX POUR UNE BONNE ACOUSTIQUE DES SALLES</b> .....	161
4.2.1.	<i>Les paramètres géométriques</i> .....	161
A.	<i>La forme de l'espace</i> .....	162
B.	<i>Le volume acoustique</i> .....	164
C.	<i>Les proportions géométriques de l'espace</i> .....	164
4.2.2.	<i>Les matériaux de finitions</i> .....	164
4.2.3.	<i>Le critère du bruit de fond</i> .....	167
4.3	<b>PROCESSUS DE CORRECTION ACOUSTIQUE DES MOSQUEES ETUDIIEES</b> .....	168

4.3.1.	<i>Optimiser le temps de réverbération.</i>	168
4.3.2.	<i>Assurer une bonne diffusion du son dans la salle.</i>	169
4.3.3.	<i>Maitriser les échos et les focalisations du son</i>	169
4.3.4.	<i>Assurer une protection contre les bruits extérieurs.</i>	171
4.4	DEMARCHE DE LA CORRECTION ACOUSTIQUE PAR SIMULATION ET PROPOSITIONS ARCHITECTURALES.	173
4.4.1.	<i>Première phase de correction de la Mosquée Ennour.</i>	173
4.4.2.	<i>Deuxième phase de correction de la Mosquée Ennour.</i>	184
4.4.3.	<i>Résultats des critères acoustiques suite aux modifications sur la coupole.</i>	187
4.4.3.	<i>Première phase de correction de la Mosquée Ibn arabi.</i>	191
4.4.4.	<i>Deuxième phase de correction de la Mosquée Ibn-Arabi.</i>	203
4.5	CONCLUSION.	209
4.6	ETABLISSEMENT D'UNE PLATEFORME D'AIDE POUR LES ARCHITECTES.	211
4.6.1.	<i>Propositions liées à l'enquête auprès des architectes.</i>	211
4.6.2.	<i>Les critères acoustiques liés à la conception.</i>	212
4.6.3.	<i>Éléments architecturaux fondamentaux dans la mosquée</i>	219
4.6.4.	<i>Mise en œuvre et dimensionnement des matériaux absorbants.</i>	232
	CONCLUSION GENERALE.	235
	BIBLIOGRAPHIE.	242
	ANNEXES.	250
	ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DE LA SOURCE OMNIDIRECTIONNELLE.	250
	ANNEXE 2 : QUESTIONNAIRE DES FIDELES	252
	ANNEXE 3 : QUESTIONNAIRE DES ARCHITECTES.	254
	RESUME.	257
	ABSTRACT	258
	ملخص	259

## **Introduction générale**

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. L'acoustique architecturale constitue une spécialité récente, apparue suite à l'introduction des critères d'ambiances (thermique, sonores, lumineux) dans le champ des connaissances de l'objet architectural et de sa pratique.

**L'acoustique des salles est une science qui étudie l'émission, la perception et surtout l'absorption du son** (musique ou parlé) dans un espace architectural déterminé. L'objectif général de cette science est de réaliser des salles dont les propriétés acoustiques sont optimales au point de vue du confort de l'écoute. Tout espace destiné à recevoir un public qui s'installe pour écouter un message sonore est appelé « un lieu d'écoute ». Ces lieux conçus en espaces fermés ou semi-ouverts affectés à cet usage, forment des équipements tels que les théâtres, les salles de concerts, les salles de conférences et les opéras. Les lieux de culte comme les mosquées et les églises sont également considérés comme des espaces appartenant à cette catégorie puisque leur fonction consiste à transférer un message sonore à un public rassemblé en leurs seins.

**Les théories scientifiques liées à l'acoustique des salles** posent clairement **la relation entre les éléments architecturaux définis par l'architecte**, comme le volume, la forme, les proportions géométriques et la nature des matériaux **avec la qualité de l'audition dans la salle**. L'acoustique des salles constitue donc le domaine scientifique qui peut répondre aux attentes des architectes, afin de concevoir des espaces garantissant un bon environnement sonore pour les projets destinés à la communication. L'objectif principal étant d'assurer une bonne qualité d'écoute pour les usagers. Dans le but de contribuer à une qualité acoustique l'architecte, doit comprendre ce qui fait la qualité d'une salle, ou sa médiocrité sur le plan auditif, et ceci avant même l'installation de la sonorisation qui ne constitue qu'un appoint à la qualité sonore. Comprendre les raisons pour lesquelles cet environnement est dégradé permet de caractériser et traiter les problèmes acoustiques dans les espaces architecturaux. Ce travail préalable doit donc s'effectuer dans les premières étapes de la conception.

Depuis près d'un siècle les recherches liées à la qualité acoustique des salles suscite beaucoup d'intérêts en particulier pour des édifices tels que les théâtres les salles de conférences et les églises. En dépit de cet intérêt croissant pour l'étude des ambiances sonores, et malgré l'importance qu'occupe l'édifice de la mosquée dans nos sociétés, les travaux de recherches

traitements de la qualité des ambiances acoustiques à l'intérieure des mosquées sont très limités. Les quelques recherches engagées sur ce sujet, ont conclu pour la plupart à l'inadaptation de certains aspects conceptuels de la mosquée à son usage en tant que lieu d'écoute. Dans cette optique notre recherche aspire à apporter une contribution enrichissante à ce domaine de la recherche à travers la caractérisation acoustique de l'espace de la mosquée.

## **Problématique**

Ce travail explore **la qualité acoustique des mosquées** par l'outil de **l'expérimentation**, afin de mettre à la disposition de l'architecte **un ensemble de solutions architecturales** pour la maîtrise des ambiances sonores. Notre réflexion méthodologique va s'organiser conformément à ces trois mots-clés, on précisera notre problématique par les questionnements suivants : « comment aider les architectes lors de la programmation et la conception des mosquées, à anticiper sur la qualité acoustique de ces espaces ? » « Existe-t-il certaines règles de conceptions spatiales et des matériaux, qui favorisent une qualité acoustique dans les mosquées et d'autres qui l'altèrent ? », « Si ces règles existent, peut-on établir des heuristiques de projet (guide, cahier des charges) à mettre à la disposition de l'architecte dans la pratique du projet ? ».

D'un point de vue disciplinaire, notre recherche se développe dans le cadre et la perspective d'une autre discipline que l'architecture, elle revêt donc **le caractère d'une recherche transversale** ayant un rapport avec les sciences de l'ingénieur. « Une recherche transversale a ceci de particulier que, tout en faisant appel à une autre (ou plusieurs) discipline(s), elle tend à ramener l'éclairage porté sur son objet d'étude dans le champ des connaissances architecturales » (Hanrot, S., 2003). Le même auteur constate que le savoir architectural s'est enrichi en s'ouvrant vers d'autres disciplines, en usant d'outils théorique et méthodologiques afin d'enrichir sa propre pensée. Néanmoins dans ce cadre spécifique des recherches transversales « le chercheur doit se soucier de ramener les connaissances élaborées, dans le champ du savoir architectural » (Hanrot, S., 2003) autrement dit notre travail va **s'axer sur l'acquisition des savoirs propres à l'acoustique dans le but de les mettre en œuvre dans le projet architectural**. Conformément à cette optique, notre recherche ambitionne d'engager un travail de réflexion pour la mise au point d'outils, pouvant aider les architectes en vue d'une meilleure maîtrise de la qualité sonore des mosquées qu'ils conçoivent.

Nous allons fonder notre objectif principal qui est « La caractérisation acoustique de l'espace de la mosquée » sur une méthode expérimentale utilisant l'outil de la mesure et de la simulation, durant cette phase préliminaire notre recherche se définit donc dans une **typologie des**

**recherches expérimentales**, selon une démarche **déductive**. Pour ce faire on démarrera d'un corpus constitué de mosquées réelles implantées à Constantine, ce corpus sera soumis selon **une méthodologie scientifique** à une série d'expérimentations, par la mesure et la simulation. On procédera en outre à l'établissement d'enquêtes destinées aux fidèles des mosquées et aux architectes concepteurs. En phase finale, suite à l'exploration expérimentale, un guide sous forme de dispositifs architecturaux sera établi, à l'usage des architectes dans le but d'assurer une qualité sonore pour les mosquées.

En conclusion, conformément à la définition de la problématique, le type de recherche architecturale que nous préconisons est expérimental. Les questionnements posés dans la problématique, définissent un objet d'étude, représentant l'édifice de la mosquée en tant qu'objet architectural ; néanmoins les solutions architecturales préconisées, entre dans le cadre de la pratique architecturale.

### **Définition du métalangage (concepts)**

Conformément à la formulation de notre problématique et notre type de recherche, notre métalangage sera constitué de concepts définis par la théorie du domaine disciplinaire des ambiances architecturales en générales et à l'acoustique des salles en particulier. Les chercheurs du laboratoire CRESSON « nous rappellent que la notion des ambiances architecturales et urbaines impliquent un rapport sensible au monde, nécessite une approche pluridisciplinaire » (Solène, M., 2011)

La qualité d'écoute d'un espace architectural est « liées à la concordance de trois facteurs l'espace architectural l'utilisateur et le type de source ». (Semidor, C., 1999). La légitimité de cette définition de nature pluridisciplinaire trouve son ancrage dans différents travaux de thèses, abordant la qualité sonore selon une démarche pluridisciplinaire. « Dans notre critique bibliographique, nous avons montré la complexité de la notion de qualité sonore dès lors que nous la considérons dans une perception ordinaire située. Nous avons établi la nécessité d'ouvrir sa définition aux champs des sciences humaines et de l'espace construit pour respecter ses modes d'apparition.... Notre travail valide cette approche.... Cependant, pour nous, il n'y a rien d'original dans ce résultat dans la mesure où l'ensemble des travaux du Cresson depuis 20 ans ont largement montré, sous une forme ou une autre, cette complexité et cette richesse des rapports que nous entretenons avec l'environnement sonore. » (Remy, N., 2001)

La définition de cette démarche pluridisciplinaire, est également repris dans la thèse de (Semidor, C. , 1999) qui stipule que « seule l'étude de l'ensemble source - canal acoustique - récepteur est réellement représentative de la caractérisation acoustique d'un lieu d'écoute. »

Ainsi le métalangage de notre recherche fait références à la théorie des ambiances architecturale en générale et particulièrement de l'acoustique des salles, nos concepts d'ordre pluridisciplinaire, renvoient à trois champs disciplinaires celui de l'acoustique physique, celui de l'organisation spatiale et architecturale et enfin celui des besoins et exigences de l'utilisateur.

### **Méthodologie de recherche.**

Comment mener un travail pluridisciplinaire sur un objet d'étude très peu traités dans la littérature scientifique ? On remarque en outre que l'ensemble des travaux de recherches sur l'acoustique des mosquées, ont été entrepris par des spécialités dans l'optique des sciences de la physique et de l'électroacoustique, éloignée du domaine de l'architecture. Ces recherches sont élaborées exclusivement dans une démarche expérimentale liées aux phénomènes physiques du son. Cet état de fait nous a orienté nos lectures vers des recherches ayant un caractère pluridisciplinaire, sur des édifices tels que les théâtres ou les églises.

Face à la complexité des concepts liés d'un côté, aux attributs du projet architectural, et de l'autre aux phénomènes qui définissent les domaines de l'acoustique ; nous avons opté pour l'expérimentation pour valider notre démarche méthodologique. Le recours à l'expérimentation pour les recherches transversales, ayant une référence aux sciences de l'ingénieur, a pu être testé et validé dans de nombreux travaux de thèse <sup>1</sup> sur différents équipements publics comme les gares les théâtres et les églises.

Notre démarche expérimentale doit obéir à des protocoles précis et explicite en rapport avec le caractère de la recherche. « Seule la voie de l'expérimentation semble avoir apporté quelques propositions d'intégration des phénomènes sonores dans les réflexions architecturales et urbaines » (Remy, N., 2001). Les outils liés à l'expérimentation seront définis en fonction de notre objet d'étude. Donc s'agissant de l'édifice de la mosquée on procédera à des investigations sous forme de simulation sur les mosquées modélisées ainsi que des mesures in-situ sur les mêmes mosquées.

---

<sup>1</sup> Les thèses de (Remy, N., 2001) et (Semidor, C., 1999)



Toutefois ce choix méthodologique ne doit pas axer notre démarche exclusivement sur des concepts déductifs liés au domaine des lois physiques, puisque l'acoustique architecturale se définit par rapport à trois domaines disciplinaires alliant les sciences de l'ingénieur et de l'architecture à celui des sciences humaines. Notre travail sur l'espace de la mosquée en tant que lieu d'écoute doit s'inscrire à l'intérieur de ces trois domaines. Dans cette optique, l'évaluation des phénomènes sonores perçus par les usagers, sera évalué à travers l'enquête par le questionnaire. En conséquence notre démarche de recherche sera validée par la méthode expérimentale de l'objet d'étude, et les techniques d'enquêtes pour les usagers.

Au terme de cette phase expérimentale sur le corpus d'étude, et après analyse des résultats, la phase de la recherche relative au développement des propositions architecturales pour les architectes, débutera par une enquête auprès des architectes afin d'évaluer les outils d'aides qu'ils préconisent. Le but de cette phase étant la mise au point de recommandations architecturales pour la maîtrise des ambiances sonores dans les mosquées. En conclusion l'objectif final, est d'offrir à l'architecte un outil d'aide dynamique pour la prise en compte de la qualité sonore dans sa conception, sans restreindre sa liberté d'action ou le contraindre dans une mise en conformité quelconque.

Dans cette perspective la formulation de notre hypothèse sera la suivante « **la caractérisation acoustique d'un lieu d'écoute est défini par l'interaction entre trois composantes principales ; les espaces construits, les phénomènes sonores perçus et les exigences auditif des usagers** ». Ainsi la caractérisation acoustique de la mosquée et la conduite de solutions architecturales en vue d'une qualité sonore, requiert un processus interdisciplinaire.

#### **Processus ou déroulement de la recherche.**

Face à la complexité des concepts liés aux trois domaines d'études définis précédemment, notre recherche doit privilégier un processus interdisciplinaire, dans le but de trouver un lien entre les trois domaines disciplinaires. Dans cette perspective nous préconisons un processus progressif en trois étapes :

- Définir les caractéristiques, les propriétés et les exigences des trois facteurs, c'est-à-dire l'espace architectural, les sources sonores et les usagers.
- identifier les corrélations qui pourraient exister entre les trois facteurs.
- Etablir à partir de ces informations, la nature des solutions architecturales proposées à l'architecte.

Ce processus de recherche, doit obéir à des protocoles précis et explicite en rapport avec notre type de recherche. S'agissant d'une recherche expérimentale, nous devons :

- Proposer des méthodes d'analyses propres à la spécificité de chaque facteur : mesures in situ et simulations pour l'objet d'étude, enquêtes et entrevues pour les usagers et les concepteurs.
- Dresser un bilan de l'état de l'art, concernant principalement l'objet d'étude afin d'établir les valeurs normatives et les critères de références.
- Définir un outil méthodologique, pour la mise en forme des solutions architecturales pouvant servir de références pour les concepteurs.

Ainsi l'organisation de notre travail de recherche se fera en quatre chapitres :

- Un développement de connaissances et d'informations touchant les trois domaines d'étude, et leurs interrelations.
- Etude des caractéristiques et spécificités de l'objet d'étude, concernant le corpus choisi et les modèles relatés dans les travaux de recherches.
- Etude expérimentale des simulations et des mesures in situ, avec discussion des résultats.
- Etude expérimentale des corrections acoustiques par simulation et mise au point des propositions architecturales.

## Plan de la recherche et méthodologie

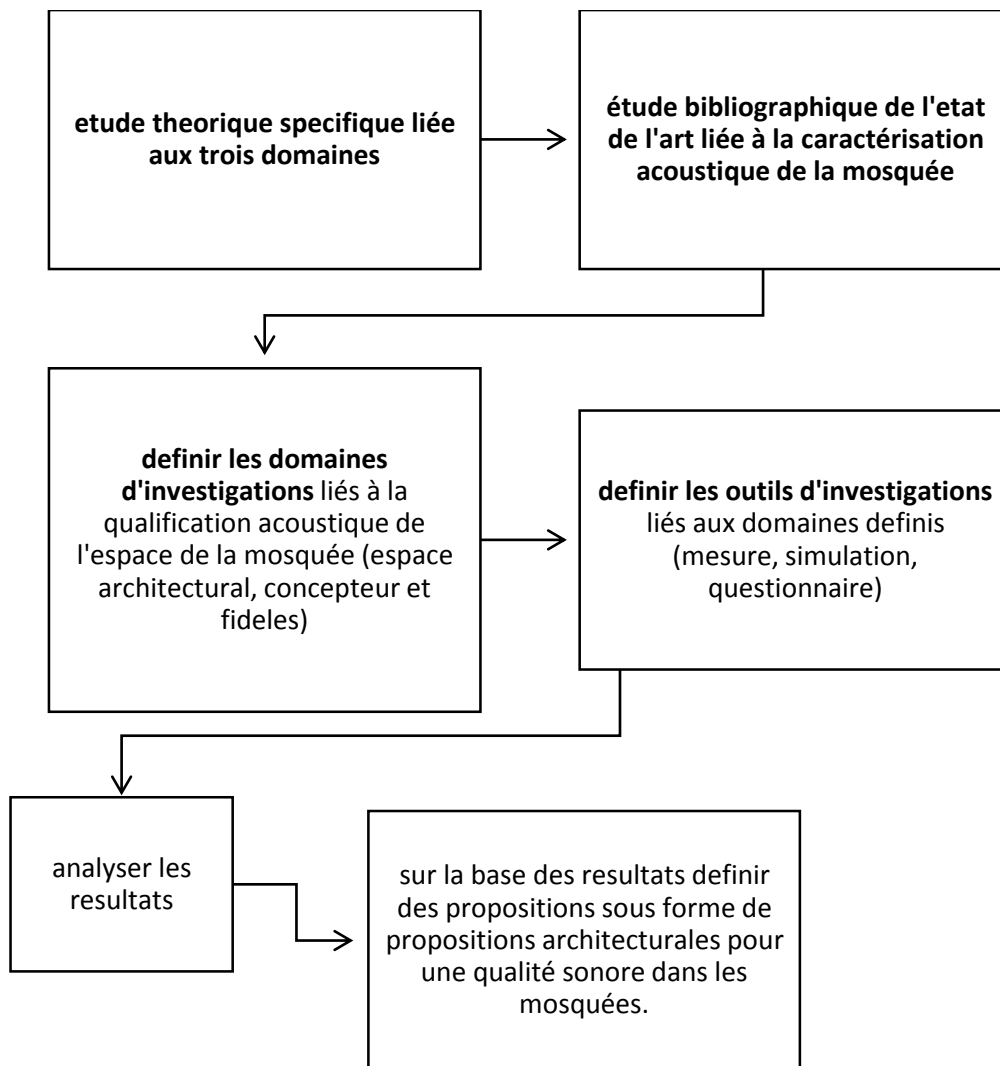
### Plan de la recherche

<b>Etude théorique</b>				
<b>Etude spécifique touchant les trois domaines</b>			<b>Etude synthétique</b>	
<b>Source sonore</b>	<b>Espace architectural</b>	<b>récepteur</b>	<b>Etude de l'état de l'art sur l'acoustique des mosquées</b>	
<b>Phénomènes physiques</b>	<b>Caractéristiques architecturales</b>	<b>Exigences de confort auditif</b>	<b>Tirer les valeurs normatives des critères acoustiques</b>	<b>Relation entre les critères acoustiques et les composants architecturaux</b>
<b>Etude des relations et synergies entre les trois domaines</b>				

<b>Etude expérimentale et prévisionnelle</b>		
<b>Définir les outils d'investigation de l'espace de la mosquée</b>		
<b>Outils liés à l'espace</b>	<b>Outils liés au concepteur de l'espace</b>	<b>Outils liés à l'usager de l'espace</b>
<b>Mesure in situ et Simulation informatique</b>	<b>Questionnaire destiné aux architectes</b>	<b>Questionnaire destinés aux fidèles</b>
<b>Choix de mosquées représentatives</b>	<b>Déduire les critères de conception utilisés par les architectes</b>	<b>Définir les relations entre critères subjectifs et objectifs</b>
<b>Analyse des résultats et proposition des solutions architecturales pour une qualité sonore dans les mosquées</b>		

## Processus de la recherche

Cet organigramme permet d'illustrer le processus de la recherche.



# **CHAPITRE 1 : L'acoustique architecturale.**

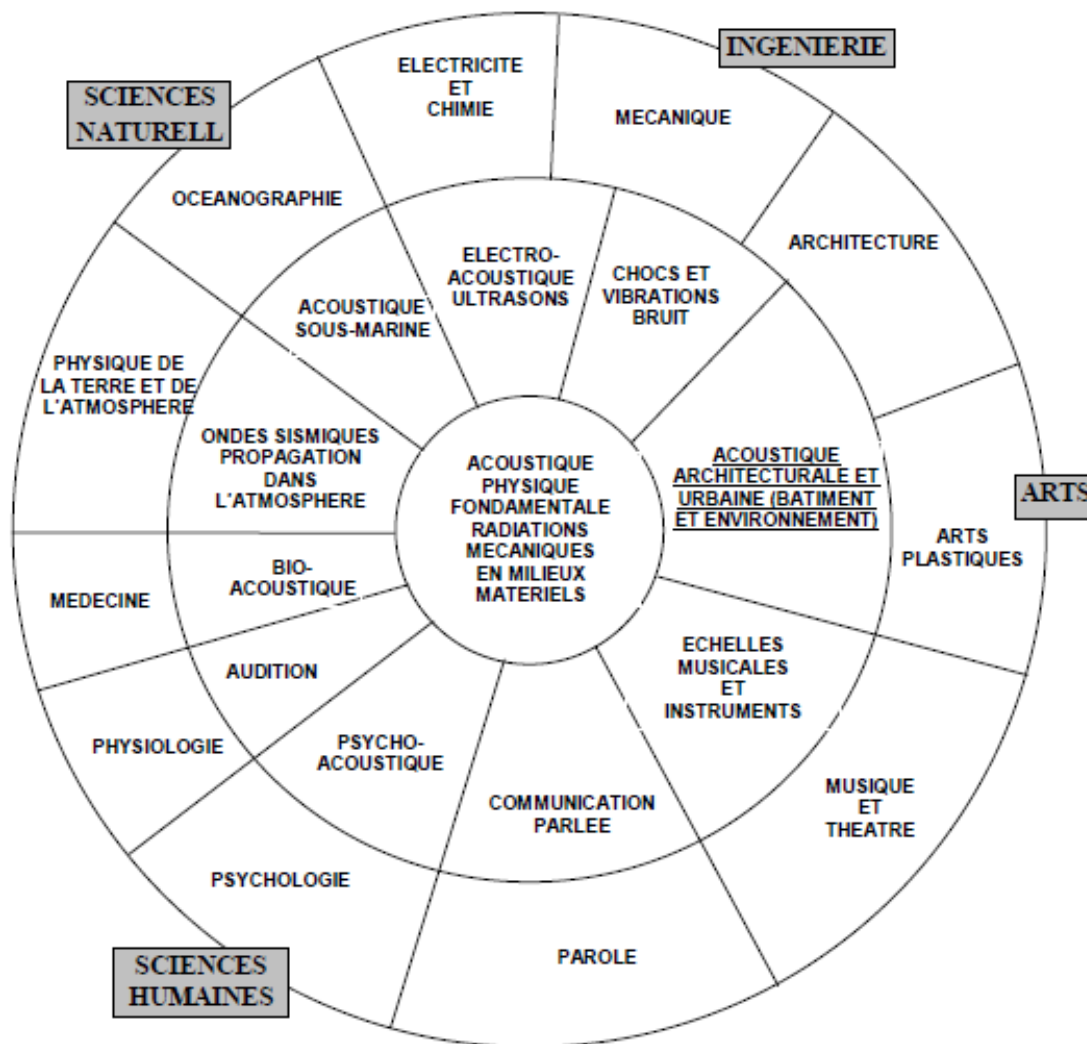
## **1.1. Introduction**

L'objectif de cette partie est de définir les notions relevant du domaine de l'acoustique physique, dans le but de comprendre et de caractériser les phénomènes sonores se produisant dans un espace. Sans entrer dans le développement détaillé de ces phénomènes ; On s'attachera principalement dans le premier chapitre à définir les grandeurs physiques liées à la propagation du son dans les espaces clos ; ainsi que les méthodes et les instruments susceptible de les quantifier. Ce chapitre développera également les propriétés de l'espace architectural soumis à la propagation des sources sonores, et la mise en évidence des synergies qui en découlent. En final, les principaux critères objectifs utilisés dans la caractérisation acoustique des espaces seront exposées.

## **1.2. L'acoustique.**

L'acoustique, en tant que science physique du son, occupe une place particulière dans la science moderne. Elle a pour but d'étudier les problèmes physiques physiologiques et psychologiques liés à l'émission, la propagation et la réception des sons. Un son est défini en tant que Bruit lorsque celui-ci est désagréable. Le bruit est ainsi associé à tout phénomène acoustique produisant une sensation auditive considérée comme désagréable ou gênantes.

L'acoustique en tant que science, couvre un éventail très large de spécialités dont l'acoustique architecturale et urbaine (Planche.1.1). L'acoustique architecturale étudie l'interaction entre les constructions et la propagation des sons, elle se divise en deux grands domaines. Celui de l'isolation acoustique étudiant la protection des bâtiments contre les bruits et les vibrations extérieurs ; et la correction acoustique appelée également acoustique des salles, relatif à l'optimisation des conditions d'émission et de réception des ondes sonores à l'intérieur des salles.



(Source : Semidor, C., 1999)

Planche 1.1 : Les relations de l'acoustique architecturale avec l'ingénierie, les arts et les sciences humaines.

### **1.2.1. Le son**

Le son est une sensation auditive provoquée par une onde acoustique. D'un point de vue physique, c'est une vibration se propageant dans un milieu matériel, d'un point de vue physiologique, c'est un signal perçu par le sens de l'ouïe. L'onde acoustique résulte d'une vibration de l'air dû à une suite de pressions et de dépression. Cette vibration se transmet de proches en proches et de la source à l'organe de réception. Afin de mieux expliciter le phénomène physique de l'onde sonore, donnons l'exemple suivant. Dans l'air, une onde sonore comprime et dilate les molécules de l'air (qui l'entoure), qui elles-mêmes bousculent et compriment leurs voisins et ainsi de suite. L'air est le support du son, le son ne se propage pas dans le vide.

Dans le milieu liquide, une pierre qui tombe à l'eau provoque des vagues concentriques autour de son point de chute. Les vagues sont en fait des ondulations de l'eau comparable aux ondulations de l'air provoquées par une vibration. La propagation du son se fait dans toutes les directions à partir de la source. La vitesse de propagation des ondes est une caractéristique du milieu dans lequel ces ondes se propagent. Le son est caractérisé par son niveau sonore et sa fréquence.

### **1.2.2. La fréquence ou la hauteur du son**

On dit d'un son qu'il est grave ou aigu en rapport avec sa hauteur, caractérisée par la fréquence. La fréquence exprimée en hertz symbole (Hz) ; indique le nombre de fois qu'une grandeur périodique se reproduit identiquement à elle-même dans.

1 Hertz = 1 cycle par seconde.

Ainsi une corde qui vibre en faisant 110 allers retours en 1 seconde émettra un son de fréquence 110 Hz. La fréquence caractérise la hauteur d'un son, qui représente son aspect physiologique. L'échelle des hauteurs et habituellement divisée en trois domaines.

Sons physiologiquement graves de 20 à 200 Hz

Sons physiologiquement médiums de 200 à 2 000 Hz

Sons physiologiquement aigus de 2 000 à 20 000 Hz

Les sons audibles pour l'homme vont de 20 Hz (sons graves) à 20 000Hz (son aigus). Les fréquences inférieures à 20 Hz sont des infrasons. Les fréquences supérieures à 20 000Hz sont des ultrasons. (Planche 1.2)

### 1.2.3. Le niveau sonore

Les mesures acoustiques caractérisant l'amplitude, l'intensité et la puissance de l'onde acoustique sont souvent exprimées en termes de niveau sonore. La raison est que dans le cas de la gamme des pressions sonores qui doivent être traitées en acoustique est d'au moins 1 : 10000000 qui est 1 :  $10^7$ . Cela conduit à des chiffres non maîtrisables pour décrire les pressions sonores et les rapports de pression acoustique.

La gamme des intensités est d'autant plus large que la gamme des pressions sonores, elle est de 1 :  $10^{12}$ . En effet le seuil de la perception sonore à une intensité de  $10^{-12}$  Watts/m<sup>2</sup> ( $20\mu$  pascals) et celle de douleur apparaît à 1Watts/m<sup>2</sup>. Pour cela et pour d'autres raisons, on utilise l'échelle logarithmique pour décrire les niveaux sonores en décibel (dB). Le niveau d'intensité IL d'un son ayant une intensité I est défini par

$$IL = 10 \log I/I_0$$

I : l'intensité mesurée

$I_0$  : l'intensité de référence ( $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>).

L'intensité acoustique est associée à la puissance acoustique. Elle correspond à l'énergie sonore captée par unité de temps et par unité de surface. L'intensité (ou puissance acoustique) s'exprime en W/m<sup>2</sup>. L'intensité que peut recevoir l'oreille est sensible à une multitude d'ondes acoustiques dès lors que les fréquences sont comprises entre 20 et 17000 Hz et que la pression engendrée est supérieure à  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa (pression minimale audible à 1000 Hz). Une pression acoustique de 20 pascals est considérée comme le seuil de douleur. En première approche la sensation à la fréquence de référence de 1000 Hz est proportionnelle au logarithme de la pression efficace (loi de Weber-Fetchner) et sera corrélée au niveau de pression ou d'intensité. Toutefois à niveau donné la sensation dépendra de la fréquence, l'oreille étant plus sensible à certaines fréquences qu'à d'autres.

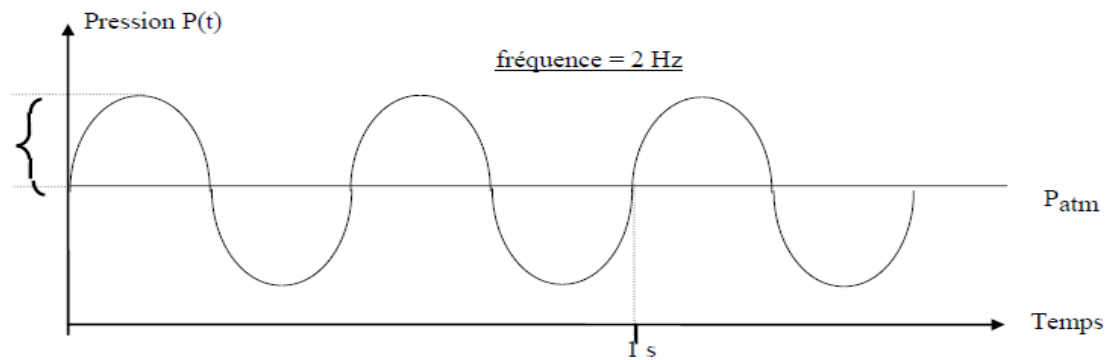


#### 1.2.4. L'utilisation des décibels

Suite à la définition des paramètres caractérisant une source sonore, on déduit que le décibel est une unité sans dimension permettant d'exprimer un certain rapport entre l'intensité sonore mesurée et l'intensité la plus petite audible par l'homme. Sa particularité est qu'elle représente une échelle logarithmique ; dans l'échelle logarithmique l'écart entre chaque nombre est multiplié par 10. Cette échelle permet de représenter de façon assez réaliste la sensibilité de l'oreille humaine à différentes stimulations. Pour mesurer le son à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments on utilise les décibels A. Ces décibels prennent en compte la sensibilité de l'oreille par rapport aux fréquences (Planche 1.2).

Un mélange de son différents, ayant chacun sa fréquence et son niveau sonore est défini en tant que « bruit ». Le graphe représentant le niveau sonore en dB en fonction de la fréquence s'appelle le « spectre sonore ». Dans le bâtiment l'analyse du spectre sonore ne prend en compte que les fréquences de 100 à 5000 Hz, regroupées en six bandes de fréquences, appelées « bandes d'octaves », centrées sur 125, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz.

Les opérations d'addition et de soustraction des niveaux sonores, du fait de leurs échelles logarithmiques, ne se fait pas arithmétiquement. Deux sources sonores qui émettent simultanément un son de 80 dB, ont un niveau sonore global de 83 dB. En fait, doubler le niveau sonore d'un son revient à rajouter 3 dB.



$P_{\text{acoustique}} = P(t) - P_{\text{atm}}$  en Pascal .Signal sinusoïdale d'un ton pur d'une onde acoustique en fonction du temps. (Source Jouhaneau,J., 2003)

Le seuil d'audibilité  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa

Le seuil de douleur  $P = 20$  Pa.

Le niveau de pression acoustique ( $L_p$ ) est ainsi définit  $L_p = 10 \log P^2 / P_0^2$  en dB ou en dB(A).

Fréquences (HZ)	125	250	500	1000	2000	4000
Pondération en dB	-16	-8.5	-3	0	+1	+1

Les valeurs de l'unité physique du décibel, et de l'unité pondérée dB(A) correspondantes. (Source : Remy ,N., 2013 p 10)

Type d'espace	Niveau de bruit dB(A)
Chambre très calme	25
Bureau calme	40
Bureau-conversation moyennement bruyante	50
Rue animée – conversation.	60
Rue à fort trafic	80
Musique forte- train à 25 m.	90
Atelier très bruyant.	110
Avion à réaction.	120

Quelques exemples de niveaux de bruits en dB(A) (source memento technique du bâtiment Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques juillet 2003) (Source Remy ,N., 2013 p 15)

Planche 1.2 : Les valeurs du son caractérisées par la fréquence et le niveau sonore.

### **1.2.5. Les mesures.**

On entreprend des mesures du son, afin de mieux connaître l'influence du bruit sur les personnes. La métrologie acoustique permet également de développer les connaissances scientifiques dans le but de maîtriser les niveaux sonores pour vérifier l'application de la réglementation et le respect des valeurs normatives. Les mesures acoustiques effectuées en laboratoire ou in situ, doivent obéir à des méthodes et des conditions définis par les normes internationales.

### **1.2.6. Les instruments de mesure.**

Les mesures du niveau sonore se font à travers un sonomètre. Le sonomètre est un appareil portatif utilisé pour mesurer des niveaux sonores soit physique en dB, soit pondérés en dB(A), dB(B) ou dB(C) qui représentent les niveaux réellement perçus par l'individu. La pondération A simule la sensation sonore de l'oreille humaine est un filtre électronique intégré au sonomètre.

La courbe de pondération (A), correspond à la physiologie de l'audition pour les niveaux sonores inférieurs à 55 dB, les courbes de pondération (B) et (C) correspondent au comportement de l'oreille à des niveaux compris respectivement entre 55 et 85 dB, et supérieurs à 85 dB. L'objectif de la métrologie acoustique est de modéliser la perception acoustique afin de substituer à l'oreille humaine un appareil de mesure le plus fidèle possible. Pour le cas de notre étude, le sonomètre servira pour les mesures du bruit de fond en dB (A) à différents endroits des mosquées choisies.

### **1.3. L'Acoustique des salles**

#### **Introduction**

Ce sous-chapitre, exposera les principaux aspects de la caractérisation de la qualité acoustique des salles. En débutant par une description des éléments permettant de comprendre et de caractériser les phénomènes sonores dans un espace clos.

Dans le but de contribuer à une qualité sonore, l'acoustique des salles doit répondre à certaines exigences liées, d'un côté aux caractéristiques architecturales du lieu, d'un autre côté aux usagers en tant que récepteurs ainsi que les sources sonores représentées par le locuteur produisant le message parlé. Les trois paramètres pouvant contribuer à la qualité acoustique d'un lieu d'écoute, sont définis comme suit :

Le premier domaine concerne les sources sonores (présentent dans les lieux d'écoutes), les critères de ce domaine, s'appuient sur des concepts relatifs aux sciences physiques, définissant les caractéristiques des phénomènes physiques produits par l'énergie de la source sonore qui se déplace à l'intérieur d'un espace.

Le deuxième domaine, concerne les exigences du confort auditif de l'utilisateur et les caractéristiques objectives de sa perception sonore. Enfin, les caractéristiques architecturales de l'espace qui constitue le lieu d'écoute, représente le troisième domaine d'étude ; il est question dans ce cas d'examiner les dimensions les formes et l'organisation de l'espace ainsi que la nature des matériaux qui le composent.

#### **1.3.1. Définition de l'acoustique des salles**

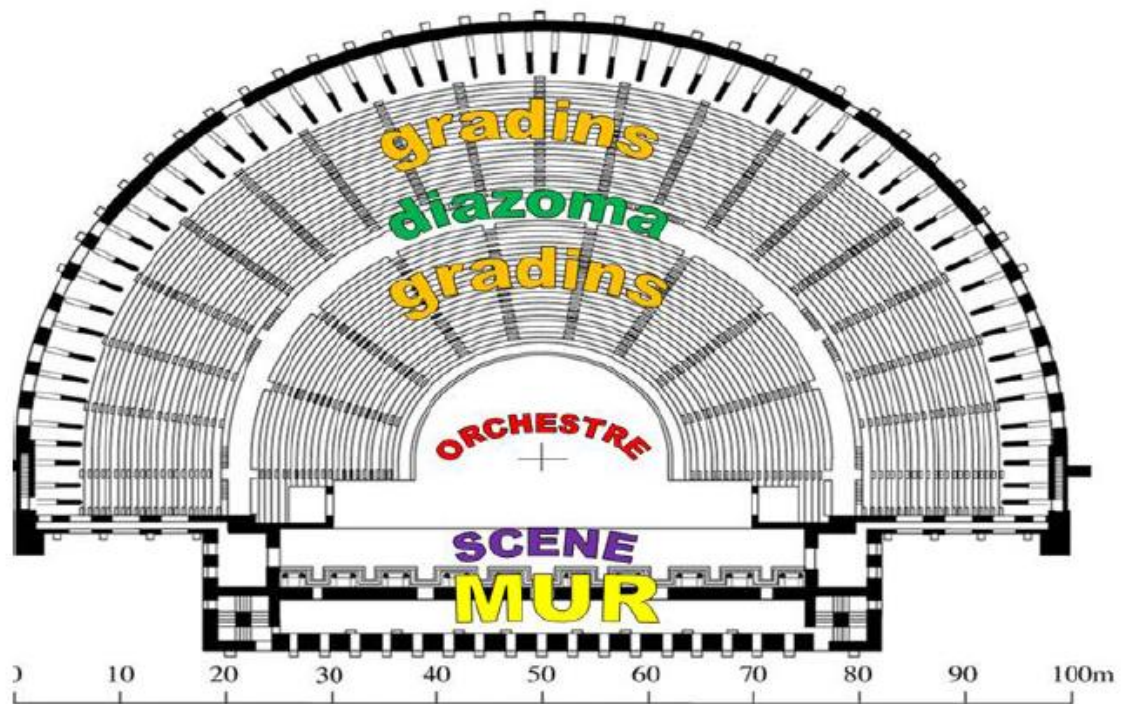
L'acoustique des salles vise à offrir la meilleure qualité d'écoute dans différents lieux, dédiés au spectacle ou à la communication orale : les salles de concert, les théâtres, les opéras, mais aussi les lieux de culte comme les églises et les mosquées. L'acoustique des espaces architecturaux liés à l'audition, communément appelés acoustique des salles est un domaine déjà fort bien maîtrisé depuis l'antiquité. Pour amplifier un son, les Grecs se servaient de propriété physique des matériaux, de la connaissance qu'ils avaient acquise sur des phénomènes de d'absorption et de réflexion des sons. La forme des amphithéâtres grecs et romains devaient répondre à des exigences acoustiques.

Les vases de Vitruve représentent un autre héritage marquant de l'époque antique. Ils étaient utilisés dans les théâtres (géométrie, résonances, émission sonore) pour interférer passivement avec les phénomènes acoustiques du lieu. Ces cavités jouaient donc un rôle de filtre acoustique atténuant certaines fréquences. « Les dimensions auxquelles ces vases étaient généralement conçus font imaginer qu'ils servaient à faire résonner les ondes, pour les fréquences proches de la voix » (Pellerin, G., 2003).

Cependant les connaissances en acoustique des salles au temps de la Grèce antique étaient avant tout empiriques ; ce domaine de connaissance restera très longtemps presque entièrement basé sur l'expérience, se développant par suite d'essais aboutissant parfois à des échecs, parfois à de grandes réussites pouvant ensuite servir de modèle pour les salles suivantes (Planche 1.3).

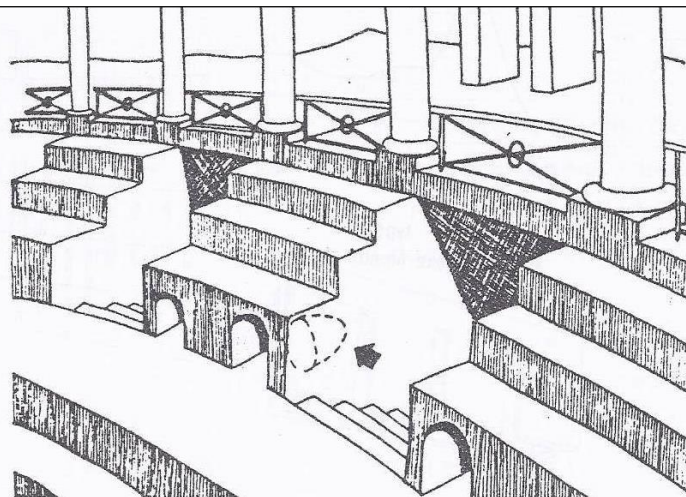
L'acoustique des salles est une science qui étudie l'émission, la perception et surtout l'absorption du son (musique ou parlé) dans un espace architectural déterminé. L'objectif général de cette science est de réaliser des salles dont les propriétés acoustiques sont optimales au point de vue du confort de l'écoute.

Dans le cas des mosquées, la salle de prière appartient à la grande famille des espaces qui sont définis comme des lieux d'écoutes. Un lieu d'écoute est essentiellement un espace destiné à recevoir un public qui s'installe pour écouter un message sonore. Ces lieux conçus en espaces fermés ou semi-ouverts affectés à cet usage, forment des équipements tels que les théâtres, les salles de concerts, les salles de conférences et les opéras ; les lieux de culte comme les mosquées et les églises sont également considérés comme des espaces appartenant à cette catégorie puisque leurs fonctions consistent à transférer un message sonore à un public. Dans le but de contribuer à une qualité acoustique, la conception de ces espaces doit répondre à certaines exigences liées d'un côté aux caractéristiques architecturales du lieu, d'un autre côté aux usagers en tant que récepteurs et à l'orateur en tant que source sonore.



The Roman Theatre at Aspendus (modern Belkiz, Turkey).  
 Cavea width: 95.48 m, orchestra width: 23.87 m; capacity: 15,000; ca. 161-169 AD.  
 Plan (T.H. after Lanckoronski)

Le théâtre romain d'Aspendus en Turquie est célèbre pour son excellent état de conservation mais aussi à son acoustique remarquable. Les spectateurs assis au dernier rang de ce théâtre doté d'une capacité d'accueil de 15000 personnes, peuvent en effet entendre distinctement les paroles d'un acteur situé sur la scène à une distance de plusieurs dizaines de mètres. (Delétré, J.J. 2003)



Emplacement des vases acoustiques dans les théâtres antiques. Ces vases acoustiques sont aménagés sous les sièges des spectateurs en forme de cavités. . (Pellerin, G., 2003)

Planche 1.3 : Aménagements architecturaux des théâtres romains pour satisfaire à une bonne acoustique.

Trois paramètres, pouvant contribuer à la qualité acoustique d'un lieu d'écoute ont été recensés :

- L'architecture de l'espace, sa forme son volume ses matériaux.
- Le type de la source sonore, dans le cas des mosquées c'est une voix de l'imam.
- Le type des usagers de l'espace en question, qui sont les fidèles qui doivent percevoir le message de façon claire.

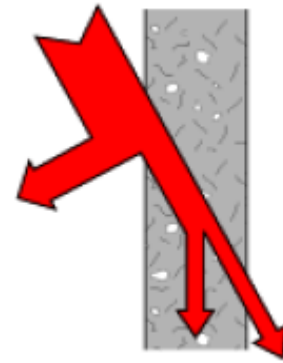
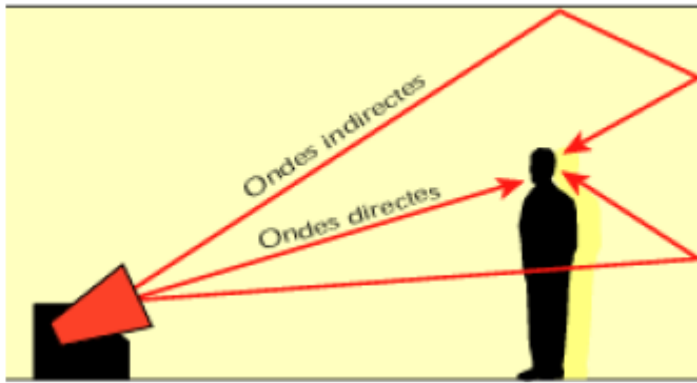
Il est indéniable que dans le cas de notre étude, les caractéristiques spatiales de la mosquée, constituent l'un des paramètres les plus importants soumis à l'analyse et l'investigation. L'objectif étant de mettre en évidence les liens et rapports entre les éléments de l'espace, et la qualité sonore.

Les trois facteurs ainsi définis déterminent trois domaines d'études que l'on doit développer, d'abord pour connaître leurs propriétés et caractéristiques propres, ensuite, mettre en évidence les relations qui s'établissent entre eux et les synergies qui en résultent.

### **1.3.2. L'énergie sonore induite par une source dans une salle**

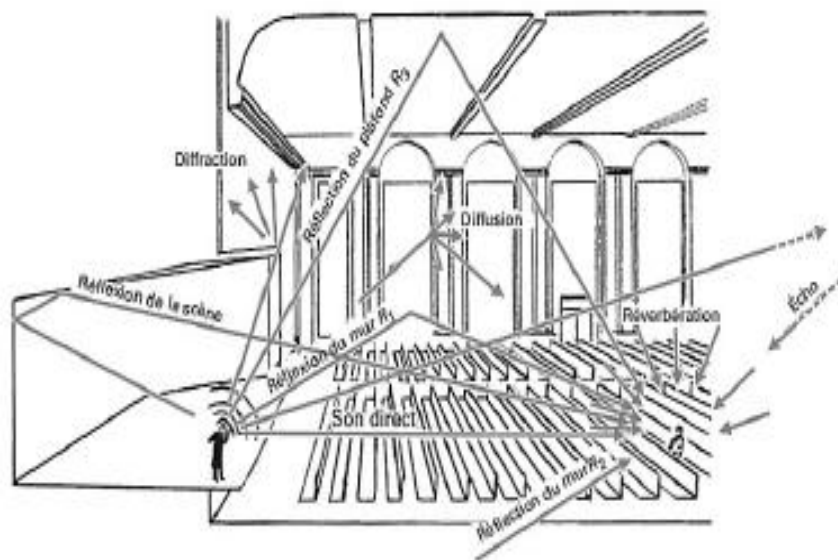
La caractérisation acoustique d'un espace destiné à l'écoute, est assujettie à l'étude de la propagation de l'énergie sonore émise par une source, (dans un espace architectural fermé et aménagé) jusqu'au récepteur.

Considérons un spectateur dans un auditorium, 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, parcourant un trajet plus long. Au point de réception se superpose donc l'énergie dû au son direct et celle provenant indirectement de la source après avoir subi un certain nombre de phénomènes physiques (Planche 1.4).



Chemin élémentaire parcouru par un son émis par une source ponctuelle vers un récepteur. Le son se décompose en onde sonore directe et réfléchi. En rencontrant une paroi l'onde sonore est réfléchi, absorbée ou transmise.

Source : <http://fr.audiofanzine.fr>.)



Mode de propagation d'un son dans une salle, avec les différents phénomènes liés à sa propagation (source : Baranek , L, L., 2002 , p 5 )

Planche 1.4 : Différents phénomènes physiques liés à la propagation de l'onde sonore dans un espace clos.



Ce phénomène se reproduit un très grand nombre de fois, jusqu'à ce que l'intensité sonore devienne trop faible pour pouvoir être perçue. Le spectateur reçoit ainsi une succession d'ondes sonores comme indiqué dans le schéma de la planche 1.4.

S'agissant de l'espace de prière d'une mosquée le phénomène décrit est similaire ; L'énergie sonore transmise à l'intérieur de la salle de prière, arrive à l'oreille des fidèles sous forme d'une combinaison de son direct et de nombreuses réflexions de ce son. Autrement dit, le son se propage de l'imam vers les fidèles en empruntant différents chemins, au gré des réflexions du son sur différentes surfaces. Certains de ces sons réfléchis atteignent l'auditeur presque immédiatement après le son direct, mais d'autres peuvent se réverbérer dans la salle pendant une seconde ou plus. Le rapport entre les sons directs et les sons réfléchis varie de place en place en fonction des propriétés acoustiques de la salle. En règle générale les fidèles entendent une combinaison de milliers de signaux vocaux ayant emprunté des chemins différents.

Il existe deux sortes de sons réfléchis, les réflexions immédiates et les réflexions tardives. Les réflexions immédiates sont très utiles car ils accroissent l'intelligibilité de la parole ; par contre les réflexions tardives (au-delà de 0,05 s), sont indésirables, puisque considérées comme une autre forme de bruit. Ces sons qui se sont réverbérés longtemps après l'arrivée du son direct, brouillent l'écoute du mot qui suit, ce qui diminue l'intelligibilité de la parole. Il est donc important afin d'optimiser l'intelligibilité de la parole, de minimiser les réflexions tardives et le bruit de fond, et accroître les réflexions immédiates.

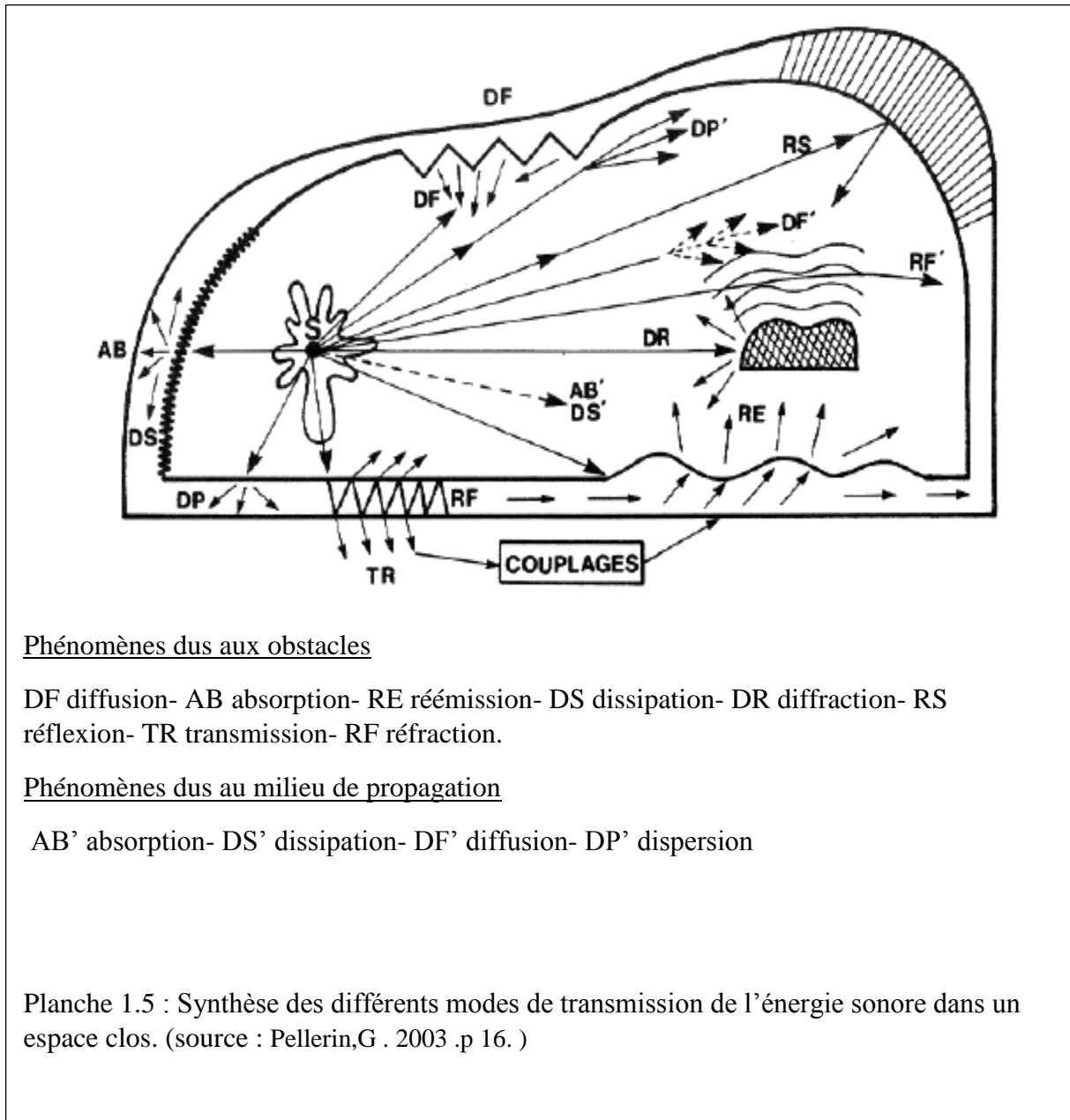
### **1.3.3. Caractéristiques de l'énergie sonore dans un espace clos.**

La nature de l'énergie sonore générée par une source dans un espace clos, est fonction de l'évolution dans le temps et l'espace, en fréquence et en amplitude, de cette dernière. L'énergie sonore rayonnée par la source jusqu'aux récepteurs installés dans l'espace, est également déterminée par sa fréquence et son intensité. La forme et la structure du champ sonore est défini par plusieurs facteurs, liés aux composants de l'espace. Ainsi le champ sonore est le résultat des modifications des propriétés temporelles et spatiales que subit l'onde acoustique en rencontrant des obstacles tel que les murs, poteaux, meubles, personnes ; etc. Il en résulte plusieurs phénomènes physiques, subis par l'onde sonore durant sa propagation, dans l'air et sur les parois.

**La réflexion** : changement de direction de l'onde sonore arrivant sur une paroi lisse, l'angle d'incidence sera égal à l'angle de réflexion. Dans le cas d'une paroi rugueuse, l'onde se réfléchit dans des directions variées, le son est alors **diffusé**.

**La diffraction** : le changement de direction de l'onde sonore provoqué par des obstacles à surface courbe ou avec arêtes.

**L'absorption**, qui est le résultat de la perte d'une fraction de l'énergie sonore de l'onde incidente en contact avec une paroi ou un obstacle. Cette absorption peut être nulle (réflexion totale) partielle ou totale (Planche 1.5).



Phénomènes dus aux obstacles

DF diffusion- AB absorption- RE réémission- DS dissipation- DR diffraction- RS réflexion- TR transmission- RF réfraction.

Phénomènes dus au milieu de propagation

AB' absorption- DS' dissipation- DF' diffusion- DP' dispersion

Planche 1.5 : Synthèse des différents modes de transmission de l'énergie sonore dans un espace clos. (source : Pellerin,G . 2003 .p 16. )

#### 1.3.4. Champs sonore direct et réverbéré.

Les phénomènes physiques que subit l'onde sonore, vont bien sur modifier l'amplitude et également la direction de propagation de l'onde, chaque fois qu'elle va rencontrer un obstacle. Le son qui parvient aux récepteurs (les fidèles) aura la structure d'un champ libre s'il est direct, ou d'un champ diffus s'il est réverbéré, provenant de réflexions multiples. Ce qui nous importe dans le phénomène des champs sonore, c'est d'estimer **l'intensité** du son que perçoit l'auditeur. Le critère distance intervient dans ce cas, puisque le niveau d'intensité du champ libre diminue de 6 dB chaque fois que l'on double la distance. Par contre le niveau du champ diffus reste constant ; ce dernier est déterminé par les caractéristiques géométriques et d'absorption de la salle.

L'évaluation de l'un ou de l'autre est donc fonction de la distance auditeur-source. L'intensité du son direct sera plus importante que celle du son réverbéré si l'auditeur est proche de la source. La distance qui sépare la perception du champ libre, du champ réverbéré est appelée « distance critique ». La connaissance de cette distance critique est importante, car elle conditionne le type d'écoute, on est alors dans un plan proche si le champ direct est plus élevé que le champ réverbéré et dans un plan lointain si le champ réverbéré domine.

L'atténuation de l'intensité de la source sonore décroît à mesure que l'auditeur s'éloigne de la source. Elle résulte de la déperdition d'énergie émise par la source et est appelée atténuation par dissipation atmosphérique. Cette dernière augmente avec la fréquence ; c'est pourquoi à grande distance d'une source, les sons graves sont davantage audibles que les sons aigus, plus vite dissipés.

L'intensité sonore directe est fonction de la puissance de la source et de sa directivité. L'intensité indirecte (propre au champ réverbéré) est par contre liée aux caractéristiques architecturales de l'espace, à savoir ; les rapports dimensionnels, la forme géométrique et la nature des matériaux mis en œuvre. On peut également citer un autre critère lié à l'atténuation de l'énergie sonore au point d'écoute, représenté par le volume d'air de l'espace, qui dépend de sa température et de son taux d'humidité ; ce milieu est cependant considéré comme homogène et isotrope, ne provoquant aucune déviation de direction de l'énergie dans son parcours à travers l'espace. Ainsi le champ induit par une source sonore se divise en deux :

- Le champ direct dont la valeur ne dépend que des caractéristiques de la source et de la distance source-point de mesure.

- Le champ réverbéré qui comprend par définition, le champ des réflexions successives. On parle de champ acoustique diffus, quand les ondes sonores perçues parviennent de toutes les directions.

### **1.3.5. Champ auditif et confort d'écoute**

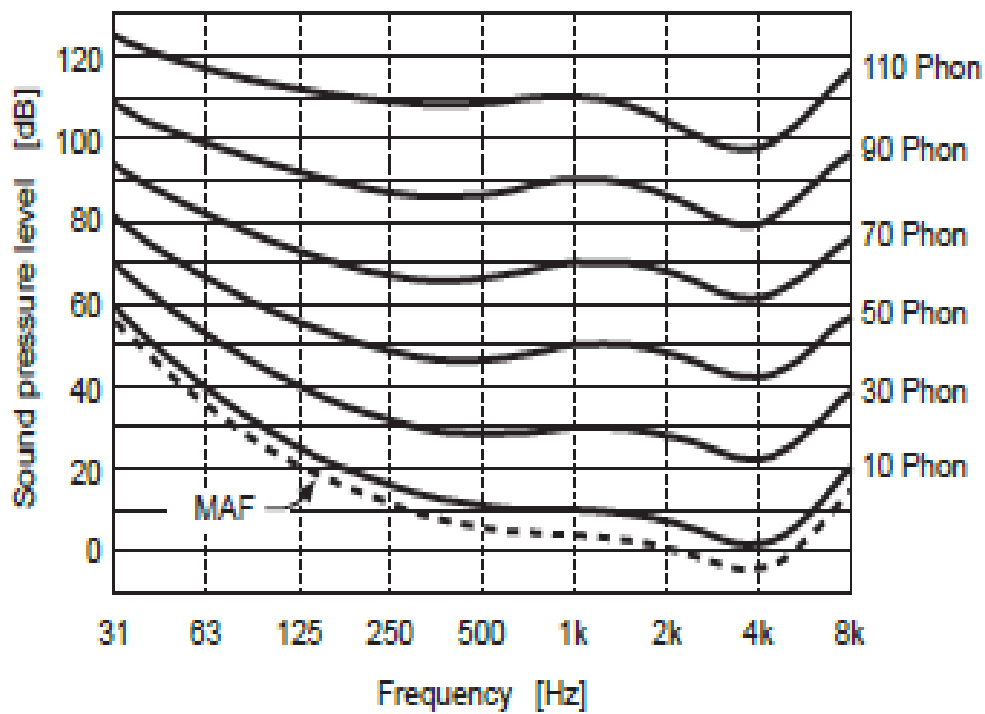
Le système d'audition n'a pas la même sensibilité à toutes les fréquences. Si l'oreille est peu sensible aux fréquences graves, elle est en revanche sensible aux fréquences médiums, dédiées à la parole. La parole et la musique, très bien perçues par l'oreille ont des fréquences médiums (200 à 2000 Hz). Dans le cadre de l'acoustique du bâtiment les fréquences étudiées se situent entre 100 et 5000 Hz.

L'oreille humaine perçoit les sons dont la fréquence varie de 20HZ (sons graves) à 20 000 HZ (sons aigus). Pour tenir compte de cette particularité, le niveau sonore du bruit perçu par l'oreille est caractérisé par une seule valeur au préalable corrigée en fonction de cette sensibilité. On obtient ainsi le niveau de bruit pondéré qui est noté dB(A) et qui correspond à une unité physiologique. Cette unité pondérée représente la valeur réglementaire à respecter en matière de confort acoustique, ainsi le seuil de perception de l'oreille humaine débute de 0 dB jusqu'à 130 dB considéré comme le seuil de la douleur. La valeur de la sensation auditive dépend donc de l'énergie sonore d'une part, et de la fréquence des sons émis d'autre part.

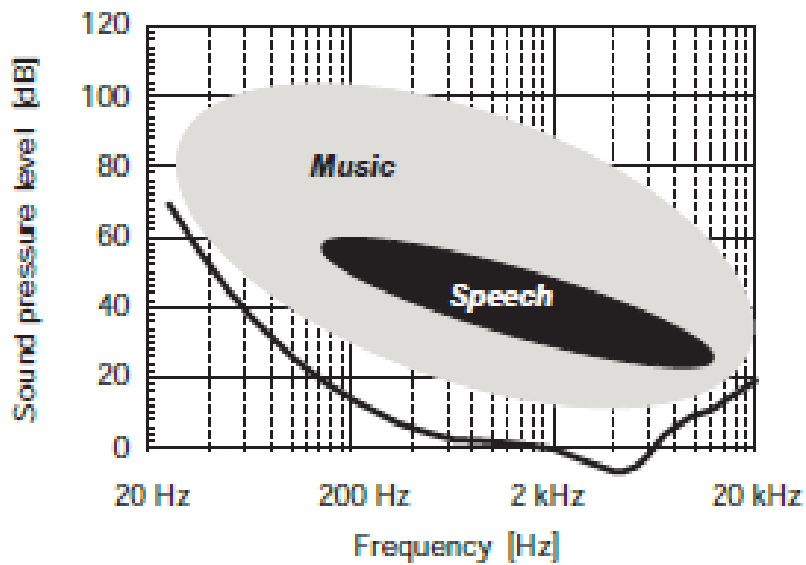
D'un point de vue physiologique l'oreille ne perçoit que les fréquences comprise entre 20Hz et 15000 Hz. L'oreille est également beaucoup plus sensible aux sons médiums et aigus qu'aux sons grave (Planche 1.6).

« Ce phénomène a été étudié par Fletcher et Munson , qui ont établi des relations d'égale sensation entre les sons purs en recherchant quelle intensité il fallait à un son de fréquence donnée pour qu'il engendre la même impression de force sonore qu'un autre son de référence, le son de référence est un son pur de fréquence 1000 Hz » (Hamayon .L., 2013).

Les résultats de leurs travaux ont conduit à la normalisation des lignes ou courbes isosoniques, chaque ligne isotonique est repérée par une graduation exprimée en phons. Les niveaux sonores des différentes fréquences situés sur une même courbe isotonique, ont la même sensation sonore déterminée en phon. A titre d'exemple, sur la courbe de 40 phon (planche 1.6) le niveau sonore de 60 dB à 125 Hz aura la même sensation sonore que le niveau sonore de 40 dB à 1 KHz.



Les courbes d'égales sensation sonore ou courbes isosoniques de Fletcher et Munson .



Délimitation de la plage de fréquence propre à la parole et à la musique, en acoustique du bâtiment.

Planche 1.6 : Courbes de Fletcher et Munson avec délimitation de la plage de fréquence propre à la parole. (Source : Kleiner, M et al., 2010)

#### **1.4. La composante acoustique du projet architectural.**

La composante acoustique du projet architectural, est une notion complexe faisant appel à des réflexions à la fois scientifiques, humaines et artistiques. « Ce qui est certain c'est que le sujet de l'acoustique des salles continue de fasciner artistes et scientifiques, en partie à cause du mystère qu'il semble encore nous réserver » (Nathanail, C., 1999). En tous cas pour garantir au projet architectural un bon environnement sonore, l'architecte « acousticien » doit comprendre comment réagit acoustiquement un espace architectural, ce qui fait la qualité d'une salle ou sa médiocrité sur le plan auditif. En synthèse il doit être en mesure de caractériser l'ambiance acoustique d'un espace. Pour ce faire, l'acoustique des salles constitue le domaine scientifique qui peut répondre aux attentes des architectes concepteurs. Elle a pour objectif de permettre aux concepteurs des espaces ayant une fonction d'écoute (salles de spectacles, théâtres, auditoriums, etc...) d'assurer une bonne qualité d'écoute de leur projet.

Assurer **une durée de réverbération** adaptée à l'usage de l'espace constitue la première exigence acoustique. Une durée de réverbération optimale, favorisera un message sonore clair et intelligible pour l'auditeur. En adoptant des choix architecturaux et architectoniques spécifiques, l'architecte contribuera au confort sonore, et à une qualité d'écoute pour les usagers de l'espace. D'une façon globale, avant d'opter pour une sonorisation systématique, les projets architecturaux doivent répondre à certaines exigences acoustiques. Assurer une **diffusion homogène du son**, dans l'espace, vers tous les auditeurs, en **favorisant le niveau du son direct et des premières réflexions**. Éviter les perturbations intérieures en maîtrisant tous les types d'échos ; et extérieurs par une isolation acoustique efficace vis-à-vis des bruits extérieurs.

Face à ces dispositions, on relève néanmoins différents modes d'adaptations acoustiques, en rapport avec certaines spécificités fonctionnelles des projets architecturaux. Pour les salles de spectacles et les espaces d'enseignement, il y a lieu de renforcer et de favoriser l'écoute en renforçant le niveau sonore en provenance de la source. Pour les espaces de bureaux et les ateliers et les espaces communs, on veillera au contraire à diminuer le niveau sonore. Enfin pour les espaces tels que les salles de sport, piscine et restaurants, une acoustique spécifique doit être conçue pour à la fois diminuer le niveau sonore tout en favorisant l'écoute à faible distance.

##### **1.4.1. La caractérisation de la qualité acoustique du projet architectural**

Dans ce travail, notre objectif est de questionner la notion de qualité sonore de l'espace de la mosquée, en rapport avec une éventuelle redéfinition de ses caractéristiques architecturales et

spatiales. De ce point de vue, on préconise l'évaluation objective de cette qualité, sans pour autant négliger l'approche de l'évaluation perceptive.

Dans cette optique, de nombreuses recherches distinguent fortement la façon dont nous pouvons décrire les sons de notre environnement (attributs perceptifs) et les paramètres physiques mesurables et calculables. Ainsi il est nécessaire d'aborder les différentes définitions liées au terme de la qualité acoustique et sa relation avec les composants de l'espace architectural d'une manière générale, ensuite mettre à jour les caractéristiques fondamentales, liées à la qualité sonore pour l'espace spécifique de la mosquée.

L'évaluation sonore en acoustique des salles, fait référence à deux paramètres : les facteurs perceptifs et les critères objectifs. Les facteurs perceptifs décrivent notre perception des différents aspects de la qualité acoustique, donc notre impression subjective de la qualité acoustique d'une salle. Généralement, les attributs de la perception sont déterminés par des séries d'enquêtes et questionnaires. Les critères objectifs sont des paramètres calculés à partir des mesures objectives de réponses impulsionnelles, ou mesurés in-situ, et décrivent la réponse acoustique de la salle entre une source et un récepteur.

#### **1.4.2. Définition des critères objectifs**

La mesure de réponses impulsionnelles caractérise la transformation d'un signal sonore entre une source et un récepteur disposés dans l'espace. Elle illustre la façon dont la salle modifie le son émis par la source. In situ la caractérisation acoustique d'une salle par la réponse impulsionnelle, se manifeste par l'émission d'un son bref, appelé impulsion, émis par une source son. Un micro omnidirectionnel placé dans la salle enregistre cette impulsion. Le premier front d'onde qui arrive au micro est le son direct. Et la multitude d'ondes réfléchies par les parois de la salle constituent le son réverbéré. Le tracé du son direct et de la succession des réflexions constitue la réponse impulsionnelle de la salle. La réponse impulsionnelle est la signature acoustique de la salle

La mesure des critères objectifs a été facilitée par les progrès réalisés dans le domaine du traitement du signal. La réponse impulsionnelle permet de caractériser complètement la transformation opérée par une salle entre la source et le récepteur. Le développement des programmes informatique a permis d'effectuer des mesures in situ ou de prédire sur des modèles architecturaux cette réponse impulsionnelle. Cette dernière permet le calcul de tous les

critères sélectionnés. Ainsi « le calcul des critères ne pose plus de difficultés majeurs ; par contre, interpréter ces critères objectifs dans le domaine perceptif reste encore bien souvent problématique » (Lavandier, C., 1989)

Le premier essai de la caractérisation acoustique d'une salle a été mené par W.C Sabine qui à partir de 1896 a entrepris des études pour caractériser l'effet de réverbérance dans une salle, il a établi la formule qui mesure le temps que met un son pour s'atténuer jusqu'à la limite de l'audible. Cette formule définit la correspondance quantitative entre la surface d'absorption, le volume et le temps de réverbération d'une salle (Hamayon, L., 2013).

« Cette formule de Sabine présente la première solution mathématique et quantitative d'un problème en acoustique des salles. A partir des connaissances des matériaux et des dimensions (donc le plan) de la salle, on pouvait désormais prédire le temps de réverbération finale de la salle » (Kahle, E., 1995)

Depuis, plusieurs chercheurs ont étudié les liens entre l'énergie des réflexions et le facteur de l'intelligibilité du discours musical ou de la parole. Ils ont essayé de définir une frontière entre l'énergie dite utile et l'énergie dite nuisible, afin de définir des facteurs perceptifs comme la clarté et l'intelligibilité, ainsi que d'autres critères permettant une évaluation objective de la qualité acoustique des espaces d'écoute. « Le spécialiste de l'acoustique Leo L Beranek a défini dix-huit critères permettant de caractériser l'acoustique d'un local » (Hamayon, L., 2013)

#### **1.4.3. Relation entre critères objectifs et perceptifs (subjectifs)**

Les travaux de Beranek, ont orienté la définition de la qualité acoustique des salles vers une nouvelle approche générale ; basée sur une description de différents aspects perceptifs. Son étude des aspects perceptifs se base sur des interviews de professionnels issus du monde de la musique (chefs d'orchestre, interprètes) afin de comparer des salles de spectacles entre elles plutôt que de considérer la qualité acoustique à des endroits différents à l'intérieur d'une même salle. La méthode de Beranek basée principalement sur le recueil des jugements par interview, « présente plusieurs inconvénients » (Kahle Acoustics et Altia., 2006).

Suite à cela la plupart des recherches après Beranek ont tenté de développer des approches en rapport avec un double objectif, d'un côté affiner les connaissances des corrélations entre les facteurs perceptifs et les critères objectifs et d'un autre côté spécifier les liens entre les critères acoustiques et les paramètres géométriques.



Un certain nombre de travaux notamment ceux du groupe de Göttingen (1965-1976) et le groupe de Berlin (1968-1976 ) (Kahle Acoustics et Altia., 2006) , après des tests psycho acoustique effectués en laboratoire et en salle réelle sur des extraits musicaux ont permis de confirmer l'existence de facteurs perceptifs structurant notre perception de la qualité acoustique et qui sont commun à tous.

La perception de la qualité acoustique des salles présente une certaine complexité, du fait qu'elle oppose l'aspect quantitatif de la mesure à la caractérisation de l'auditeur, car ce qui est qualitatif n'est pas quantifiable. Il n'y a pas forcément une équivalence des propriétés qualitatives de l'objet et la façon dont l'individu les entend ; mais il y a là l'idée d'un rapport « Les critères objectifs ont été définis pour quantifier les différents aspects subjectifs de la qualité acoustique d'une salle » (Remy, N., 2001)

Pour notre recherche, il est important de se poser la question de la relation entre critères objectifs et subjectifs dans la définition de la qualité sonore des mosquées, «dont les caractéristiques principales se situent au croisement de trois disciplines très différentes dans leur logique de fonctionnement : l'architecture, la psychosociologie et l'acoustique » (Remy, N., 2001).

Pour pallier à cette complexité, notre travail bibliographique a été orienté vers des travaux de thèses, qui ont tenté de définir un certain nombre de facteurs perceptifs susceptibles de caractériser la qualité acoustique d'une salle, et de les mettre en corrélation avec une série de critères objectifs acoustiques. De nombreux travaux de recherches (énoncés de thèse et articles scientifiques) ont apporté des éclaircissements sur la corrélation entre tous les descripteurs qualitatifs et les critères physiques mesurables. Ainsi la définition de la qualité acoustique des salles centrée sur des critères quantitatifs, a pu évoluer vers des considérations plus globales liées à la réception de ces critères par les auditeurs. Ces études scientifiques ont établi des relations et corrélations entre ces critères, dans le but de créer une correspondance cohérente entre critères objectifs et impressions subjectives.

On citera notamment le travail de Eckhard Kahle qui, dans sa thèse, est parti des principaux résultats de thèse de Catherine Lavandier afin de préciser les relations entre les facteurs perceptifs qui structurent notre perception et certain critères objectifs. L'étude de Lavandier C. avait pour objectif d'orienter la sélection des critères objectifs et leur traduction dans le domaine perceptif. « Les facteurs seront nommés par des termes choisis, compréhensibles par tous, qui décriront les qualités acoustiques des salles. Le passage du domaine objectif au domaine

subjectif et inversement du domaine subjectif au domaine objectif devrait être alors facilité. »  
(Lavandier, C., 1989)

Il est important de rappeler que tous ces travaux ont été effectués sur des salles de concert pour l'écoute de la musique, les critères perceptifs liés au facteur musique sont bien plus nombreux que ceux du message parlé. Ainsi, dans notre étude, nous ne retiendrons que les critères perceptifs liés à l'appréciation de la parole. Cela revient à déterminer les critères objectifs mesurables liés au discours parlé et leur traduction dans le domaine perceptif élaboré sous forme de questionnaire destiné aux usagers des mosquées.

Certains chercheurs comme JF Augoyard et P Amphoux définissent dans leurs travaux la relation de l'utilisateur au monde sonore comme « l'ensemble des relations fusionnelles, naturelles et vivantes » entre le milieu sonore et l'utilisateur défini en tant « qu'acteur social ». (Augoyard, J.F., 1995), Ainsi selon Augoyard le phénomène sonore sera analysé selon trois dimensions :

Le signal physique (quantifiable et mesurable), le son vécu (interprété par la perception) et le son représenté (en référence à des codes culturels et collectifs). Le rapport de ces recherches intègre le facteur culturel et social à notre perception et interprétation du monde sonore, donc l'individu portera un jugement sur le son qu'il entend selon son vécu et ses représentations culturelles et sociales. Dans cette optique nous pouvons conclure à ce schéma implicite de comportement du fidèle, qui dans un espace sacré, aura un jugement influencé par les représentations culturelles et sociales liées à la sacralité de cet espace. Pour illustrer ce phénomène nous donnons l'exemple suivant : « rentrons par la pensée dans deux espaces que nous ne connaissons pas encore mais qui, d'un point de vue de la réverbération, sont identiques. L'un est un lieu de culte que l'on visite, l'autre un hall de gare bondé. On imagine bien, sauf exception, que nous adapterons notre comportement de façon différente. Pourtant selon certains critères, ces espaces sont identiques (ils sont "publics", réverbérant, architecturalement imposant, etc...). Cependant, si dans l'espace religieux nous diminuerons l'intensité de la voix pour respecter le recueillement des pratiquants, il se peut que dans la gare, nous procédions à l'inverse pour garder le contact avec nos proches et s'assurer que tout le monde suit la même direction. » ( Remy, N.,2001)

On voit donc avec le développement de ces recherches, toute la complexité de la perception de la qualité acoustique suivant que l'on traite des aspects physiques, architecturaux ou encore perceptifs. Dans cette optique, il est important de distinguer entre les attributs perceptifs et les paramètres physiques mesurables et calculables. Il semble donc important de définir le type de

paramètres subjectifs que l'on va intégrer dans la qualification sonore de l'espace de la mosquée. Nous voudrions pour le cas de notre thèse approfondir notre réflexion méthodologique quant à l'intégration des paramètres de l'usager en rapport avec l'espace de la mosquée. Concrètement cela doit se traduire, par la formulation d'un questionnaire pour les fidèles des mosquées, qui prendra en compte l'ensemble des attributs perceptifs sonores, qu'on tentera de faire correspondre aux critères objectifs quantifiés par la mesure et la simulation.

En ce sens nous voyons que la complexité de la notion de qualité sonore, implique une pluridisciplinarité où « espace architectural » et « usagers » se définissent mutuellement. Dans notre travail, ces interactions pourront être observées à travers les résultats des mesures et le traitement des questionnaires. Ainsi notre méthodologie doit tenter de construire un modèle d'analyse afin de faire correspondre les trois composants de la qualité sonore ; à savoir l'espace construit, les phénomènes sonore et les usagers. Les critères d'analyses représentant l'espace architectural et les phénomènes sonores constituent des faits objectifs que l'on peut décrire et mesurer, les critères subjectifs seront caractérisés par des questionnaires ou des entretiens.

## **1.5. Critères objectifs pour la qualification des salles**

### **Introduction**

Ce chapitre tente de décrire les critères les plus utilisés pour l'évaluation scientifique de la qualité acoustique d'un espace clos. Les deux approches complémentaires pour la caractérisation acoustique de salles, citées dans les précédents chapitres sont ; d'une part l'approche perceptive où la qualité acoustique est évaluée directement par les auditeurs. D'autre part, l'approche objective qui consiste à décrire de façon physique la modification que subit le signal sonore lors de sa propagation dans la salle. Cette approche a pour objet de traduire les facteurs issus de l'approche perceptive en grandeurs physiques mesurables. Il existe un grand nombre de critères calculables pour les simulations et mesurables in situ, plus au moins bien corrélés avec les critères subjectifs. Les plus couramment utilisés pour l'évaluation objective du message parlé seront définis.

### **1.5.1. Les approches physiques pour la caractérisation des salles**

Pour caractériser la qualité acoustique d'une salle, et offrir à l'auditeur des conditions d'écoute optimale, l'acoustique définit des critères accessibles à la mesure, les acousticiens utilisent des descripteurs caractérisant le champ sonore. Ces critères doivent respecter des valeurs limites

pour être en accord avec le degré de satisfaction de l'utilisateur. Avant d'introduire la description de ces critères, il est nécessaire d'exposer brièvement les approches liées à la propagation de l'onde acoustique dans un espace clos, en relevant **les implications de ces phénomènes physiques sur les attributs de l'espace architectural.**

La propagation acoustique est définie par l'équation des ondes. Celle-ci vise à exprimer de façon mathématique le comportement d'une onde dans son déplacement en fonction du temps, de la vitesse du son et de la pression. Ce modèle simple, concerne la propagation en champ libre, c'est-à-dire sans obstacle. Dans notre étude traitant de l'espace de la mosquée, les hypothèses de la propagation, concernent les espaces clos qui sont soumis à des conditions différentes.

La propagation de l'onde sonore dans un espace clos, va rencontrer des obstacles de différentes natures changeant ainsi le comportement de l'onde en termes de fréquence et de puissance. Les phénomènes physiques naissants de ces comportements ont été décrits dans le chapitre précédent<sup>2</sup>, on peut néanmoins les résumer dans trois types :

- Les réflexions simples et spéculaires
- La transmission
- La diffraction.

Pour caractériser l'acoustique d'un lieu d'écoute, des théories ont été élaborées afin d'étudier la propagation de l'énergie émise par une source sonore, dans un espace clos, jusqu'au récepteur. La théorie qui détermine la nature du champ sonore au point d'écoute, et qu'on utilise actuellement en acoustique des salles est définie selon trois approches complémentaires : La théorie ondulatoire ou modale, la théorie de l'acoustique géométrique, la théorie de l'acoustique statistique.

**La théorie ondulatoire** repose sur l'idée que le son est un phénomène ondulatoire. Cette théorie, très ancienne a été suggérée pour la première fois par l'architecte romain Marcus Vitruvius Pollio, plus connu sous le nom de Vitruve. Préoccupé par l'architecture des amphithéâtres, où il est essentiel de contrôler l'écho, il comparait le son à des vagues d'eau qui se déplacent dans l'espace. Beaucoup plus tard au XVII<sup>e</sup> siècle Lord Rayleigh vers 1880 fonde sa théorie sur le phénomène ondulatoire de l'onde sonore, en y associant la périodicité et le déphasage des signaux acoustiques dans le temps et dans l'espace.

---

<sup>2</sup> Voir sous-chapitre 1.3.3.

**La théorie de l'acoustique géométrique** connue depuis l'Antiquité grecque, elle étudie la propagation des ondes sonores issues d'une source en assimilant les rayons sonore à des rayons lumineux auxquels on applique les lois de l'optique géométrique.<sup>3</sup> « L'approche géométrique est une technique de plus en plus utilisée car elle suit l'évolution des puissances de calcul des unités informatiques » (Berjon, M., 2007) cette approche utilise plusieurs techniques pour le calcul de l'évolution des rayons sonores au cours du temps :

- Méthode par sources images
- Méthode des rayons
- Méthode des cônes

Le calcul des critères acoustiques par le logiciel EASE, utilisé dans le cadre de ce travail, se base sur les méthodes de la théorie géométrique. la méthode des sources images, est décrite comme une technique qui considère qu'une source sonore placée devant une paroi réfléchissante, correspond à une source virtuelle par rapport à la surface de réflexion.

**La théorie de l'acoustique statistique**, dont les principes ont été donnés par W.C.Sabine, repose sur la notion de libre parcours moyen de l'énergie sonore dans une salle, cette énergie sonore va en décroissance jusqu'à son extinction. Cette approche est née du besoin de caractériser aisément une salle avec des outils simples. Une des hypothèses importantes en acoustique statistiques est de considérer que l'on est en champ diffus, c'est-à-dire que l'on est en présence d'un ensemble de réflexions provenant de toutes les directions. Cette loi utilise très largement la notion de coefficient d'absorption des matériaux.

### **1.5.2. Réponse impulsionnelle et critères objectifs**

Les grandeurs physiques utilisées dans la caractérisation acoustique de l'espace architectural fermé, sont appelés « critères objectifs ». Ces critères « sont en fait des indices qui peuvent être issues dans leur grande majorité de la réponse impulsionnelle » (Nathanail, C. ,1999). La réponse impulsionnelle correspond à la signature acoustique de la salle. Elle décrit toute la transformation apportée au signal sonore (sous forme d'une impulsion Dirac) par la salle, entre un point d'émission et un point de réception. En théorie la réponse impulsionnelle contient la totalité des informations permettant de caractériser acoustiquement une salle.

---

<sup>3</sup> Voir planche 1.4 du sous-chapitre 1.3.2.

Les progrès dans le domaine informatique, ont permis de développer des programmes, soit de mesure, soit de simulation, qui permettent de mesurer in situ ou de prédire sur plans cette réponse impulsionnelle. La lecture de la réponse impulsionnelle nous donne un certain nombre d'information, notamment la distribution temporelle des réflexions ainsi que leurs amplitudes (Planche 1.7). Un grand nombre de paramètres liés à l'espace architectural et au couple source/récepteur, dont dépend la qualité acoustique de l'espace est donnés par la réponse impulsionnelle. On citera en l'occurrence la forme, la géométrie et le volume de la salle, la nature de parois, murs, plafond, sol et autres aménagements de la salle. Ainsi que la position et le type, de la source et du récepteur.



Echogramme d'une réponse impulsionnelle, composée de trois parties distinctes, à savoir :

- Le son direct
- Les premières réflexions
- Le champ diffus.

Le tableau ci- dessous montre un découpage temporel de la réponse impulsionnelle des 160 premières millisecondes.

Code	Plage temporelle	Nom
FOD	0 - 5 ms	Onde directe
OD	0 - 20 ms	Onde directe étendue
R1	20 – 40 ms	Premières réflexions
R2	40 – 80 ms	Réflexions tardives
R3	80 – 160 ms	Réverbération précoce
R4	160 ms -	Réverbération tardive

Planche 1.7 : Echogramme et découpage temporelle de la réponse impulsionnelle. Cruz Barney,F. 1999

### 1.5.3. Décryptage de la réponse impulsionnelle.

Une première lecture de l'échogramme de la réponse impulsionnelle, permet de le découper en trois parties distinctes qui sont :

**Le son direct** : il représente le trajet le plus court de la source au récepteur sans aucune réflexion. Le son direct ne dépend que des caractéristiques de la source et de la distance source-point de réception. **Les caractéristiques architecturales de l'espace n'ont aucune influence sur le son direct.**

**Les premières réflexions** : ou réflexions précoces qui se caractérisent par une distribution dans l'espace et dans le temps **et subissent l'influence des propriétés géométriques et architecturales de l'espace, en plus des caractéristiques de la source et du récepteur.**

**Le champ diffus** : il représente la dernière partie de la réponse impulsionnelle ; après un temps proportionnel à la racine carré du volume de l'espace, il se forme une multitude de réflexions provenant de toutes les surfaces de l'espace. Il y a alors établissement d'un champ réverbéré, cette partie du champ sonore est surtout dépendante des caractéristiques de l'architecture de l'espace, et donc peu dépendante des propriétés de la source et du récepteur.

Les diverses études sur la caractérisation objective, en liaison avec la perception menées par des laboratoires de recherche et notamment l'IRCAM<sup>4</sup>, ont permis de cerner le rôle particulier de chacune des sections temporelles de la réponse impulsionnelle d'une salle en quatre parties à savoir : le son direct, les premières réflexions, les réflexions tardives et la queue de réverbération. Le tableau de la planche 1.7, définit le découpage de la distribution temporelle de l'énergie sonore sous forme de blocs.

Chaque partie de la réponse impulsionnelle, sert à définir les différentes parties qui composent le champ acoustique d'une salle, but étant de faire correspondre à chaque phase temporelle le ou les critères objectifs (pertinents pour notre étude) qui la caractérise. Il existe un grand nombre de critères objectifs, décrivant les aspects les plus significatifs de la perception, accessibles à partir du modèle décrit au tableau ci-dessus ; et définis dans l'ISO 3382. Il faut noter que parmi ces critères on distingue ceux, qui concernent spécifiquement la parole de ceux qui se rapportent

---

<sup>4</sup> Institut de Recherche et Coordination Acoustique et Musique.



plutôt à la musique. Pour le cas de notre travail on ne citera que les critères que l'on va évaluer dans les mosquées, se rapportant à la parole. Suivant le phénomène physique qu'ils permettent d'analyser (temporelle, spatiale ou fréquentielle) les critères objectifs peuvent être classés de la manière suivante.

#### **1.5.4. Critères liés à la courbe de décroissance temporelle du niveau sonore**

Il s'agit de la durée de réverbération mesurée avec une décroissance du niveau de pression de 60dB. Cette mesure s'effectue sur plusieurs phases de décroissance du niveau de pression du son. Le  $T_{R60}$  correspond à une décroissance de 0dB à -60dB, à l'intérieur de cette plage on peut mesurer également la durée qui correspond à l'extinction du son entre 0 et -15 dB appelée le  $T_{R15}$ , et entre 0 et -20 dB appelé le  $T_{R20}$ . Enfin le temps de décroissance rapide (Early Decay Time) noté EDT, est mesuré entre le point 0 et -10 dB.

### **1. Calcul du temps de réverbération $T_r$**

La réverbération est un phénomène qui se traduit par une persistance plus ou moins prolongée de son dans les salles, après interruption de la source sonore. Les ondes sonores parviennent au point d'écoute par de multiples chemins, après de nombreuses réflexions sur les parois ; ce phénomène est principalement lié au pouvoir réfléchissant des parois de la salle. Il est important de noter la rapidité de ces phénomènes, à la vitesse de 330 m/s, dans un local dont les dimensions sont de l'ordre de 10 m, Une trentaine de réflexions ont lieu en une seconde.

Il est clair que ce phénomène est lié au pouvoir réfléchissant des parois de la salle, dans le cas où celles-ci sont très réfléchissantes, donc constituées de matériaux lisses, durs et rigides comme le béton, ou la pierre. Dans ce cas, le son réfléchi, possède une intensité presque aussi grande que le son incident, l'onde sonore peut ainsi parcourir un très long chemin brisé par de nombreuses réflexions. Le son ne décroît que lentement en intensité, la réverbération est importante. La durée de réverbération est donc liée à la fois à la capacité d'absorption de l'espace et à son volume. La durée de réverbération est courte si l'absorption est importante, et elle est longue si le volume de l'espace est important et peu absorbant.

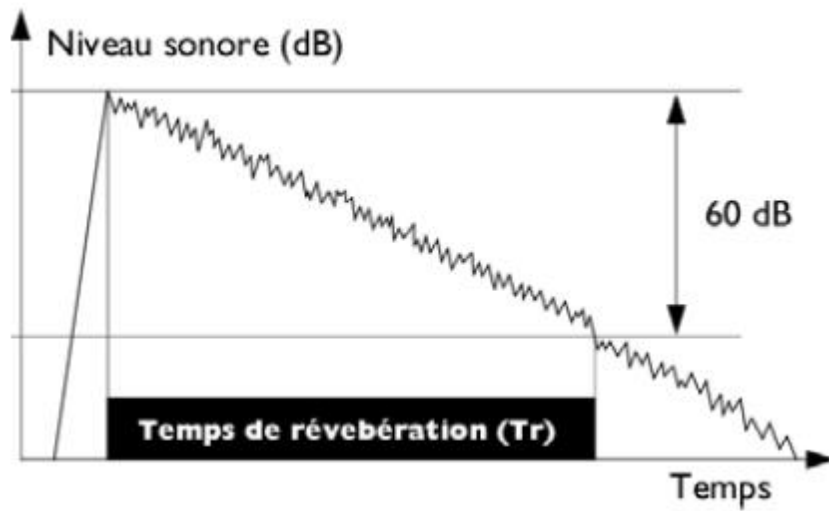
Le temps de réverbération est noté  $T_r$  en français et RT60 en anglais. Le  $T_r$  est défini comme étant le temps en seconde mis par le signal sonore pour décroître de 60 dB, c'est-à-dire que l'énergie sonore atteindra une valeur 1000 fois plus faible. Les valeurs de  $T_r$  habituellement constatés vont de quelques 1/10èmes à quelques secondes (Planche 1.8).

De nombreuses formules ont été établies pour les valeurs de  $T_r$ , associant les caractéristiques géométriques de la salle, ainsi que les coefficients d'absorption des matériaux qui composent les parois et le mobilier. La formule la plus ancienne et aussi la plus simple, donc largement utilisée, c'est la célèbre formule de Sabine. Le professeur Sabine.W.C., est le premier à avoir mis en évidence l'importance de la nature des matériaux qui composent l'intérieur du volume, lors de ses expériences sur l'amphithéâtre de Fogg Art Museum. La formule de Sabine pour le calcul de la durée de réverbération est la suivante :  $T_r = 0.16 \frac{V}{A}$ . Dans cette formule  $V$  représente le volume de la salle,  $A = (\text{somme } \alpha_i \times S_i)$ , avec  $\alpha_i$  les coefficients d'absorption des matériaux et  $S_i$  la surface correspondante aux  $\alpha_i$ .

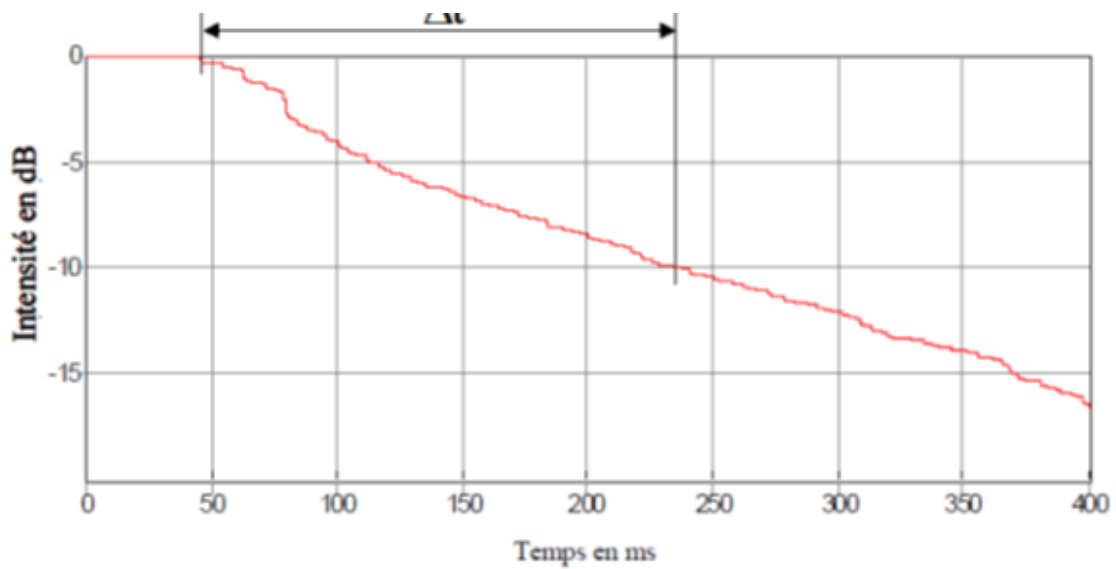
La formule qu'il a proposée, explicite la relation entre la décroissance temporelle de l'énergie sonore (durée de réverbération  $T_r$ ), le volume de la salle et l'aire d'absorption équivalente  $A$  en mètres carrés contenus dans le local. Il n'existe pas une durée de réverbération optimale, il est cependant possible de préconiser des durées de réverbérations en fonction de la destination des locaux et de leur volume, donné par des abaques. (Hamayon ,L., 2013) On peut également utiliser des formules caractérisant le temps de réverbération comme celle de Knudsen qui recommande un  $T_r$  optimal pour la parole donné par.  $T_{r\text{optimal}} = 0,32 + 0,17 \log V$ ,  $V$  étant le volume de l'espace en  $m^3$ .

### **1. Le temps de décroissance rapide (EDT)**

On distingue deux types de réverbérations liées au facteur perceptif qui est « la réverbérance ». La réverbération continue et la réverbération finale, la première correspond à la réverbération du son que l'auditeur perçoit pendant le message parlé ; par contre la seconde représente la réverbération qu'il perçoit à la fin du discours. La réverbération finale est directement liée au critère déjà défini qui est le  $T_{r60}$ , alors que la réverbération continue est davantage liée au critère objectif de décroissance rapide (EDT) et mesuré sur les premières 10 ou 15 dB de décroissance (EDT10, EDT 15) (planche 1.8).



Le temps de réverbération représente la décroissance du signal sonore de 60 dB.



L'EDT (Early Decay Time) représente la décroissance du signal sonore de 10dB

Planche 1.8 : graphes représentant la décroissance du signal sonore pour le temps de réverbération et l'EDT. (Kuznik,F. et al 2009.)

### **1.5.5. Critères liés à la répartition de l'énergie sonore dans l'espace**

Les critères liés à la répartition de l'énergie sonore dans l'espace font référence à l'intelligibilité de la parole. Elle est quantifiée à partir de la comparaison des énergies précoces et tardives de la réponse impulsionnelle. Ils caractérisent la définition du son mesuré à partir du rapport entre, le son direct augmenté des premières réflexions ou énergie utile ; et le champ réverbéré considéré comme énergie nuisible. Dans le cas de la transmission de la parole on retrouve l'intelligibilité caractérisée par l'indice de transmission, de la parole (Speech Transmission Index) ou STI, également le RASTI (Rapid Speech Transmission Indice) et enfin la clarté notée C50.

L'intelligibilité de la parole peut être affectée par plusieurs facteurs, par exemple, le niveau sonore du signal de la parole en lui-même, la direction de son, le niveau de bruit de fond, le temps de réverbération de la salle et la configuration de la salle elle-même. Du fait que le temps de réverbération est étroitement liée à l'intelligibilité de la parole, la quantité, la qualité et le positionnement des surfaces absorbantes ont une influence importante sur l'intelligibilité de la parole.

#### **1. Critère du STI et RASTI.**

La qualité recherchée dans une salle d'écoute est principalement l'intelligibilité de la parole, c'est-à-dire la bonne compréhension des messages sonores. Les messages sonores ou la parole consiste essentiellement en une émission de voyelles reliées par des consonnes. Une personne qui parle émet des sons, consonne et voyelles, dont les fréquences couvrent sensiblement le domaine des fréquences audibles, ces fréquences ne sont pas tous utiles à la compréhension de la parole. Ce sont les fréquences comprises en 200 et 6000Hz qui sont essentielles.

Le niveau d'intelligibilité est exprimé à travers un indice appelé : un indice d'intelligibilité de la parole STI. Cet indice spécifie l'intelligibilité de la parole sur une échelle de zéro à un, la procédure de mesure simplifiée et plus rapide de l'intelligibilité de la parole est l'indice Rapid Speech Intelligibility Transmission Index (RASTI).

Le degré d'intelligibilité de la parole dépend de la différence de niveau entre le signal acoustique et le bruit de fond à chaque fréquence de la gamme 200Hz- 6000Hz. Si le signal sonore dans une certaine bande de fréquences est de niveau inférieur au bruit de fond, l'intelligibilité de la parole diminue. Pour mesurer l'intelligibilité de la parole on déduit la moyenne des valeurs en décibels des rapports signal/ bruit sur les bandes de fréquences allant de 125 à 8000 Hz pour le

STI, ou sur 500 à 2000Hz pour le RASTI. Ce rapport est donc une différence entre le niveau sonore des messages délivrés dans la salle et le niveau sonore du bruit de fond. Lorsque cette différence est supérieure à 15 dB, le rapport est considéré comme excellent.

En outre l'onde sonore qui parcourt la distance de la source (l'orateur) jusqu'à l'oreille de l'auditeur, **aura une puissance insuffisante à partir d'une distance de 9 m**, en présence de niveaux habituels de bruit de fond. Au-delà de cette distance, l'énergie acoustique émise par la source doit être redistribuée grâce à l'enveloppe de la salle et aux dispositifs d'amplification du son.

### **1. Critère de la clarté du son ou C50.**

Elle s'évalue par une comparaison des énergies précoces et tardives de la réponse impulsionnelle, en fixant la limite temporelle à 50ms. C'est-à-dire qu'elle est définie comme le rapport de l'énergie des 50 premières millisecondes après l'arrivée du son direct sur l'énergie totale. La clarté vise à évaluer la précision d'écoute d'un instrument ou d'une parole.

#### **1.6. Conclusion du chapitre 1.**

Ce chapitre a présenté tous les principes et les théories scientifiques qui définissent les phénomènes et les indices propre à la caractérisation objective de l'espace architectural. En apportant des précisions sur les relations qui existent entre la perception sensible du son et sa quantification mesurée ; ceci guidera notre démarche pour fonder les bases de notre questionnaire destiné aux fidèles des mosquées.

En outre ,l'exposé relatif aux propriétés des critères acoustiques pour la caractérisation objective de la qualité acoustique des espaces architecturaux, a permis de fournir , un grand nombre d'indications sur les relations qu'entretiennent les composants de l'espace architectural et architectonique avec l'évaluation des critères objectifs pour la qualification acoustique de l'espace.

## **Chapitre 2 : L'architecture des mosquées et composante acoustique**

### **2.1 Introduction.**

Dans ce chapitre, les principaux aspects de l'architecture des mosquées depuis la première mosquée de Médine à nos jours, seront exposés. L'intérêt est de définir les composants architecturaux liés aux fonctions du culte musulman en rapport avec la pratique de la prière. Un bref envol historique, permettra de retracer l'évolution de l'architecture de la mosquée à travers le temps ; avec un exposé des caractéristiques architecturales propres aux mosquées contemporaines, et une présentation plus détaillée des spécificités qui distinguent l'architecture des mosquées en Algérie, suivi d'une présentation des mosquées choisies pour l'étude expérimentale. L'ensemble des résultats de cet exposé, permettra de dégager les synergies qui existent entre les attributs de l'espace de la mosquée et la composante sonore ; on procédera alors à un exposé détaillé des corrélations entre la qualité sonore et les caractéristiques architecturales des mosquées. En guise de synthèse, l'étude de l'état de l'art, permettra d'établir un ensemble de valeurs optimales des critères acoustique spécifique à l'édifice de la mosquée.

### **2.2 Aperçue historique sur l'architecture de la mosquée**

La mosquée est considérée par la communauté des musulmans, comme l'édifice religieux par excellence. En plus de sa fonction cultuelle liée à la pratique des différentes prières, la mosquée jouit également d'un rôle social et culturelle. La toute première mosquée construite dans l'Islam, était la Mosquée Qouba construite en 622 après JC, après le voyage du prophète de la Mecque à Médine où il a campé avec ses compagnons dans l'actuelle place de la mosquée avant son entrée à Médine (Orfali, W. 2000). La mosquée Qouba est située à 5km au sud-est de la ville de Médine, en Arabie Saoudite. La mosquée était de forme rectangulaire construite en briques de terre et recouverte d'un toit soutenu par des troncs de palmiers. Ses dimensions étaient de 26m de longueur, 30m de largeur et une hauteur de 4m. Sur le côté nord de la cour, Un portique appelé (zullah) perpendiculaire au mur de la qibla a été construit de troncs de palmiers et les branches et étendues à quelques mètres dans la cour. En outre, un toit en appentis moins élevé que le zullah, appelé (suffah) a été construit pour protéger les visiteurs qui y passent la nuit, du soleil chaud. Au sud- est de la mosquée, on a construit la maison du prophète,

composée de deux chambres avec un accès donnant directement sur la cour de la mosquée. En plus de sa fonction comme lieu de prière, la partie couverte de la cour ( zullah) servait comme espace de réunion pour des pourparlers communautaires et les débats politiques. En 624 après JC la zullah et la suffa changèrent de place lorsque la qibla a été réorientée vers Al-Qaba à La Mecque. La planche 2.1 illustre l'ancienne configuration structurelle de la mosquée du prophète à Médine. Les composants qui constituent l'espace de la mosquée, sont intimement liés à la prière et aux gestes de la prière. Il semble donc important de comprendre la prière pour comprendre l'espace de la mosquée. La prière est le deuxième pilier de l'islam, juste après la profession de foi. La journée du musulman, est ponctuée par cinq prières. Le vendredi la prière est communautaire et s'effectue à la mosquée. Tournés vers la Mecque, les musulmans s'alignent en rang, épaule contre épaule, face au mur de la qibla. Ainsi l'alignement du corps avec la qibla et la limitation du regard au niveau de la ligne d'horizon, sont concrétisés, rendus physiques, par le mur de la qibla. La mosquée s'est ainsi construite à partir du **mur de la qibla**, ce mur constitue un composant spatial que l'on retrouve dans toutes les typologies de mosquées à travers le monde (Folmer,L., 2013).

En plus d'y effectuer les différentes prières, la mosquée est un lieu où les musulmans se rassemblent pour écouter les prêches ou (ghotba) du prophète en diverses occasions. Dans le but de bien faire entendre sa voix, on confectionna une petite estrade en bois avec trois marches appelée (Minbar) sur lequel se tenait le prophète, et ses compagnons après lui durant les prêches. Le premier Minbar avait une hauteur et une longueur de 1m et 50 cm de large (محمود حسن 1999). Le mur de la qibla (direction de la Mecque), constitue le deuxième élément important dans l'architecture des mosquées, à l'origine le prophète a désigné la direction de la qibla en plantant une lance près du mur de la qibla ; par la suite le Mihrab s'est développé en prenant une forme de demi-cercle en plan surmonté d'un arc inséré dans le mur de la qibla sous forme d'alcôve. Le Mihrab signifie littéralement « niche pour prier ».

Le Minbar et le Mihrab se trouvent toujours sur le mur de la Qibla, qui signifie littéralement «face au mur". Il indique la direction de la Mecque c'est la partie la plus décorée dans la mosquée, constituant ainsi le troisième élément significatif de la mosquée. (Planche 2.1)

On peut conclure, que la première mosquée du prophète comportait cinq composants principaux qu'on retrouve dans toutes les mosquées à travers les différentes époques et jusqu'à nos jours et qui sont : l'espace de prières couvert, la cour, le mur de la qibla le mihrab et le minbar. Au fur et à mesure que l'islam s'étendait vers de nouvelles contrées, les mosquées ont intégré de

plus en plus d'éléments issus de l'architecture de ces peuples. Chaque région a ainsi connu une architecture de mosquée qui lui est propre. En plus des cinq éléments déjà cités, l'architecture des mosquées se caractérise par la coupole, le minaret, l'espace des ablutions et la mezzanine.

### **2.2.a La mosquée de quartier ou des cinq prières**

Ces mosquées sont conçues en fonction du nombre des habitants d'un quartier, on lui attribue un Imam et un Muézine. On peut également y effectuer la prière du vendredi, en plus des activités culturelles et sociales. C'est le troisième calife de l'islam « Omar ibn el khattab » qui a institué ce type de mosquée, à travers les différentes villes comme El-Basra et El-koufa en Irak et le Caire en Egypte. Il demanda aux gouverneurs de ces villes de construire des mosquées de quartier pour les cinq prières et une grande mosquée pour toute la ville, où les habitants se rassemblent pour la prière du vendredi. ( محمد عبد الستار عثمان 2000 )

### **2.2.b La grande mosquée du vendredi**

Ces mosquées constituent dans la ville musulmane, un édifice remarquable et dominant par sa taille et sa fonction. En plus de son rôle religieux, il était le lieu des débats politiques et le centre des échanges culturels et sociaux ( محمد عبد الستار عثمان 2000 ). Ainsi chaque ville comportait une seule grande mosquée en son centre annexée à des galeries commerçantes. On pouvait dénombrer plusieurs grandes mosquées avec le développement des villes. ( نوبي محمد حسن 2002 )



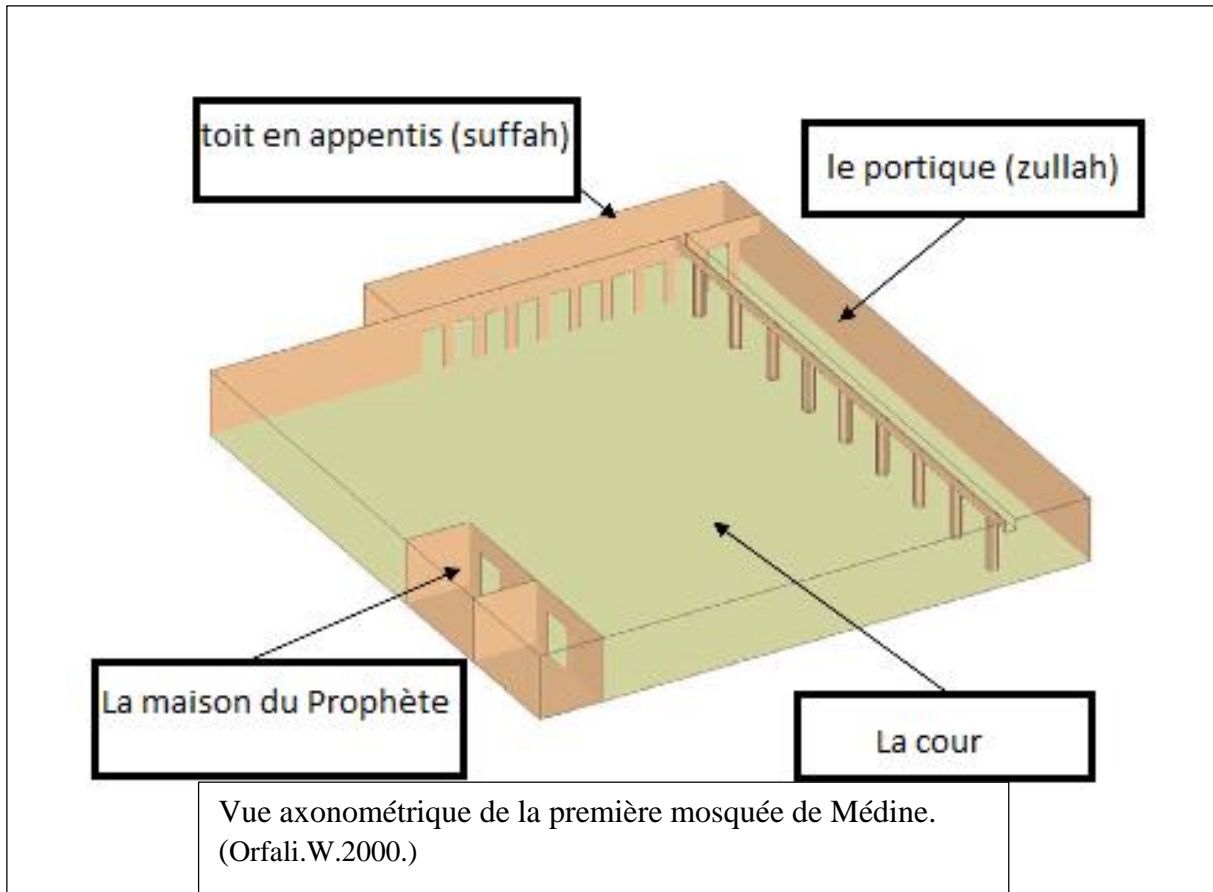


Photo illustrant le mur de la qibla avec le Mihrab à gauche et le Minbar à droite.  
(auteur)

Planche 2.1 : Illustration de la première mosquée de Médine. Détail du mur de la qibla d'une mosquée.

### 2.3 Classification des mosquées.

Même si les éléments que l'on vient de citer et qui caractérisent l'espace de la mosquée, sont apparus dès la première mosquée construite par le prophète et se sont perpétuées jusqu'à nos jours ; les mosquées possèdent différentes typologies liées à leur taille et leur style architectural, elles peuvent être de simples masdjid servant à la prière quotidienne, mais aussi des grandes mosquées, où les fidèles se rassemblent pour la prière du vendredi.

« L'évolution du style architectural de la mosquée s'apparente plus à la diversité des différentes régions géographiques qu'aux différents âges de l'islam » (Folmer, L., 2013). Néanmoins l'évolution du style de la mosquée est également liée à un ordre chronologique ; nous allons donc fonder la classification des mosquées en nous basant sur ce double critère, géographique et chronologique.

#### 2.3.a. Les mosquées traditionnelles.

Les mosquées traditionnelles sont classées en fonction de leur forme architecturale et leur style en quatre catégories. **La mosquée à hypostyle** bâtie sur le modèle de la première mosquée à Médine. Avec une cour entourée de galeries dont la plus grande est la galerie de la qibla, avec plusieurs accès excepté sur le mur de la qibla. La mosquée Ibn-touloune au Caire illustre ce type. **La mosquée avec transept central** se caractérise par une galerie haute et large, perpendiculaire au mur de la qibla. Cette galerie sera couverte par une charpente en bois et couronnée d'une coupole en son centre ou sur le mur de la qibla. Ses angles comportent en général quatre minarets. La mosquée el-hakim au Caire de l'époque omeyyade, illustrent ce type.

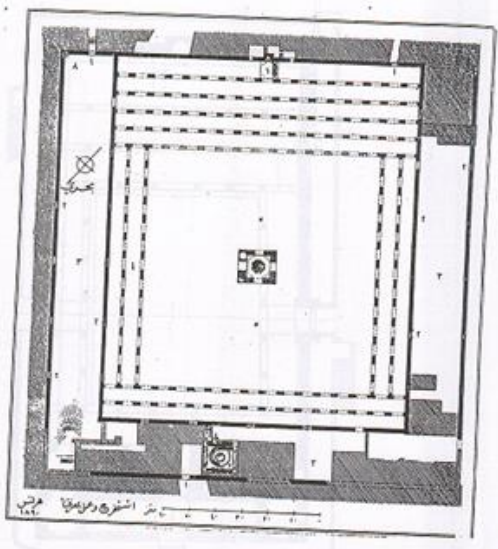
**La mosquée avec iwans** très répandue en Iran **constitue le troisième type**, composé d'une cour centrale carrée ou rectangulaire, entourée par deux, trois ou quatre iwans, le plus grand étant celui de la qibla. Une coupole ou demi-coupole surplombe l'espace de l'iwan. L'accès donnait sur la cour, aménagée d'un bassin central avec une fontaine pour les ablutions. Ce type de mosquées était très répandu en Iran et Samarkand puis a été introduit en Egypte avec la dynastie ayyoubide. (Planche 2.2)

**Le quatrième type** de mosquées, très répandu en Turquie, est caractérisé par un espace de prières avec coupole centrale amplifiée par des coupoles adjacentes, selon une conception rigoureusement géométrique. Ce type de mosquée reste très proche de l'organisation spatiale de la première mosquée à hypostyle, puisque l'accès se fait toujours par la cour entourée de

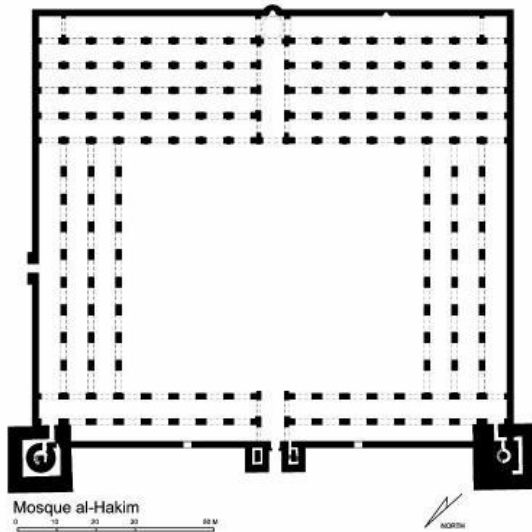
galerie à une seule travée et recouverte de petites coupoles. L'espace de prière est couvert d'une immense coupole cantonnée de demi-coupoles. On trouve également en plus de la coupole centrale des coupoles souvent plus petites dans tout le reste de la mosquée, même où la prière n'est pas effectuée. Ses minarets sont très élancés couronnés d'une forme conique. Souvent, les mosquées de type ottoman font partie de grands complexes.

### **2.3.b. Les mosquées contemporaines**

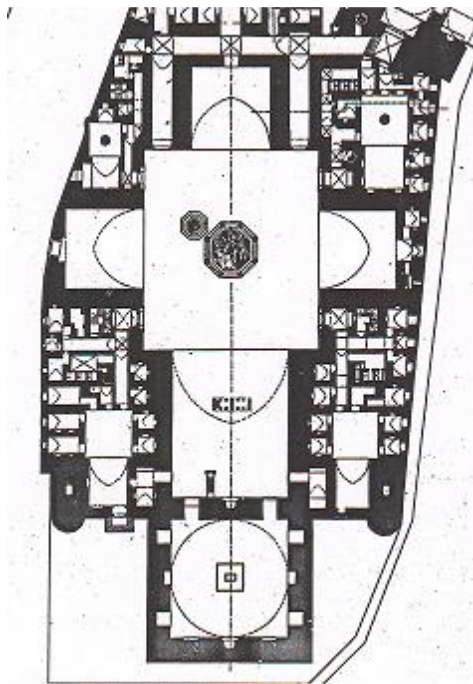
Les cinq éléments qui caractérisent les mosquées traditionnelles sont toujours présents dans les mosquées contemporaines, en plus d'un espace supplémentaire dédié à la prière des femmes qui est généralement la mezzanine à l'étage. La taille de la mosquée est toujours un critère de référence dans la classification des mosquées. Ainsi de par leur grandeur on distingue quatre types de mosquées contemporaines. **Les mosquées repères qui structurent le paysage urbain**, ces mosquées sont construites à l'initiative d'un prince ou d'un roi, leur architecture et leur emplacement domine le paysage urbain et en fait un point de repère, ces mosquées peuvent recevoir jusqu'à 3000 fidèles ; on citera l'exemple de la mosquée Hassan II au Maroc ou la grande mosquée du Qatar. Le deuxième type est **les grandes mosquées nationales** à l'échelle d'une grande ville toujours conçue à l'initiative d'une grande figure du pays, un président ou un gouverneur. Elles sont le symbole d'un engagement vis-à-vis de l'islam, et sont considérées comme des monuments publics, elles peuvent accueillir entre 1500 à 3000 fidèles. Les mosquées locales constituent le troisième type, elles sont réparties dans les différentes zones urbaines ou rurales ; 300 à 1000 fidèles peuvent y faire la prière du vendredi ainsi que les prières journalières **les petites mosquées locales**, ou mosquées de quartier, forment le dernier type, d'une surface très modeste pouvant contenir 300 fidèles, ce type est également répandu dans les zones rurales.



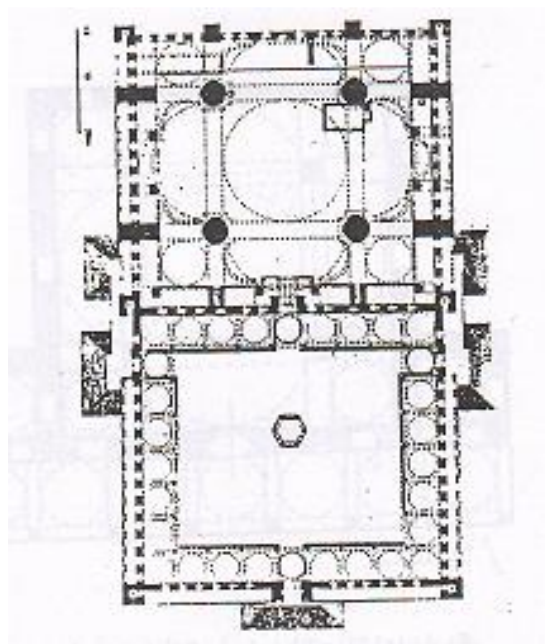
La mosquée Ibn-touloune au Caire, à hypostyle.



La mosquée El-hakim au Caire , à transept central.



La mosquée du Sultan Hassan avec iwans



La mosquée du Sultan Ahmed premier à Istanbul du type quatre

Planche 2.2 : Représentation en plan des quatre typologies de mosquées traditionnelles.

(محمد حمزة إسماعيل الحداد 2004)

## 2.4 Différentes approches architecturale de la mosquée contemporaine.

La documentation relative à l'architecture de la mosquée disponible sur le site de la fondation Agha Khan, fait état de plusieurs approches relatives à la conception des mosquées ces dernières quarante années. Plusieurs auteurs ont établi une classification des différentes tendances liées à la conception des mosquées. Seragedin.I. (Serageldin, I., 1990) les regroupe en cinq approches conceptuelles :

L'approche vernaculaire ou populaire.

L'approche traditionnelle.

L'approche adaptative.

L'approche moderniste.

L'approche populiste.

Fethi Ihsan (Ihsan ,F., 1985), établi également une répartition des différents courants architecturaux assez proche de la précédente, ainsi l'approche traditionnelle est nommée conventionnelle ; l'approche adaptative est désignée en tant que néo-classique islamique et enfin l'approche populiste est appelée éclectique.

Ces approches tentent de caractériser les grandes mosquées construites à l'échelle d'une ville ou d'un pays, du fait qu'elles reflètent l'identité culturelle de tout un peuple. Ainsi l'approche vernaculaire représente une architecture locale utilisant un répertoire formel traditionnel. L'approche traditionnelle représente les mosquées utilisant tout le répertoire stylistiques classique, tout en employant des technologies nouvelles. La troisième approche adaptative dévoile une volonté de s'inscrire totalement dans un registre stylistique classique. La quatrième approche s'inscrit clairement dans des options modernes, tant au niveau du choix architectural et architectonique. (Planche 2.3) Enfin la dernière approche « populiste » opte vers des choix hétéroclites intégrés à la mosquée afin d'y rassembler une grande variété de styles classique musulmans.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Les photos des mosquées illustrant ces approches sont représentées dans la planche 2.3.



La mosquée Pusdai en Indonésie  
(approche traditionnelle)



La grande mosquée d'Islamabad  
(approche moderniste)



La grande mosquée Emir  
Abdelkader à Constantine (approche populiste)

Planche 2.3 : illustration des différentes approches conceptuelles de mosquées à travers le monde. (Auteur)

## **2.5 La construction des mosquées en Algérie.**

La mosquée est un édifice qui a accompagné l'implantation de l'islam en Afrique du nord. Comme de par l'ensemble du monde musulman, son architecture structure le paysage urbain des villes. Les mosquées traditionnelles en Algérie témoignent de la richesse et de l'éclat de l'art almoravides, almohade et ottoman, en l'occurrence les grandes mosquées d'Alger de Tlemcen et de Nedroma. Durant le période colonial, la France avait marqué sa domination politique et militaire à travers l'appropriation des mosquées ottomanes converties en églises. A l'indépendance du pays en 1962, l'un des premiers actes des dirigeants algériens consiste à récupérer les anciennes mosquées ottomanes transformées en églises. L'état français cède plus de quatre cents églises à l'état algérien. Les églises et les synagogues converties en mosquées sont placées sous l'égide du ministère des habous crée en 1962 et qui deviendra par la suite ministère des affaires religieuses.

D'un point de vue architectural, la conversion de ces édifices du culte en mosquées s'effectue par des modifications qui concernent la mise à niveau de la salle de prière, la suppression de l'autel de l'église ou la niche de la synagogue, la création d'un mihrab et d'un minbar, la séparation spatiale homme, femme et l'aménagement d'un espace ablution. Des transformations architecturales plus poussées concernent essentiellement, la construction d'un minaret et le réaménagement des arcs brisés en arcs en plein cintre. Ainsi les trois composants invariants à savoir le mihrab le minbar et le minaret, sont ajoutés à tous les édifices de culte transformés en mosquées.

### **2.5.1 Disposition administratives et fonctionnelles des mosquées.**

La conception de tout édifice architectural est assujettit aux différentes fonctions qu'il doit assurer pour les usagers. Les fonctions et autres aspects des mosquées en Algérie sont régis par le décret exécutif n° 13-377 du 9/11/2013 (qui a abrogé les dispositions du décret n° 91-81 du 23 mars 1991) portant statut de la mosquée. En plus des fonctions cultuelles qui consistent en les multiples prières et récitations du saint coran, la mosquée doit aussi assurer plusieurs autres fonctions. Une fonction éducative et pédagogique, d'enseignement religieux, civique, et d'alphabétisation. Une fonction culturelle par l'organisation des conférences la promotion des bibliothèques et la commémoration des fêtes religieuses et nationales. Une fonction d'orientation qui consiste à ordonner le bien et à proscrire le mal ; enfin la mosquée assure une fonction sociale qui consiste notamment à régler les différends entre les citoyens, au

développement du sens civique et de la solidarité sociale. En conséquence la mosquée est une institution religieuse et sociale qui assure une mission de service public. Elle a pour objectif de promouvoir les valeurs de la religion musulmane. (Art 2 du le décret exécutif n° 13-377 du 9/11/2013 )

Les articles du même décret, définissent le classement des mosquées en fonction de leurs capacités et des spécificités architecturales et historiques qui les caractérisent. Il classe en première position le « Jamaa El Djazair » sans détailler sa capacité ou fonction, en deuxième position, les mosquées historiques classées ou en voie de classement. Enfin les mosquées principales, nationales, locales et de quartier sont classées suivant leurs capacités leurs fonctions et leurs mode de gestion. Le tableau 1 ci-dessous résume ces spécificités.

La construction (étude et réalisation) de la grande majorité des mosquées, est prise en charge par les comités de mosquées ou par des personnes physiques désignant les bienfaiteurs ou « mouhsinines ». De ce fait, à l'exception des grandes mosquées à caractère national ou régional, l'édification des mosquées est confiée aux associations cultuelles ou aux personnes physiques. Cette disposition est régie par décret n° 13-377 du 9 novembre 2013 où il est stipulé dans l'article 22 que « les mosquées sont construite par l'Etat, par les comités de mosquées dûment enregistrés, par les personnes physiques ou morales autorisées par l'administration des affaires religieuses et des wakfs. »



Tableau 1 : Classement des mosquées conçus sur la base du statut de la mosquée défini dans le décret exécutif n° 13-377 du 9 novembre 2013. (Source : Direction des Affaires Religieuses et des Wakfs de la Wilaya de Constantine)

	<b>capacité</b>	<b>implantation</b>	<b>Fonctions d'accompagnement</b>	<b>Type de prières</b>	<b>Gestion et entretien</b>
Mosquée principale	Plus de 10.000 fidèles	Chef-lieu de wilaya	Ecole coranique, bibliothèque, salle de conférence, espace d'activités culturelle, logements de fonctions, espaces verts.	Toutes les prières	A la charge de l'état
Mosquée nationale	Plus de 1000 fidèles	Chef-lieu de wilaya	Ecole coranique, salle de conférence, espace d'activités culturelle, logements de fonctions, espaces verts.	Toutes les prières	A la charge de la wilaya
Mosquée locale	Moins de 1000 fidèles	Wilaya, daïra, commune	Des classes coraniques, logement de fonction	Toutes les prières	A la charge de la commune
Mosquée de quartier		commune	Sans espaces d'accompagnement	Seulement les cinq prières quotidiennes	A la charge de la commune

## **2.5.2 Références architecturales et architectoniques des mosquées.**

Les dispositions spécifiées par le décret déjà cité concernant l'architecture des mosquées, stipule que la construction des mosquées doit être inspirée du patrimoine architectural maghrébin ; et respecter la typologie des mosquées selon leur classement, tel que prévu par l'article 13 du même décret. Les aspects techniques de la mosquée, notamment le descriptif et le cout prévisionnel doivent être spécifiés dans une fiche technique.

Il est à préciser que l'article 26 du décret déjà cité stipule « un cahier des charges type relatif à la typologie de construction des mosquées selon leur classement est fixé par arrêté conjoint du ministre chargé des affaires religieuses et des wakfs, du ministre chargé de l'intérieur et des collectivités locales, et du ministre chargé de l'habitat et de l'urbanisme. » ce cahier des charges spécifique à la construction des mosquées en Algérie, n'a pas encore vu le jour.

En l'absence d'un cahier des charges, Les architectes qui conçoivent des mosquées utilisent de multiples références, liées notamment à une pratique personnelle ou inspirée de sources iconographiques. La tâche de l'architecte devient encore plus ardu, quand on sait que les associations ou les bienfaiteurs en charge de la construction de la mosquée, « sont souvent des profanes en matière d'architecture religieuse musulmane et imposent aux maitres d'œuvre des modèles de mosquées qu'il ont vus à la télévision via les chaines satellitaires ou lors de leurs voyages au Moyen-Orient. » (Senhadji ,K.,2011).

La construction des mosquées « doit être inspirée du patrimoine architectural maghrébin » préconisé dans l'article 25 du décret de 2013 déjà cité permet une multitude d'interprétations qui est matérialisées dans les différentes formes d'arcatures, le minaret et la coupole. Les mosquées comportent ainsi une variété d'éléments architecturaux hétéroclites, sans pouvoir conférer à la mosquée une composition harmonieuse. « La mosquée d'aujourd'hui présente des formes et des modèles qui relèvent plus de la fantaisie que de la tradition ou de la créativité» (Senhadji ,K.,2011).

Le questionnaire qu'on a adressé aux architectes qui ont conçus des mosquées, confirme cette constatation, la majorité des choix conceptuels font références à des stéréotypes esthétiques classiques. « L'architecture de la mosquée d'aujourd'hui, avec sa coupole et son minaret se soucie bien plus de l'ornementation et de la symbolique que de la recherche d'une certaine fonctionnalité » (Senhadji ,K.,2011).

Il est indéniable que beaucoup de travail reste à faire, pour conférer à nos mosquées toute la richesse, et l'éclat d'un style architectural inspiré de notre patrimoine, tout en étant créatif et harmonieux. Cette laborieuse entreprise doit débiter par l'ébauche d'un cahier des charges détaillé spécifique à la construction des mosquées, suivant le classement énoncé dans le décret de 2013. Sa formulation doit favoriser un travail de création basé sur des concepts architecturaux et urbains contemporains et soucieux des aspects fonctionnels, économiques et sociaux.

**Dans ce travail on ambitionne d'élaborer un ensemble de prescriptions architecturales spécifiques à la satisfaction de la qualité sonore dans les mosquées, ce modeste travail pourra constituer une première contribution à l'ébauche d'un cahier des charges spécifique à la construction des mosquées.**

## **2.6 Composante sonore de l'espace de la mosquée.**

### **Introduction.**

L'objectif de ce chapitre est d'établir les éléments permettant de comprendre et de caractériser les relations entre **les composants de l'espace** de la mosquée et **les phénomènes sonores**. La définition des phénomènes sonores a été traitée dans le chapitre précédent, l'objet du présent chapitre est de faire l'exposé de l'ensemble des éléments architecturaux propre à l'espace de la mosquée pouvant engendrer une qualité sonore. Cette présentation, débutera par une description précise des attributs fonctionnels propres à la pratique culturelle, et leurs implications sur les composants de l'espace ; en précisant les synergies qui s'établissent entre les composants de l'espace et les phénomènes sonores. En synthèse on fera une prospection des différents travaux de recherches relatives à l'étude de l'acoustique des mosquées, dans le but de définir les valeurs optimales des critères acoustiques, spécifiques à l'espace de la mosquée

### **2.6.1. Les pratiques culturelles et fonctions de la mosquée.**

La conception de la mosquée est influencée principalement par la nature de la fonction culturelle qui s'y déroule. La prière est l'une des pratiques les plus caractéristiques qu'effectue les fidèles à l'intérieure des mosquées. La prière est le premier pilier de l'islam qui en compte cinq. Les musulmans accomplissent cinq prières par jour ; pour ce faire les fidèles doivent se positionner face à la qibla (direction de la Mecque) et exécuter les différentes positions qui formeront une unité de la prière nommée « Rakaat ». Les cinq prières s'effectuent à des horaires précis de la journée, avec un nombre déterminés de Rakaat. Durant la prière le musulman récite quelques versets du saint coran, et au moment de changer d'une position à une autre, il dit un certain nombre de mots. Les prescriptions de l'islam encouragent les musulmans (en particulier les hommes) à exécuter leurs prières en groupes au sein de la mosquée. De ce fait la mosquée est considérée par le musulman comme un espace majeur qu'il visite cinq fois par jour pour y entreprendre les cinq prières en groupe. (Planche 2.4 fig. 1)

La prière exécutée en groupe est identique à la prière individuelle, sauf que les fidèles dans la mosquée sont alignés en plusieurs rangées derrière l'imam, qu'ils suivent exactement jusqu'à la fin de la prière. En plus de l'imam, une personne nommée le « Qai'im » (ou Moubal'legh pour les pays d'orient) répète après l'imam à haute voix les mots de l'imam indiquant les changements de position durant la prière. Le Qai'im ne doit en aucun cas répéter les versets du

saint coran que l'imam récite à voix haute pour certaines prières. Dans le cas d'une mosquée à l'acoustique désagréable, les fidèles durant les prières pourront suivre les mouvements de l'imam sans entendre les récitations des versets du saint coran. La prière du vendredi, jour de repos des musulmans, est exécutée en groupe après le prêche de l'imam d'une vingtaine de minutes. Durant la « Khotba » (sermon) les fidèles sont en position assise face à l'imam qui est positionné en haut du Minbar, afin que ses paroles puissent être entendues par l'ensemble des fidèles. (Planche 2.4 fig. 2)

Les caractéristiques ergonomiques découlant des pratiques que l'on vient de définir sont illustrées dans la figures 1, Ainsi l'espace séparant deux rangées de fidèles est d'environ 1,2 mètre. La surface au sol occupé par chaque fidèle est estimée à 0,8031 m<sup>2</sup>. (Planche 2.4 fig. 3)

Les mosquées sont donc des lieux de culte utilisés pour la prière, la prédication, les conférences, et les récitations coraniques. Les fidèles participent à ces activités selon deux modes ergonomiques toujours face à la qibla : debout alignés en rangées parallèles pour les différentes prières ; assis sur le tapis pour écouter le prêche du vendredi ou réciter le saint coran (planche 2.4 fig. 4).

Au terme de cet exposé, on peut conclure que la mosquée possède une fonction religieuse et sociale, elle constitue un lieu d'échange et de savoir, la transmission de ce savoir se fait à travers les prêches des imams sous forme de discours et la lecture du coran durant les prières. Les mosquées constituent donc des exemples d'établissements publics où il est nécessaire d'assurer un confort acoustique afin d'obtenir une bonne qualité d'usage. Il y a trois exigences acoustiques distinctes pour les mosquées (Karabiber, Z. G.,1999) :

- entendre les paroles de l'Imam.
- comprendre le sermon de l'imam,
- écouter ou participer à la récitation du Saint Coran.

Toutes les activités exercées dans les mosquées sont liées à l'audibilité et l'intelligibilité de la parole. Par conséquent, sa conception nécessite un examen attentif des paramètres acoustiques, pour atteindre les conditions d'une bonne écoute.

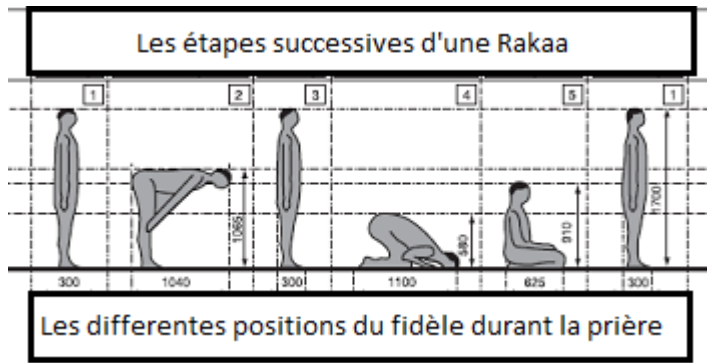


Figure 1

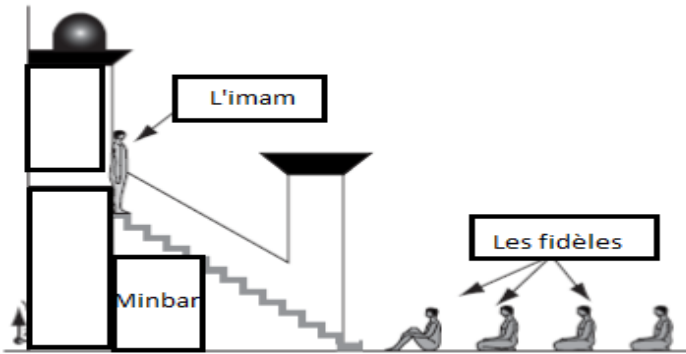


Figure 2

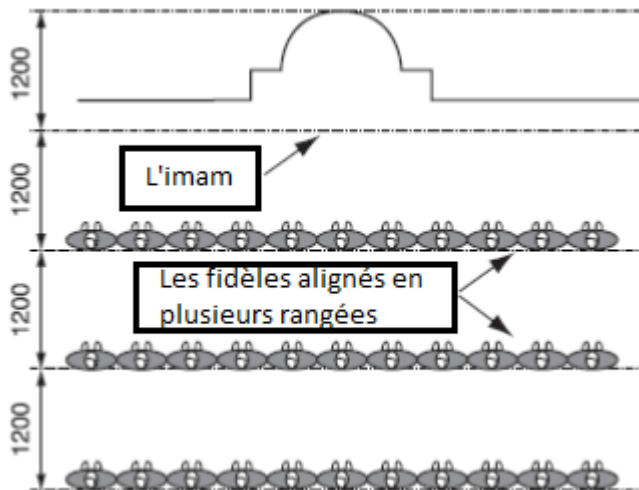


Figure 3

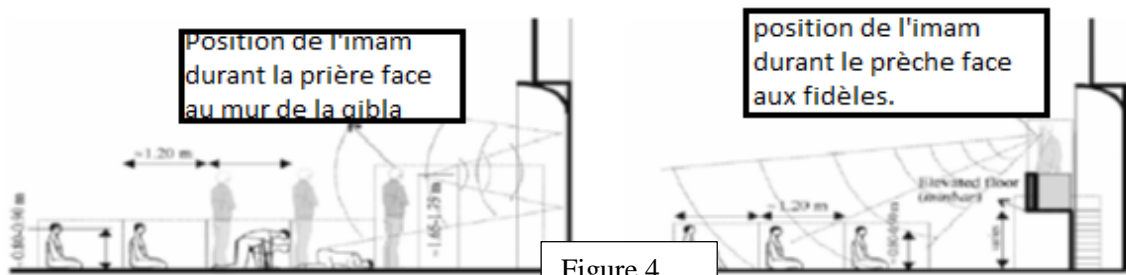


Figure 4

Planche 2.4 : Illustration des différentes pratiques culturelles à l'intérieur de la mosquée. (Abdou,A,A. 2003)

## 2.6.2 Acoustique des mosquées anciennes.

La majorité des recherches entreprises sur l'évaluation de la qualité acoustique des mosquées anciennes a été prise en charge par le projet de recherche CAHRISMA ( Conservation of the Acoustic Heritage by Revival and Identification of Sinan Mosque's Acoustic ). ce projet de recherche compte la majorité des études acoustiques sur les mosquées anciennes implantées en Turquie (Karabiber.Z.G.et al., 2003). Les investigations expérimentales menées dans le cadre de ce projet, ont effectué des études comparatives entre des mosquées anciennes du 16<sup>ème</sup> siècle, et des mosquées contemporaines du 20<sup>ème</sup> siècle, Les résultats des critères acoustiques des mosquées anciennes étaient plus proches des valeurs optimales comparativement aux mosquées contemporaines.

Une autre étude menée par Karabiber (Karabiber,Z.G.,1999) sur les problèmes acoustiques engendrés par les voutes et les coupoles des mosquées anciennes. Du fait que les formes concaves génèrent dans les espaces d'écoute des échos du fait des réflexions multiples. Les résultats ont conclu à une bonne qualité acoustique malgré la présence des formes concaves. L'auteur commente ces résultats, par la présence de vases acoustiques dans les coupoles, pour absorber les ondes sonores et réduire l'effet de l'écho.

Une étude détaillée sur l'utilisation des cavités acoustiques dans l'architecture ancienne, a été menée sur ces aménagements appelés vases acoustiques ou résonateur. Ces derniers existaient dans les théâtres grecs et romains ; le théâtre romain d'Antalya en Turquie, est célèbre pour son acoustique remarquable<sup>6</sup>. D'une capacité d'accueil de 15000 personnes, les spectateurs assis au dernier rang du théâtre, peuvent en effet entendre très distinctement les paroles d'un acteur sur la scène à une distance de plusieurs dizaines de mètres. Ces aménagements très répandus dans les théâtres romains, l'étaient également dans les églises et les mosquées anciennes (Planche 2.5). Les résultats de l'étude menée sur le résonateur d'Helmholtz a démontré qu'une conception appropriée des résonateurs, contribuait à éviter beaucoup de problèmes acoustiques. Ces vases placés à des endroits bien définis, fonctionnent de la même manière, non pas pour absorber tous les sons mais pour les sélectionner et rendre les sons plus clairs ( Kay'yl'y.M 2002).

---

<sup>6</sup> Voir la planche 1.3 au premier chapitre.

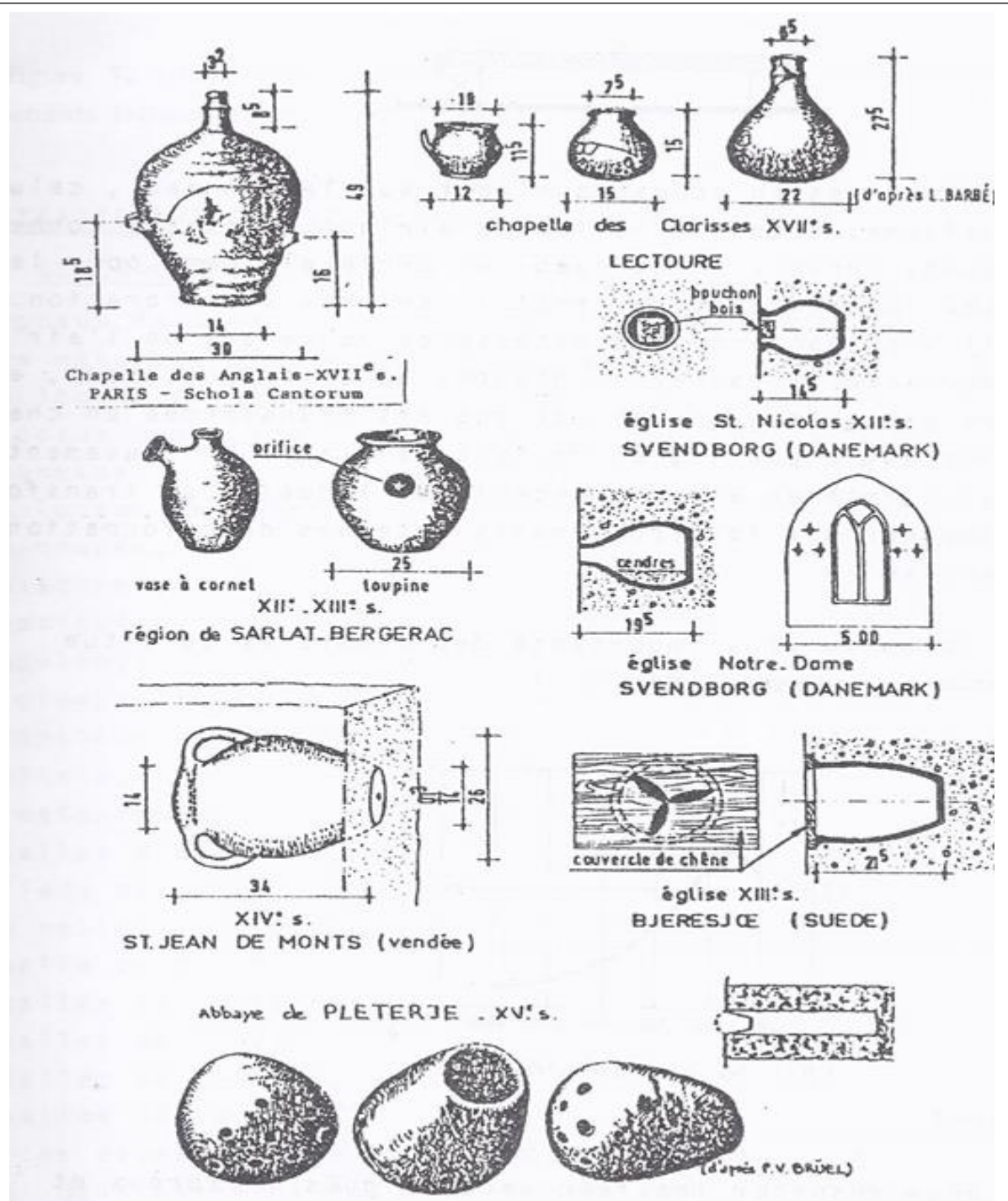


Planche 2.5 : différentes configurations de vases acoustiques incorporés dans les parois des églises. (Delétré, J.J. 2003)



### **2.6.3 Etat de l'art concernant l'acoustique des mosquées contemporaines.**

Plusieurs études sous forme d'articles ou de thèses ont été entreprises sur les mosquées contemporaines, dans le but de déterminer les conditions acoustiques idéales pour la conception des mosquées. Ces études et travaux de recherches, consacrés à la caractérisation acoustique des mosquées, ont utilisé des méthodes expérimentales, par la mesure et la simulation informatiques. L'exposé des résultats les plus pertinents de ces travaux, se fera de façon chronologique.

Une étude consacrée à l'évaluation de l'intelligibilité de la parole dans 30 mosquées de Amman en Jordanie, a conclu à la médiocrité des performances acoustiques de ces mosquées en raison de la négligence du traitement intérieur ainsi que le niveau élevé du bruit de fond en raison de la mauvaise isolation de l'enveloppe contre le bruit externe ( Hammad, R.N. 1990).

L'impact de la configuration géométrique de la mosquée sur sa qualité acoustique a fait l'objet d'une recherche qui a évalué par la simulation acoustique, cinq formes géométriques de mosquées. Les caractéristiques architecturales affectées aux différentes mosquées, ainsi que les coefficients d'absorption des différents matériaux étaient similaires, afin de mettre en évidence essentiellement la relation entre la forme géométrique et la qualité acoustique de chaque forme. Les cinq configurations géométriques choisis sont le rectangle, trapèze, le carré, l'hexagone et l'octogone. Les paramètres acoustiques simulés sont essentiellement le temps de réverbération et la distribution de l'énergie sonore. Les résultats de la simulation pour le calcul du TR ont donné des valeurs similaires, puisque leur volume est le même. Dans le cas de la mosquée occupée entièrement par les fidèles, le Tr correspondait aux valeurs optimales pour cette catégorie de volume. Par contre, le Tr augmentait considérablement lorsque la mosquée était occupée au 1/3 ou bien vide (Abdou, A.A., 2003).

la cartographie de distribution du STI est représenté sur la planche 2.6, avec les valeurs du STI pour les prières journalières et la cérémonie du Vendredi. Le champs sonore nous renseigne sur la qualité du message reçu, dans la forme carré la distribution du STI pour la cérémonie du vendredi est la meilleure. Dans la forme octogonale le STI illustre les valeurs les plus faibles dans la partie centrale, avec dans les angle une faible distribution de l'énergie sonore. La cartographie du STI peut renseigner sur la disposition de la sonorisation pour une meilleure distribution de l'énergie sonore. Cette recherche a pu mettre en évidence la qualité acoustique de forme carré comparée aux autres formes géométriques (planche 2.6).

Un travail de thèse de doctorat, développe une approche globale de tous les aspects conceptuels liés à l'environnement acoustique des mosquées. En adoptant une méthode de recherche systémique, cette investigation arbore l'outil de la simulation acoustique pour calculer les différents critères acoustiques tel que la réverbération, la clarté et l'intelligibilité. Le logiciel de simulation acoustique EASE a été utilisé pour évaluer deux composantes conceptuelles des mosquées : la composante de la structure primaire qu'il définit comme étant la forme du plan et sa dimension en surface et volume ; et la secondaire représentant les caractéristiques physiques des surfaces intérieures c'est à dire le plancher les murs et le plafond (Orfali, W.,2000).

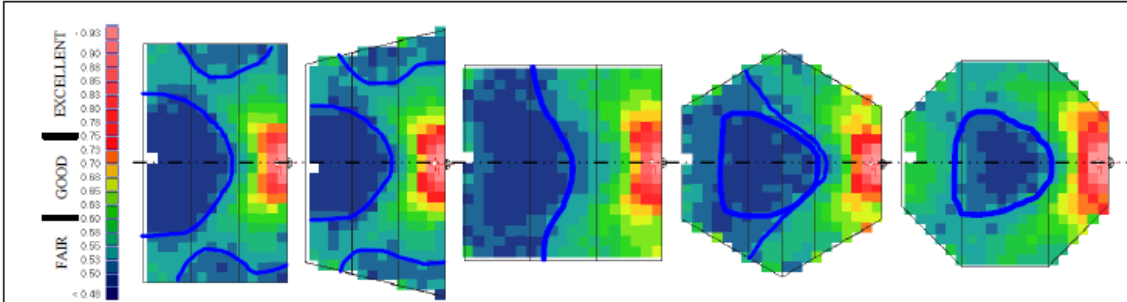
Plusieurs éléments de la forme architecturale ont été testés par le biais du logiciel de simulation, pour la structure primaire la variation du volume a été classée en six groupes. Pour la structure secondaire les éléments soumis à la variation sont : les poteaux et les colonnes par rapport à leurs dimensions et espacements, la forme de la coupole, la présence ou non d'un patio, le type de matériau utilisé pour le traitement des différentes surfaces internes de la mosquée, ainsi que le type de tapis recouvrant le sol et enfin la sonorisation. L'essentiel du travail concerne des modèles de mosquées fictifs simulées, avec un ensemble de proposition et de recommandations. Sans entrer dans le détail des investigations exposées dans ce travail, on s'intéressera surtout aux résultats présentés sous forme de recommandations de certains paramètres acoustiques et également des propositions d'aménagements architecturaux et constructifs.

Les premières recommandations concernent la structure porteuse, le nombre important de poteaux influe négativement sur l'écoute en créant des zones d'ombres, surtout dans les espaces comportant une mezzanine ( salle de prière des femmes). Ses recommandations portent sur la réduction du nombre de poteaux en optant pour une structure avec colonne à pilliers multiples en privilégiant la forme circulaire pour les poteaux.

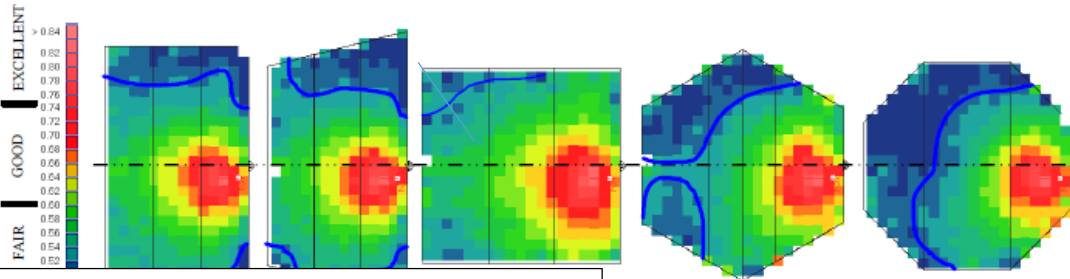
Il propose d'éviter la construction de la mezzanine et de sa structure porteuse , en la remplaçant par la structure de la coupole ; la coupole elle-même représente un caractère dominant dans l'architecture de la mosquée malgré l'effet de focalisation qu'elle engendre. Les recommandations concernant le traitement des murs et du plancher, proposent d'éviter les décorations concaves sur la paroi du mur de fond afin d'éviter le phénomène de focalisation ; il est conseillé par contre de traiter les murs latéraux avec de la décoration pour éviter l'écho flottant. Des expérimentations ont porté sur les matériaux du plancher de la salle de prière qui sera recouvert d'une moquette ou tapis, des résultats très probants préconisent l'utilisation

pour le plancher d'une chape en béton mélangé à des particules en caoutchouc. Les courbes de la planche 2.6, représentent les coefficients d'absorptions d'un plancher ordinaire et d'un autre avec béton de particule de caoutchouc, ce dernier possède un coefficient d'absorption plus important pouvant contribuer à réduire le temps de réverbération.

Enfin une autre recherche explore la fonction acoustique du Mihrab dans les mosquées anciennes, présentée par trois chercheurs de l'université de technologie de Malaisie (Ahmed et al., 2013) . Cette recherche a pour objectif d'examiner la performance acoustique du mihrab dans cinq mosquées. Les mesures du niveau sonore avec sonorisation ont donné des résultats très probants, confirmant le rôle du Mihrab en tant qu'élément aidant à la diffusion de l'énergie sonore à l'intérieur de la mosquée.



Cartographie durant les prières journalières



Cartographie durant la prière du vendredi

Sur la cartographie du STI sur les cinq configurations géométriques, on remarque une bonne distribution pour la forme carrée durant la prière du vendredi lorsque la mosquée est pleine (Abdou, A.A.2003)



Tube d'essai pour le calcul du coefficient d'absorption du tapis posé sur la dalle en béton avec particule de caoutchouc.

Des valeurs plus élevées des coefficients d'absorption, du tapis posé sur une dalle en béton avec particule de caoutchouc (courbe en bleu) par rapport au tapis posé sur dalle en béton ordinaire. ( Orfali, W. 2000)

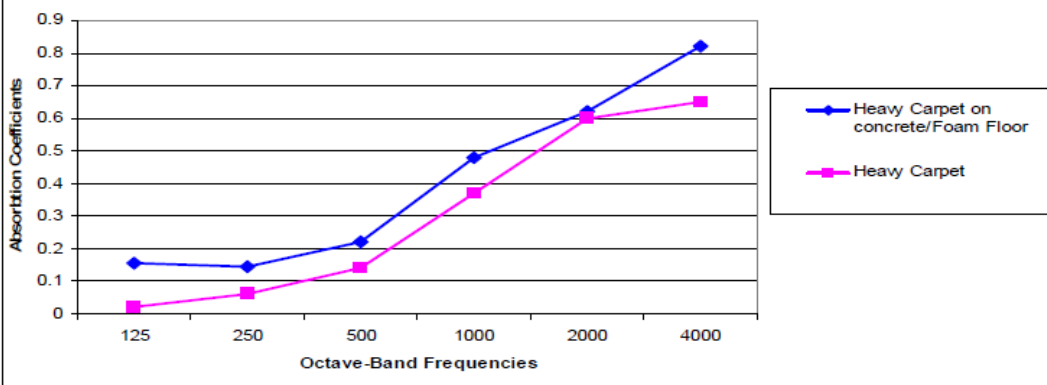


Planche 2.6 : Cartographie de la distribution du STI pour les cinq configurations géométriques. Valeurs du coefficient d'absorption du tapis sur deux différents types de plancher.

#### 2.6.4 Les exigences acoustiques de la mosquée

La mosquée est donc considérée comme un édifice qui possède des particularités liées à l'acoustique des salles, de par sa fonction en tant que lieu d'écoute ; cette caractéristique a un impact direct sur les choix conceptuels et par conséquent sur le confort des usagers. De ce fait la qualité des ambiances acoustiques à l'intérieur de la mosquée est fortement liée à la nature de ses espaces et de fait aux choix conceptuels élaboré par l'architecte. Selon les fonctions de la mosquée que l'on a énoncée, « le principal facteur déterminant sur lequel la conception architecturale de la mosquée doit être fondée sont ses exigences acoustiques » (Hammad, R.N. 1990). Pour créer un environnement acoustique optimal dans la mosquée on doit satisfaire un confort d'écoute que l'on peut exprimer à travers quatre exigences sonores de bases.

- Audibilité sonore, où **l'intensité sonore** adéquate doit être reçue par tous les fidèles de la mosquée avec un certain degré d'uniformité.
- L'intelligibilité, où tous les sons de la parole **doivent être compréhensibles** indépendamment de la position de l'auditeur.
- **Perception complète de l'accent** mis sur certaines consonnes et les voyelles en récitant des versets du Coran.
- Naturel de la voix de l'orateur (imam), résultant de la capacité de l'auditeur (le fidèle) à **localiser la source réelle** et de maintenir ainsi un sentiment de réalisme et de naturel.

Ces exigences acoustiques peuvent être quantifiées à travers l'évaluation des critères acoustiques définis précédemment.<sup>7</sup>Ainsi le temps de réverbération et l'EDT sont des critères qui permettent d'évaluer le niveau d'intensité sonore et son mode de distribution dans la mosquée. Les critères du STI ainsi que la clarté, sont liés à la répartition de l'énergie sonore dans l'espace, ils permettent l'évaluation du niveau de perception et de précision de la parole dans différents endroits de la mosquée.

---

<sup>7</sup> Voir sous-chapitre 1.5.4.

### 2.6.5 Définition des valeurs optimales des critères acoustiques.

Les nombreuses études entreprises sur l'acoustique des mosquées présentées dans l'état de l'art, permettent de déduire des valeurs optimales de certains critères acoustiques. Ces mêmes études se sont basées sur des valeurs optimales définies dans la littérature scientifique, en raison de l'absence de normes spécifiques aux mosquées.

Le classement des mosquées en fonction de leur volume a été établi en six groupes distincts comme le montre le tableau 1 de la planche 2.9. (Abdou, A.A., 2003). En effet la formule de Sabine établit une relation entre la taille du volume et le temps de réverbération. Le même auteur, préconise pour les mosquées du groupe A et B possédant un volume inférieur ou égal à 1500 m<sup>3</sup> un temps de réverbération optimale sans sonorisation, si l'architecte adopte des aménagements acoustiques adéquats.

La planche 2.7 illustre les valeurs optimales du temps de réverbération, en fonction du volume, selon Orfali .W dans la figure (A) et en abaque dans la figure (B). Les valeurs optimales du temps de réverbération, sont également données par des formules comme celle de Knudsen (Long, M. 2006) pour la parole, le  $Tr_{optimal} = 0,32 + 0,17 \log V$ , V étant le volume de l'espace en m<sup>3</sup>. Le temps de réverbération optimale adopté dans cette étude, est choisi suite à une comparaison des trois références. Le tableau 4 de la (planche 2.9), récapitule les trois valeurs optimales, les valeurs issues de l'abaque et de la formule de Knudsen étant très proches, ont été choisies en tant que durée de réverbération optimale pour les deux mosquées,  $Tr_{optimale} = 0.9$  s.

Concernant les critères d'intelligibilité et de clarté, les niveaux des valeurs sont définis dans les graphes C et D de la (planche 2.8), et repris dans les tableaux 2 et 3 de la (planche 2.9). Les valeurs optimales pour le critère de l'EDT (Templeton, D. ,1993) sont comprises entre 2.7 et 3.85 secondes.

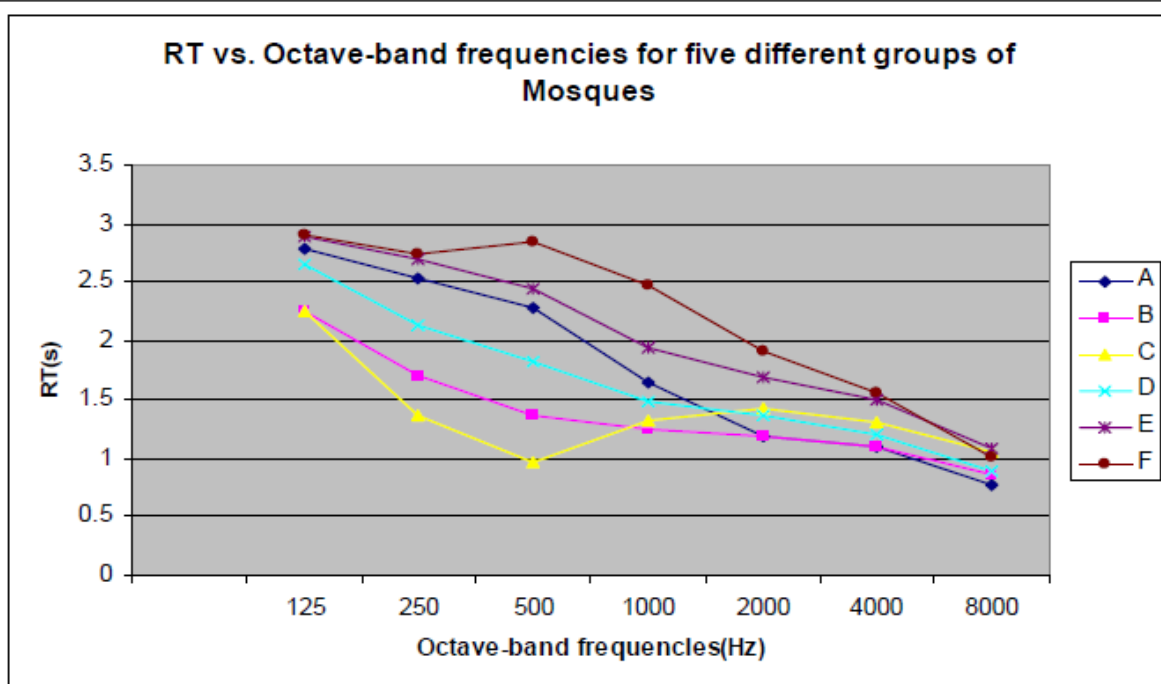


Figure A : valeurs optimales du temps de réverbération en fonction des fréquences, pour les six groupes de mosquées. ( Orfali, W.,2000.)

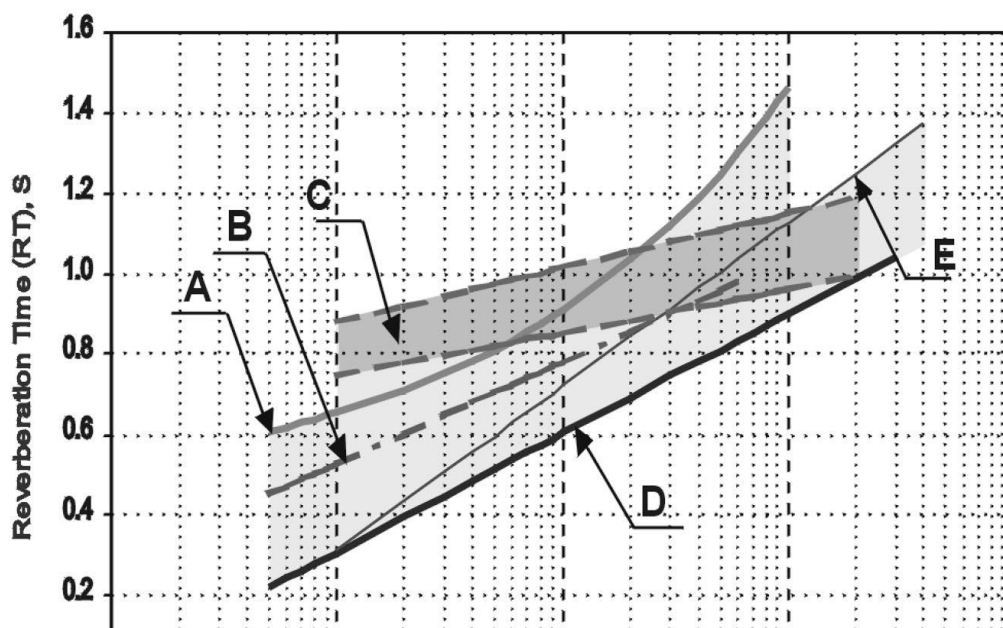


Figure B : valeurs optimales du temps de réverbération spécifiques à la parole en fonction du volume. Les courbes (A) et (B) concernent les très grands volumes, la courbe (C) concerne les salles de conférences aux fréquences médium et (D) pour la fréquence moyenne de 500- 1000 Hz. La courbe (E) concerne le temps de réverbération maximum pour les grands volumes. (Abdou, A.A. (2003

Planche 2.7 : les valeurs optimales du temps de réverbération définis dans la littérature scientifique.

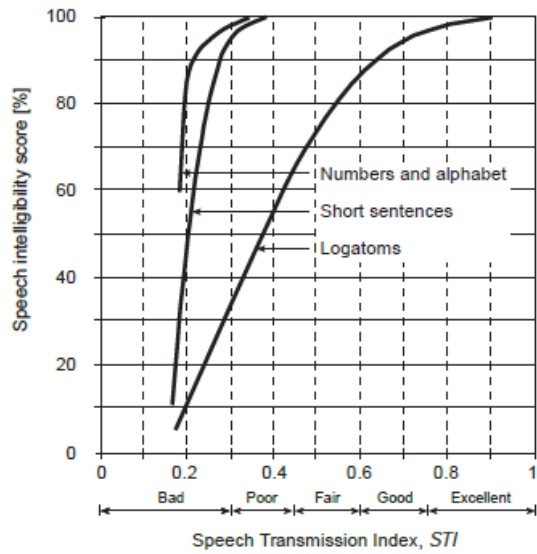


Figure C : représentations des valeurs définissant les niveaux d'intelligibilités pour la communication orale.

( Kleiner,M et al. 2010 )

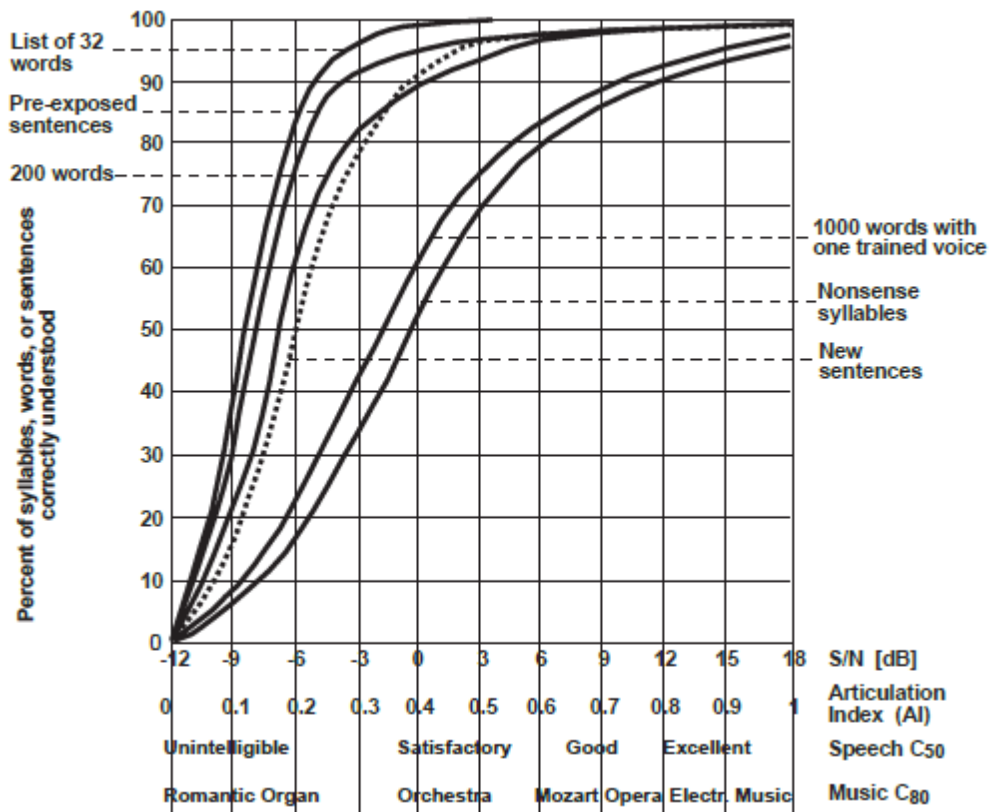


Figure D : représentation sous forme de graphe, définissant les niveaux de clarté (C50) pour la communication orale. ( Kleiner,M et al. 2010 )

Planche 2.8 : valeurs optimales des critères d'intelligibilité (STI) et de la clarté (C50).



Tableau 1 : classement des mosquées en fonction du volume en six groupes (Abdou, A.A., 2003).

Groupe des mosquées	A	B	C	D	E	F
Volume en m <sup>3</sup>	<1000	>1000<1500	>1500<2000	>2000<3000	>3000<10000	>10000

Tableau 2 : valeurs définissantes les niveaux du STI tirées de la planche 2.8, fig. C.

Valeurs définissantes les niveaux du STI.	Mauvais	faible	satisfaisant	Bon	excellent
	0 à 0.3	0.3 à 0.45	0.45 à 0.6	0.45 à 0.75	0.75 à 1

Tableau 3 : valeurs définissantes les niveaux de clarté C50 tirées de la planche 2.8, fig. D

Valeurs définissantes les niveaux de la clarté C50				
Valeurs définies en rapport	mauvais	Satisfaisant	Bon	Excellent
	0 à 0.4	0.4 à 0.6	0.6 à 0.8	0.8 à 1
Valeurs définies en dB	-12 à 0	0 à 6	6 à 12	12 à 18

Tableau 4 : récapitulatif des valeurs optimales du Tr pour les fréquences 500-1000Hz.

Mosquées	Tr selon Orfali W	Tr selon Knudsen	Tr selon L'Abaque
Mosquée Ibn-arabi	2.1 s	$0.32+0.17 \log 9486 = 0.99 \text{ s}$	0.9 s
Mosquée Ennour	2.1 s	$0.32+0.17 \log 5382 = 0.95 \text{ s}$	0.8 s

Planche 2.9 : tableaux récapitulatifs des valeurs de référence du STI et du C50 ; ainsi que les valeurs optimales du temps de réverbération.

### 2.6.6 Synthèse de l'état de l'art.

Dans le cadre architectural de la mosquée, ce chapitre a identifié les paramètres qui influencent le comportement des sons issus de la voix, en présentant la caractérisation de ces phénomènes dans les mosquées anciennes et contemporaines. Ces paramètres déterminent le type d'exigences acoustique à prendre en compte dans la conception des mosquées.

A l'issue de cette présentation, il est nécessaire de relever, l'important travail entrepris ces cinquante dernières années sur la caractérisation acoustique de l'espace de la mosquée à travers le monde permettant d'élaborer un fond documentaire appréciable. Ceci a permis de rassembler différentes **valeurs normatives de critères acoustiques spécifiques à la mosquée**, pour les utiliser comme valeurs optimales de référence dans l'étude expérimentale

La majorité des travaux ont relevé un problème commun lié à l'intelligibilité de la parole, représentant des valeurs supérieures aux normes. Les mosquées contemporaines présentent donc des espaces très réverbérant souvent due à :

- Le manque de surfaces absorbants les sons, en comparaison aux nombreuses surfaces réfléchissantes du son, ce qui crée beaucoup de problèmes acoustiques.
- Certains choix de la structure interne du bâtiment tel que les poteaux, colonnes, coupole, crée souvent des problèmes acoustiques.
- L'installation du système de sonorisation et le choix du matériel, se fait sans étude acoustique préalable.
- Ainsi le problème commun à toutes les mosquées est principalement l'utilisation intensive des surfaces dures, tel que le marbre, le verre, la faïence.

Ces études relèvent également le manque de compréhension de la part de l'architecte des problèmes acoustiques des mosquées. Afin de pallier à ce handicap, il nous semble essentiel d'aborder dans le prochain sous-chapitre, le processus de conception architecturale, afin de définir la manière d'intégrer la composante sonore dans la conception des mosquées.

## **2.7 Les ambiances architecturales et la conception du projet**

### **Introduction**

Les sous-chapitres précédents ont identifiés les spécificités architecturales de la mosquée et les niveaux d'influences et d'échanges mutuels qui caractérisent le couple composante sonore et architecture de la mosquée. Ces influences caractérisées au niveau des composants architecturaux et architectonique de l'espace de la mosquée, ont été définies en termes de critères acoustiques et de valeurs optimales pour une qualification scientifique de l'espace de la mosquée.

Dans le présent sous-chapitre, il est question d'identifier, les dispositions méthodologiques pour la prise en compte de la composante sonore dans le projet architectural. En débutant par une définition du processus de conception architectural, établi par un ensemble d'auteurs ; il sera par la suite question d'identifier les méthodes et outils susceptibles d'aider l'architecte à intégrer la composante sonore dans sa démarche conceptuelle.

### **2.7.1 Processus de la conception architecturale**

Le processus de la conception architecturale décrit les étapes et la procédure suivie par l'architecte pour élaborer son projet. Il est défini comme « l'activité intellectuelle qui, en réponse à une demande (un programme), produit les idées permettant la mise en œuvre de toutes les connaissances et savoir-faire professionnels pour l'instrumentation du projet ainsi que tous les documents nécessaires à la construction d'un édifice dans les règles de l'art » (Porada, M., 1997).

Il existe une multitude de démarches et de points de vue concernant ce sujet, de nombreuses recherches apportent des définitions sur la caractérisation de la conception architecturale. Son processus est généralement défini en trois phases majeures. Lebahar, J-C, définit une première phase de diagnostic architectural durant laquelle l'architecte tente d'évaluer les problèmes et les contraintes du projet de conception, une deuxième phase de recherche de solutions par simulation graphique décrite par Lebahar comme « l'objet en création et la pensée qui le crée », la dernière phase est une phase d'évaluation des solutions proposées à l'aide de représentations détaillées du projet en vue d'entamer sa construction. (Lebahar J-C., 1983).

Le processus de conception architecturale en quatre phases est proposé par Prost (Prost, R. 1992). L'architecte en phase 1 identifie les besoins des différents contextes liés au projet. La phase 2 concerne l'énonciation de solution par des réponses variées, aux problèmes de

conception en usant d'un ensemble de références. La phase 3 prend en charge la matérialisation des solutions architecturales énoncées. Enfin la dernière phase d'appropriation des solutions permet l'évaluation sociale du projet.

Malgré la variété des mises en formes proposées, « le modèle de processus de conception architecturale le plus connu est celui bâti sur le triptyque : Analyse, Synthèse, Evaluation ». (Mazouz, S., 2004). Ces trois phases sont également reprises sous d'autres appellations « phase conceptuelle, phase transitoire, phase conventionnelle » (Hammou A. 2013). l'architecte au cours de ce processus est donc tenu de faire un diagnostic des problèmes posés pour les résoudre « la situation de projet est une situation de résolution de problèmes. Elle met l'architecte qui y est confronté en demeure de produire des solutions »( **Semidor, C.,1999**).

Le processus de conception est donc décrit comme une pratique basée sur des choix multiples agencés selon une progression de type aller-retour en fonction des informations portées à la connaissance du concepteur. Ces informations sont en général issues d'un certain nombre de corpus de savoir architectural propre à l'environnement physique et socioculturel, ainsi qu'aux éléments se rapportant au programme et aux procédés et techniques de constructions. Dans le processus de formulation de problème de Prost l'ensemble des contraintes énoncées fait intervenir différents acteurs, appartenant à des domaines multiples. « Toute amorce de solution doit tenir compte de l'ensemble des contraintes de façon judicieuse, sans donner à certains un poids disproportionné avec leur impact sur le projet et sa réalisation, mais surtout sans en laisser de côté » (Semidor, C.,1999). L'ensemble des informations sont donc rassemblées et hiérarchisées durant la phase 1 du processus de conception, pour être opératoire dans la phase 2 de ce processus. C'est au cours de cette phase « qu'il est pertinent d'intégrer les contraintes de type ambiances acoustiques par exemple » (Semidor, C.,1999). La composante acoustique appartenant au corpus du savoir lié à l'environnement physique.

En fin de parcours la solution apportée au problème posé pour l'élaboration du projet se concrétisera dans la genèse d'une configuration formelle proposée par l'architecte, « si la formulation de la solution est considérée comme le cœur du problème de la conception, les références à l'architecture sont, quant à elles, définies comme l'élément central pour la constitution d'une solution architecturale » (Prost, R. 1992). Les informations utilisées par l'architecte sont tirées d'un corpus très large de références, faisant partie de sa culture propre ou bien dues à un apport extérieur. On conclut donc que la référence doit reposer sur un corpus étayé par un savoir théorique ou pratique. Autrement dit l'architecte doit savoir comment un

phénomène lié aux éléments d'ambiance acoustique par exemple, est incarné dans l'espace pour qu'il puisse l'utiliser en tant que référence architecturale dans son travail de conception. La définition de ce corpus de référence et du savoir liés aux phénomènes acoustiques, est le but du guide acoustique que nous proposons d'élaborer.

### **2.7.2 Les méthodes d'intégration de la composante sonore dans le projet architectural.**

La réussite d'un projet architectural en acoustique des salles, est étroitement liée à la pertinence des choix menés par l'architecte, conformément aux objectifs acoustiques déjà évoqués. Dans le cas précis des mosquées, on constate que la pertinence de ces choix dépend en grande partie du respect des contraintes esthétiques imposées par l'architecte et d'une manière générale par les objectifs du projet. Cela restreint considérablement l'émergence d'un projet de conception acoustique, qui à l'évidence demeure primordial pour la conception des mosquées. Il est donc nécessaire de rechercher des approches adaptées, pour aider l'architecte à intégrer les paramètres acoustiques dans son projet.

L'intégration de la composante sonore dans le projet architectural peut paraître difficile vu la nature complexe de la conception architecturale qui possède un caractère non-linéaire, peu prévisible et itératif. En dépit des difficultés liées d'un côté au processus de projet, et de l'autre aux composantes de l'ambiance ; plusieurs méthodologies d'approches ont essayé de dépasser cette complexité et répondre à cet enjeu majeur. Donc comment identifier les méthodes et les outils d'assistance les plus appropriés pour aider l'architecte à maîtriser le comportement sonore dans ses projets de mosquées ? Pour répondre à cette question, trois approches relevées dans la littérature consultée s'offrent à nous :

Une première approche exploite les références.

Une deuxième approche utilise les modèles physiques.

Une troisième approche fait appel à des modèles numériques.

Ces trois approches proposent des fonctions et des modèles que l'on va identifier dans le but de constituer un savoir des méthodes et outils d'assistance à la conception architecturale. La connaissance caractérisée par ces trois approches, suscitera des questionnements sur les atouts et les faiblesses de chaque approche par rapport à la spécificité de notre objet d'étude, et aux exigences de travail de conception des architectes. Pour répondre à ces questionnements et étayer notre choix, un questionnaire destiné spécifiquement aux architectes (qui ont conçu des

mosquées) sera établi, le choix d'une approche adaptée se fera conformément aux résultats de cette enquête.

### **2.7.3. La méthode d'approche exploitant les références.**

Le terme référence en architecture est utilisé pour désigner des « outils de médiation » utilisé par l'architecte pour l'aider à exposer un problème et à formuler des solutions. L'importance de l'utilisation par les architectes en situation de conception, de références visuelles a été soulevée par de nombreux auteurs, notamment Boudon et Poussin (Boudon, P et al. 1988). Les références permettent de développer le champ de recherche par des cas de projet existant, ou bien de constituer un ensemble d'idées inspirées de différentes images. A l'aide des références, l'architecte en cour de conception peut prospector des intentions et des solutions pour son projet.

L'architecte a toujours eu recours à différents outils et modes de représentation (esquisses, plans, coupes, maquettes etc...) pour mettre en forme son projet et le communiquer. Le discours et les textes sont également des modes de représentations qui permettent à l'architecte, « de diminuer l'incertitude liée à la forme finale de l'édifice, lors de la phase de conception architecturale » (Lebahar J-C.,1983) cet outil de communication graphique ou littéraire est mis sous forme d'ouvrages de références, où les architectes essayent de structurer d'une manière théorique les activités de la conception architecturales. On retrouve également des ouvrages qui exposent la vision de l'architecte quant à la conception de ses projets réalisés ou imaginés, leur attribuant ainsi un caractère référentiel.

Ces ouvrages et manuels théoriques constituent des références, que le concepteur utilise régulièrement pour l'aider à trouver des solutions théoriques et concrètes aux contraintes de conception qu'il rencontre. Ces références sont des supports d'assistance où l'architecte va rechercher des traces d'expériences traitant des contraintes et des questionnements posés aux concepteurs et proposant des solution et des règles de conception pour atteindre un objectif.

Ainsi l'utilisation des références, sert d'aide précieuse à l'architecte, pour intégrer les attributs des ambiances dans son projet. Il existe différents types de références propres au champ des ambiances en général, et des ambiances sonores en particulier. Ceux couramment utilisées sont : les références numérisées, les manuels techniques et les abaques de calcul

#### **2.7.3.1 Les références numérisées.**

Le mouvement de numérisation des références dans le domaine des ambiances thermiques et lumineuses connaît un développement considérable. Ces références numérisées se présentent

sous forme d'un outil logiciel gérant un ensemble de références imagées. Ce logiciel offre à l'utilisateur la possibilité de trouver des références potentielles lui permettant d'appréhender des ambiances et d'émettre des intentions. L'interface du logiciel offre un espace de référence qui se prête à différents mode de navigation. (Planche 2.10)

La virtualisation des références architecturales des ambiances acoustique est par contre très minimales, sinon inexistantes pour certaines branches de l'acoustique et notamment pour l'acoustique des salles.

### **2.7.3.2 Les manuels techniques.**

Le développement des contraintes techniques liées à l'architecture, conjuguées à une évolution des technologies nouvelles a donné naissance à un domaine de connaissances plus techniques et très précises en rapport avec le savoir architectural. Cet état de fait a créé un besoin d'assistance plus ciblé vers ces compétences, et a donné naissance à des manuels de conception qui tentent d'interpréter les règles techniques, et les lois physiques par des méthodes de calculs simples, que l'architecte peut appliquer à la conception de ses projets

Ces manuels sont souvent organisés en deux volets, un premier volet théorique explique les bases physiques et physiologiques de l'acoustique, du comportement, de la quantification et la qualification du son dans l'espace. Un deuxième volet plus pratique présente les applications de l'acoustique en architecture en distinguant deux domaines : celui de l'acoustique des salles qui prend en charges l'ensemble des dispositions qui permettent d'assurer la qualité acoustique des locaux ou lieux d'écoute : et celui qui s'occupe de l'isolation acoustique des locaux et des dispositions à prendre pour réduire la transmission du son et la protection des locaux. L'ensemble des manuels d'acoustique architecturale, mettent bien l'accent sur le fait de ne pas confondre correction acoustique et isolation acoustique. Certains manuels présentent dans le deuxième volet des cas d'études de configurations architecturales et des règles de mises en œuvre aidant l'architecte à choisir et à dimensionner des dispositifs acoustiques adaptés aux attentes conceptuelles du projet.

Ce type de référence, constitue un outil de travail acquis par les architectes durant leurs formations et au cours de leur vie professionnelle. C'est un moyen qui est ancré dans la culture d'utilisation de la référence. Il constitue pour les architectes, la principale forme d'assistance à la maîtrise des ambiances sonores, comme une source d'inspiration et de résolution des problèmes auxquels ils sont confrontés.

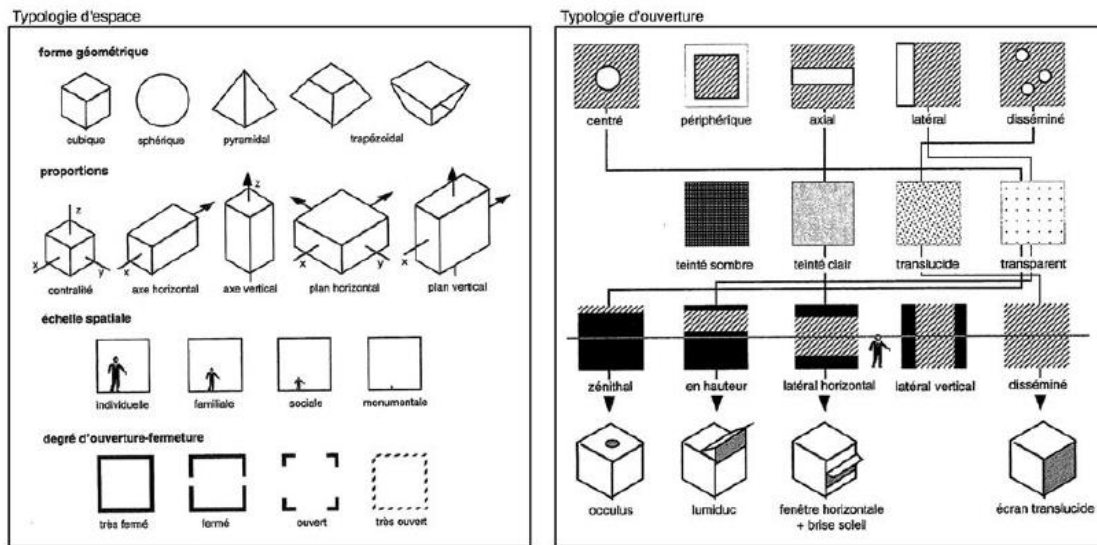
### **2.7.3.3 Les abaques de représentation et de calcul.**

Les outils de référence sous forme d'abaques de tableaux ou de graphe, représentent une forme d'interprétation pratique des savoirs théoriques de l'évaluation des principaux critères acoustiques. Le critère le plus important dont dépend la qualité acoustique d'un espace est sa durée de réverbération, qui est liée à la fois à la capacité d'absorption des matériaux de l'espace et à son volume. Ces deux critères sont mis en relation par une formule simple, dite « formule de Sabine »<sup>8</sup>. Cette formule permet une évaluation théorique de la durée de réverbération à partir des coefficients d'absorption des matériaux choisis par l'architecte et de la grandeur du volume qu'il a conçu. Ce support de calcul simple peut être utilisé en phase amont du projet, il permet d'apporter une réponse, donc d'anticiper et de maîtriser le comportement du son pour un édifice projeté. Il est à noter que plusieurs sites Web dédiés à l'acoustique offrent une méthode de calcul instantanée en introduisant les valeurs du volume et du coefficient d'absorption à la fréquence désirée. Les durées de réverbérations préconisées sont données dans des abaques en fonction de la destination de l'espace (Planche 2.11).

---

<sup>8</sup> Voir sous chapitre 1.5.4.





Définition d'une base de données de références sous forme de dispositifs architecturaux et de dispositifs d'éclairages. (Lassange, G., 1998)



Interface de l'outil d'assistance à la conception des ambiances lumineuses Day@mbiance (Chaabouni, S., 2011)

Planche 2.10 : Les exemples d'outils d'assistance à la conception des ambiances lumineuses.

#### **2.7.4. Méthodes d'approche exploitant les modèles physiques.**

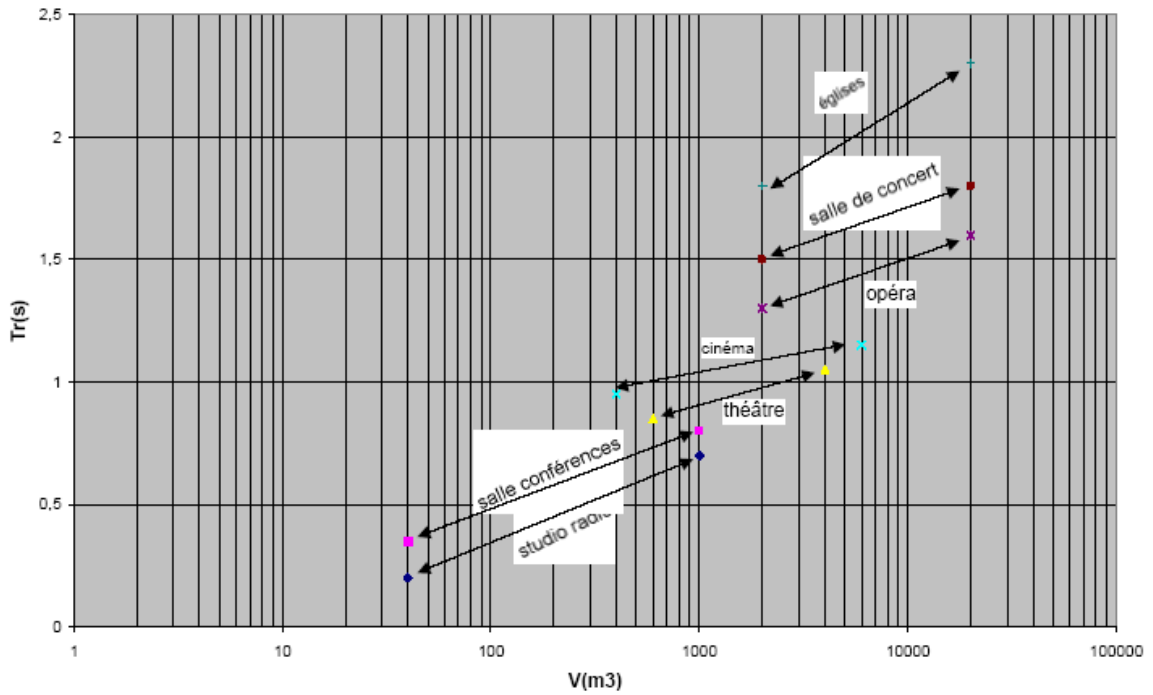
Cette méthode offre à l'architecte la possibilité d'évaluer la validité et la réalité matérielle de son œuvre à travers la construction d'un modèle réduit ou maquette. Cet outil utilisé également pour la maîtrise des ambiances lumineuse, constitue le premier type de modèle physique pour aider le concepteur dans sa démarche de conception. La maquette représente le projet à une échelle réduite, ce dispositif servira à l'étude du comportement acoustique du projet à réaliser. « Dans ce cas on réalise à une échelle comprise entre 1/30 et 1/18 une maquette de la salle à étudier » (Semidor, C., 1998), les tests et les mesures pratiqués dans la salle réelle, sont effectués sur maquette dans les domaines de la fréquence et du temps ; ce qui permet de prévoir une partie du comportement de l'espace avant sa réalisation. La configuration de ce dispositif en 3D permet de visualiser des échogrammes représentant la réponse acoustique de l'espace, l'analyse de ces résultats peut orienter l'architecte à effectuer des modifications sur les composants dimensionnels de son projet.

Dans l'optique de développer et d'améliorer les performances de cet outil de simulation sur maquette, deux laboratoires d'acoustique (Français et nouvelle-Zélandais) ont développé un système de mesure sur maquette appelé MIDAS « Méthode Informatisée pour Décrire l'Acoustique d'une Salle », ce système est basé, comme la majorité des approches, sur la description de la qualité acoustique par des indices objectifs. L'utilisation en acoustique de cet outil, requiert une reproduction fidèle de la configuration de l'espace, la qualité des prédictions acoustiques obtenues par cette méthode, reste tributaire de données qui font encore défauts, relatives aux coefficients d'absorption des matériaux spécifiques aux différentes échelles. (Planche 2.11)

Les maquettes physiques, sont un outil de simulation facile à exécuter, elles constituent un objet maîtrisé et apprécié par les architectes, la maquette est fréquemment utilisée comme un outil d'aide à la conception. Néanmoins, elle requiert le concours d'un acousticien pour le traitement et l'évaluation des résultats. L'expérience relative à l'utilisation de cette méthode pour la conception des salles de spectacles n'est pas non plus très concluant, « en effet, il faut noter que les salles sont souvent modifiées au cours de leur réalisation alors que l'étude acoustique prévisionnelle est terminée et ne peut matériellement être reprise » (Semidor, C., 1998). Cet état de fait influe directement sur la validation des tests acoustiques réalisés sur le projet terminé, puisque la conception de ce dernier ne concorde pas avec la maquette réalisée. L'exploitation des dispositifs d'évaluation utilisant les maquettes physiques « constitue la seule technique de simulation capable de reproduire toute la complexité du

phénomène acoustique sans avoir recours à des hypothèses simplificatrices »  
(Cruz Barney,F., 1999).

Néanmoins l'utilisation des maquettes physiques reste limitée du fait des problèmes techniques évoqués, en plus de leur cout élevé et de l'importance des équipements qu'elles nécessitent. Tous ces facteurs limite l'utilisation de ce type de dispositif à des projets de grande envergure à un stade avancé de la conception, et manipulé par des spécialistes initiés.



Abaque donnant le temps de réverbération optimale aux fréquences médium (500-1000 Hz) (Hamayon, L., 2013).



Maquette de la salle de la Philadelphia Academy of Music réalisée à l'échelle 1/25<sup>e</sup> en aggloméré de haute densité. Les sièges ont été modélisés avec de la mousse absorbante. (Source **Cruz Barney, F**)

Planche 2.11 : Abaque de calcul du  $T_r$  optimale et maquette d'un théâtre pour des simulations acoustiques.

### **2.7.5 Méthode d'approche exploitant les modèles numériques.**

L'évolution de la production architecturale et de l'expression architecturale au cours du 20<sup>e</sup> siècle a donné lieu à de nouvelles contraintes résultant de la création de nouvelles formes architecturales complexes et a généré une nouvelle génération de données techniques et de normes de sécurité à respecter. Le développement des systèmes informatisés caractérisant notre époque, tente de gérer ce flux important de contraintes liée à la conception du projet. La recherche par les architectes et les concepteurs de méthodes et outils adaptés à leurs nouveaux besoins, a dynamisé le développement des systèmes de conception informatisé. Ces systèmes utilisent différents modèles numériques, et exécutent des fonctions selon les objectifs et les besoins des concepteurs qui sont en perpétuel évolution. Ce sous-chapitre a pour objectif de définir et de caractériser ces méthodes et outils exploitant les modèles numériques, utilisés dans la maîtrise et le contrôle de l'acoustique des salles. Le modèle de logiciel utilisé dans notre travail, sera présenté plus en détails, ainsi que les exigences méthodologiques qui ont suscitées ce choix.

#### **2.7.5.1 Les modèles numériques géométriques 2D et 3D**

Les modèles numériques de représentation géométriques sont des modèles qui offrent la possibilité de représenter la géométrie d'un objet en deux ou trois dimensions avec des niveaux de complexité variables. Le niveau de complexité augmente avec les modèles de représentation géométrique 3D, générant une représentation abstraite des entités géométriques modelées dans l'espace tridimensionnel. La littérature consultée dans ce domaine définit un ensemble de modèles géométriques. Ces modèles de représentation numériques, sont classés selon des différences liées à un ensemble de critères (Hégon, G., 2003).

- La capacité de représentation morphologique et structurelle d'un objet
- Capacité de représentation visuelle, selon un niveau de précision et de réalisme.
- Le mode d'acquisition des données géométriques, sous forme de commande interactive, de langage descriptive ou de données numérisées.
- Le type d'utilisation du modèle créé, destiné à la simulation du comportement thermique acoustique ou lumineux.

Les modèles numériques géométriques que la plupart des concepteurs utilisent ou connaissent sont classés en quatre catégories qui sont brièvement :

- Le modèle géométrique impératif comme « Autocad et Sketchup ».
- Le modèle géométrique paramétrique comme « Maya -Grasshopper »

- Le modèle géométrique sémantique c'est les logiciels qui permettent le partage entre différents logiciels, « Revit- Archicad »
- Les supports de modélisation géométrique déclarative. intégrant des descriptions de la dimension sensible comme la lumière ou la couleur. «WordsEye- Solimac »

Tous ces logiciels font appel à une représentation en 2D et 3D pour décrire des intentions et des idées architecturales. Ces outils offrent ainsi la possibilité de modélisation de simulation et d'évaluation, ils permettent la maîtrise de la complexité qui caractérise les phases conceptuelles du projet d'architecture.

### **2.7.5.2 Les supports numériques utilisant les modèles génératifs.**

Les modèles génératifs proposent à l'architecte une méthode générative d'optimisation appliquée à la maîtrise du comportement thermique, lumineux ou structurel du projet d'architecture. Ces modèles proposent à l'architecte une optimisation de sa conception portant sur différents critères comme la forme, l'orientation, les ouvertures, le système de chauffage et de climatisation. Cette optimisation se présente sous la forme d'un ensemble de solutions architecturales proposées à l'architecte, permettant de vérifier un ensemble d'objectifs préconisés, tel que la consommation énergétique ou l'éclairage. Ces supports possèdent certaines potentialités, tel que la simplicité de programmation graphique ce qui a permis aux architectes « de chercher et de générer des solutions optimales en prenant en compte un ensemble de contraintes liées à la conception de leurs projets » (Gallas, M.A., 2013) (planche 2.12.)

### **2.7.5.3 Les supports numériques utilisant les modèles de simulations.**

La modélisation et la simulation constituent des outils utilisés dans différents domaines de la connaissance, aussi bien sur le plan théorique que pratique. La simulation sur le plan pratique, permet de reproduire un phénomène ou l'interaction entre plusieurs phénomènes ; en d'autre terme elle permet une reproduction de situations déterminées représentatives de la réalité avec tous les paramètres et les critères de qualification pour garantir des résultats proches de la réalité. Sur le plan théorique, la simulation permet de comparer l'expérience au modèle et de fait d'enrichir l'état des connaissances. « La simulation représente alors en soi une étape dans un processus itératif d'apprentissage et d'approfondissement des connaissances » (Cruz Barney, F., 1999).

Dans le domaine des ambiances, les modèles de simulation offrent à l'architecte des outils d'assistance au dessin pour la construction de son projet sous forme d'un espace numérique tridimensionnelle. La simulation permet de répondre à la problématique de la maîtrise des

paramètres qui caractérisent le phénomène physique, ainsi que son mode de variation dans le temps et l'espace

La simulation des différents phénomènes physiques liés à l'acoustique, la thermique et l'éclairage, consiste à construire un environnement de simulation informatique de ces phénomènes. Le but de cette opération est d'étudier, vérifier et optimiser le comportement de ces éléments d'ambiance pour pouvoir proposer des solutions architecturales au projet conçu ou en cours de conception.

Les modèles numériques de simulation dédiés à l'acoustique se sont développés un demi-siècle environ après l'apparition de l'acoustique des salles grâce à l'accès aux puissances importantes de calcul des ordinateurs. Les recherches de méthodes de simulation dans le domaine de l'acoustique des salles, ont permis de réduire la complexité de la description du phénomène de propagation du son en espace clos. L'approche numérique permet une simplification des phénomènes acoustiques en vue d'analyser le résultat de la simulation et de déterminer les causes par l'observation des valeurs obtenues, ce qui est difficilement réalisable dans la réalité. Cette aptitude ouvre par la suite la voie aux processus d'optimisation, étape finale et nécessaire dans le cadre de l'élaboration d'un corpus d'aide à la conception architecturale du projet.

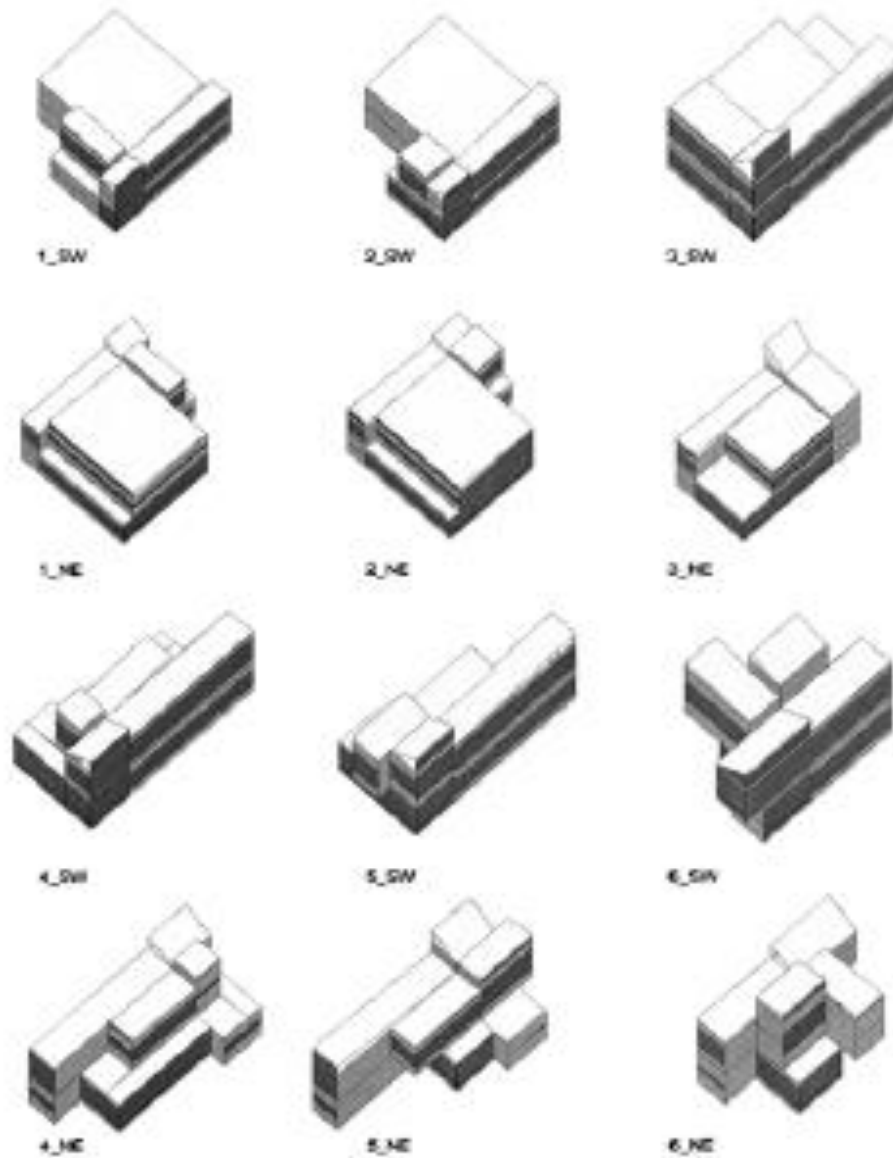


Planche 2.12 : Différentes solutions architecturales proposées à l'architecte par des logiciels pour le traitement des ambiances thermiques et lumineuses. (Gallas, M.A.,2013)



## 2.8 Modèles numériques dédiés à l'acoustique des salles

Dans le domaine de l'acoustique des salles, les outils de simulation se sont surtout concentrés sur 3 axes principaux (Cruz Barney, F., 1999) :

- L'étude du phénomène physique de la propagation du son en espace clos et des transformations apportées par l'environnement dans lequel il se propage, le *canal acoustique*.
- L'étude des relations entre les transformations subies par le son et leur perception auditive, et la caractérisation de ces relations par des grandeurs acoustiques, les *indices objectifs*.
- Le traitement du signal qui vise à la reproduction d'un environnement sonore.

Les différents logiciels mis sur le marché comme outil d'aide à la caractérisation acoustique, sont basés sur la modélisation des algorithmes qui servent à gérer la simulation des sources et le traitement du son dans un environnement 3D défini. Le principe de ces logiciels consiste à simuler la géométrie architecturale sous forme d'un modèle numérique constitué de facettes auxquels sont associés des paramètres qui décrivent le comportement acoustique des parois. Lorsque les données relatives à l'affectation des sources et des récepteurs sont définies, les programmes de simulation acoustique mettent en œuvre des modèles physiques de la propagation acoustique afin d'interpréter le mode de propagation de l'énergie sonore dans sa dimension temporelle et spatiale. Les résultats sont donnés sous forme de cartographie sonores ou de tableaux statistiques de valeurs des différents critères objectifs.

### 2.8.1 Présentation des logiciels de simulation acoustiques utilisés

Le logiciel de simulation acoustique utilisé dans notre travail est le logiciel « EASE4.4 », choisi suite à une prospection de deux logiciels expérimenté au début de notre travail à savoir : I-Simpa et Catt Acoustic. Ces deux logiciels seront présentés brièvement, afin d'explicitier les raisons de notre choix. (Planche 2.13)

#### 2.8.1.a. Le logiciel I- Simpa

Le logiciel **I- Simpa**, développé par l'institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux (FSTTAR), offre une plate-forme logicielle open source, développée dans le cadre d'un projet initié par l'agence française de l'environnement et la maîtrise de l'énergie. Les applications classiques d'**I- Simpa** sont la simulation de la propagation sonore dans les espaces fermés. L'interface est organisée dans une fenêtre

principale avec des outils contenant un ensemble de fonctions qui permettent d'introduire les différents paramètres liés à la définition des sources et des récepteurs ainsi que le paramétrage des codes de calcul et le traitement des résultats.

L'étape la plus importante qui consiste en la modélisation géométrique 3D du projet architectural à simuler, doit être importée d'un autre logiciel de modélisation, tel que Sketch up ou Autocad. La définition des propriétés des matériaux du projet, s'effectue également par l'importation des bases de données acoustiques issues d'autres logiciels de simulations comme Catt-Acoustic et Odéon, qui ne sont pas en open –source. Après un travail sur ce logiciel (vu sa disponibilité) qui a duré plusieurs mois, de nombreux problèmes, liés à son mode de fonctionnement ont surgit. Le principal inconvénient réside dans la modélisation géométrique qui ne peut pas prendre en charge une architecture chargée et riche en éléments architecturaux, comme c'est le cas des mosquées. Après importation de l'architecture modélisée sur Sketch up vers I-Simpa, ce dernier procède à la correction de la géométrie par la suppression des doublons de sommets et de faces, ce qui entraîne une déformation du modèle géométrique vu sa complexité. Le deuxième inconvénient réside dans l'absence d'une base de données propre au logiciel définissant les caractéristiques acoustique des matériaux des sources et des récepteurs.

#### **2.8.1.b. Le logiciel Catt Acoustic.**

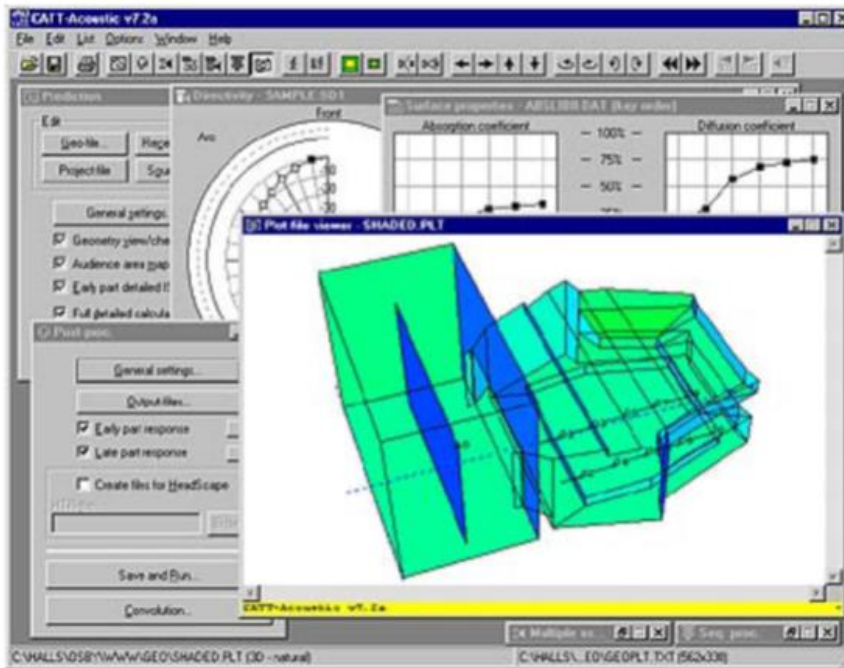
Le logiciel **Catt Acoustic**, est considéré comme un des logiciels de simulation acoustique les plus avancés dans le domaine de l'acoustique virtuelle, largement utilisé dans l'ingénierie de l'acoustique du bâtiment et de la sonorisation. La définition de la géométrie des espaces et des données acoustiques, se fait à l'aide d'un fichier d'extension *\*geo* qui est un fichier texte ASCII. La procédure de modélisation de l'architecture se fait de deux façons. La première consiste à définir la géométrie de façon textuelle, par les coordonnées de l'ensemble des facettes qui composent le modèle architecturale, ainsi que les matériaux. Chaque facette correspond à un matériau d'un coefficient d'absorption et de diffusion par bande de fréquence. La deuxième méthode, consiste à passer par l'intermédiaire d'un programme spécifique qui met en œuvre l'interface entre AutoCAD et Catt Acoustic, de cette façon il est possible de faire entrer une géométrie AutoCAD sur **Catt Acoustic**.

Le logiciel **Catt Acoustic**, possède à l'instar de **I-Simpa**, sa propre base de donnée pour la définition des paramètres acoustiques des matériaux, des sources et des récepteurs ; malgré cet aspect avantageux, ce logiciel n'offre pas la possibilité d'intégrer directement la géométrie du modèle sur son interface ce qui constitue un handicap majeur pour les espaces chargés en détails architecturaux, problème également posé lors de l'importation des modèles.

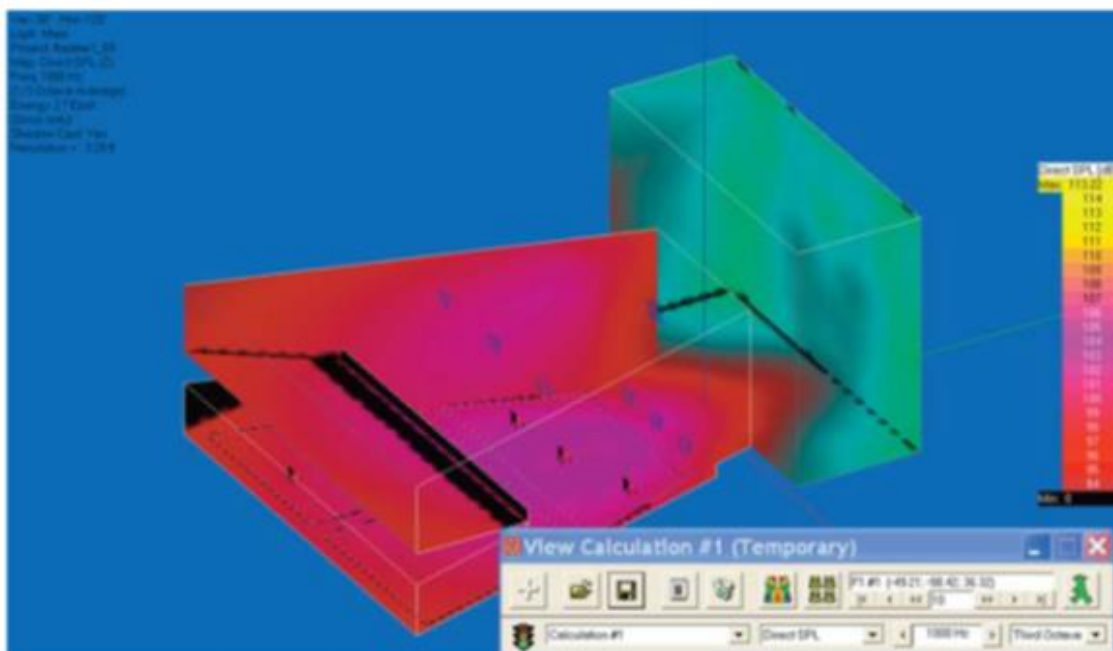
Au vu des problèmes rencontrés dans la phase de modélisation, un autre moyen pour exporter la géométrie de la mosquée a été testé. Cette dernière consiste à récupérer toutes les coordonnées de chaque facette à l'aide du logiciel Sketch up, et de les coller sur le fichier texte d'extension *geo* de Catt Acoustic. Malheureusement ce processus fastidieux et long s'est avéré infructueux en raison de la limitation du nombre de facettes (par la version démonstrative de Catt Acoustic) à une cinquantaine de facettes, alors qu'une simple mosquée sans coupole peut en contenir des centaines.

La planche 2.14, illustre la modélisation des surfaces convexes et concaves, pris en compte sous forme de facettes triangulaires ou trapézoïdales, augmentant de façon considérable le nombre de facettes pour une mosquée avec coupole ; comparativement à d'autres espaces plus simple. Le procédé de modélisation sur **Catt Acoustic** est pour l'architecte très difficile, en raison de sa complexité et de son ergonomie peu adapté au travail de l'architecte.

Cette phase d'expérimentation et de prospection d'un logiciel de simulation adaptée, a été très laborieuse en temps et en effort. Néanmoins cette expérience n'a pas été vaine, puisque elle a guidé notre choix pour le logiciel EASE 4.4. La principale caractéristique du logiciel EASE4.4, est qu'il possédait sa propre interface de saisie de la géométrie 3D du modèle à simuler, tout en disposant de sa propre base de données pour la définition des sources sonores, et des matériaux associés à leurs coefficients d'absorption.

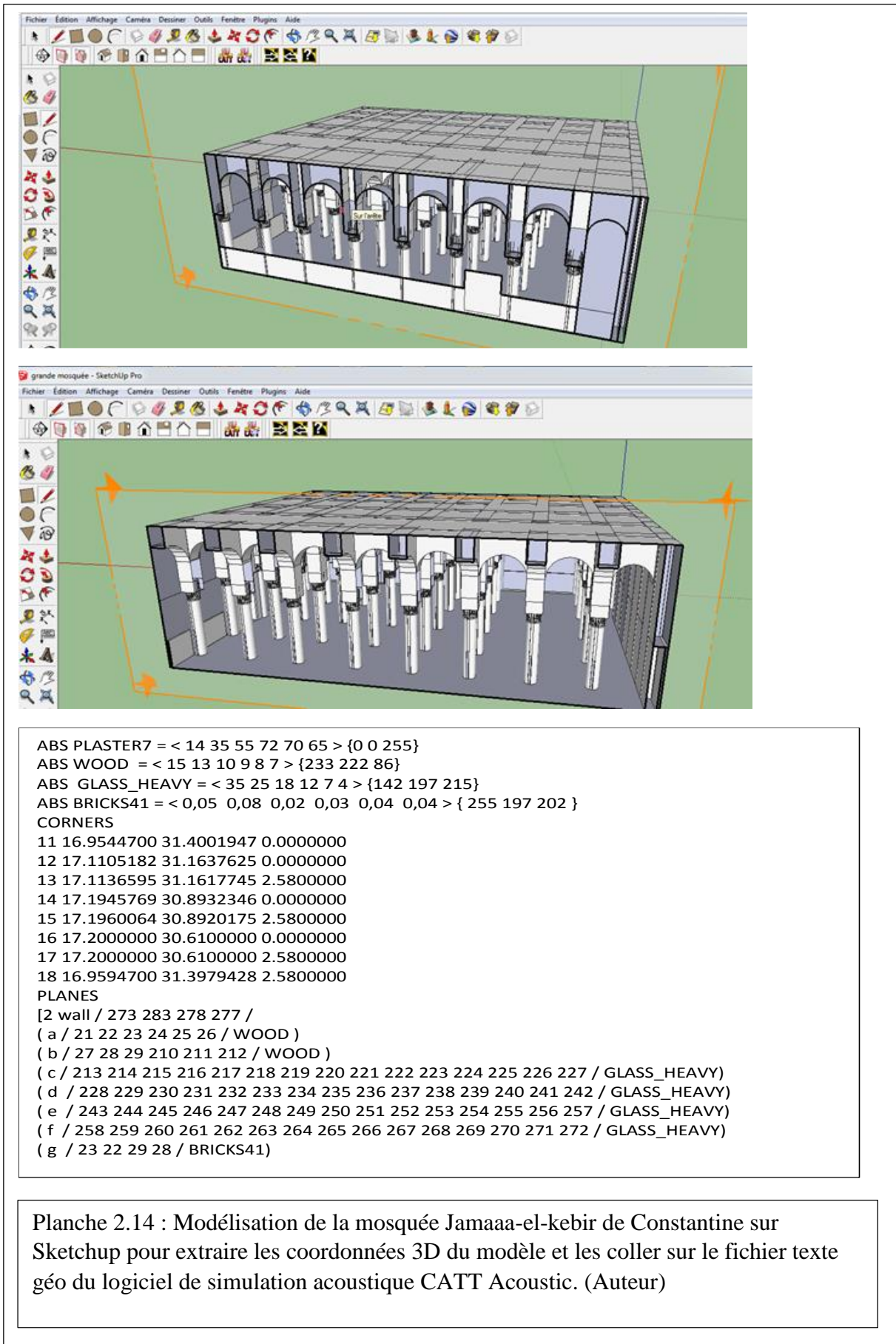


L'interface de navigation du logiciel CAAT Acoustic.



Visualisation en 3D du modèle numérisé d'un théâtre avec simulation de la distribution de l'énergie sonore sur le logiciel EASE4.4.

Planche 2.13 : illustration de l'interface de navigation du logiciel CAAT Acoustic et EASE4.4. (Auteur)



## **2.9 Les outils de références dans la pratique de la conception des mosquées.**

### **Introduction.**

Comme tout processus de conception, la conception architecturale de la mosquée est un exercice complexe qui dépend de la disponibilité des informations pendant les phases amont du travail de l'architecte, Pour identifier la place des exigences acoustiques dans les choix conceptuels des architectes, et pour mettre en évidence la place des outils de référence dans la pratique de la conception des mosquées ; une enquête auprès des architectes a été menée. Les enquêtés sont composés d'architectes pratiquant dans un bureau d'étude, ainsi que d'architectes enseignants, ayant tous participé à la conception de quelques mosquées. Cette enquête réalisée auprès d'enseignants et de professionnels, se présente sous la forme d'un questionnaire distribué à dix enseignants architectes, et à une dizaine d'architectes professionnels. La liste de ces architectes nous a été fournie par le bureau d'étude de la direction des affaires religieuses et de wakfs de la wilaya de Constantine.

Les questions de l'enquête auprès des architectes, ont porté sur la plupart des caractéristiques spatiales, architecturales et architectoniques, qui touchent à l'élaboration conceptuelle des mosquées.<sup>9</sup> Les questions portent également sur les caractéristiques de ces critères et leurs impacts sur la qualité sonore des mosquées. Enfin, ce questionnaire identifie les problèmes rencontrés face aux exigences du confort sonore, ainsi que les suggestions que les architectes proposent vis-à-vis des outils de références pour la maîtrise des ambiances sonores.

Ce questionnaire a permis d'identifier la nature et le rôle des critères pris en compte par l'architecte dans la conception des mosquées. Les résultats de cette enquête permettront d'élaborer des stratégies, en vue de développer des outils d'aide adaptés aux attentes des architectes, pouvant servir de références facilement exploitables dans leur travail de conception.

### **2.9.1 Interprétation des résultats de l'enquête.**

L'enquête élaborée et traitée par le logiciel « Modalisa », comprend 22 questions fermées, achevée par une dernière question ouverte. Le questionnaire débute par des questions de nature globale liées aux choix conceptuels impliquant la forme, la structure porteuse et les proportions de la mosquée. La deuxième partie, concernent les composants de l'espace ayant un impact sur la qualité acoustique, tel la forme géométrique, la coupole, le mihrab, les matériaux de finition et

---

<sup>9</sup> Voir le texte du questionnaire en Annexe 3.

la moquette. Enfin on a achevé l'enquête par des questions visant à identifier la position de l'architecte vis-à-vis des outils de références pouvant l'assister dans son travail de conception, pour la maîtrise du confort sonore. D'une façon globale les résultats de l'enquête, ont révélé le manque de connaissance et de maîtrise caractérisant l'activité de création, quant à la prise en compte du confort acoustique.

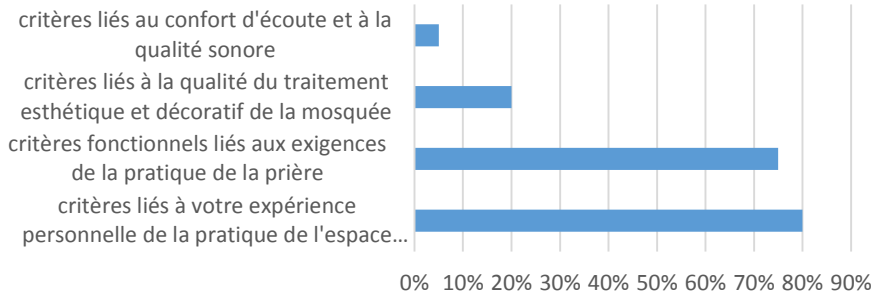
### **2.9.1.a. Résultats liés aux choix conceptuels.**

Le traitement des réponses à la première question, relatant la disponibilité d'un outil de référence sous forme d'un cahier des charges spécifique à la mosquée, a reçu à 100% des réponses affirmant l'inexistence d'un tel outil. Les réponses liées à la nature des critères pris en compte dans la conception des mosquées, montre une prépondérance de choix conceptuels liés aux acquis de la pratique propre de l'espace de la mosquée avec 80% des réponses, suivi de 75% liés aux exigences fonctionnelles de la pratique de la prière et du prêche. Les critères plus spécifiques liés à la forme géométrique et à la structure porteuse font également références aux exigences fonctionnelle et ergonomique de la pratique de la prière ainsi que les caractéristiques mécaniques des matériaux. (Planche 2.15)

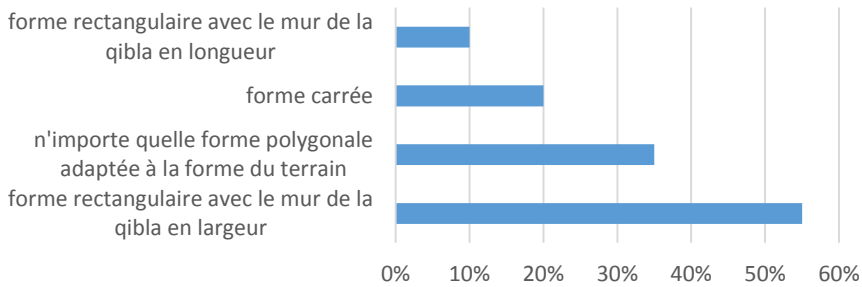
Les questions relatant les critères liés au choix conceptuels, ayant une implication directe sur la qualité acoustique, tel que le volume, la taille de la coupole, les matériaux de finition et la moquette, dénotent une prédominance des critères de nature esthétiques. Ainsi le choix des matériaux de finition et de la moquette est effectué dans 95% des cas par le comité de la mosquée, avec 75% pour des raisons esthétiques et décoratives. Le choix des dimensions de la coupole et de la hauteur du volume vont de pair, avec les exigences liées à l'équilibre proportionnel des façades à 55% pour le volume et 70% pour la coupole. Ainsi pour la détermination de la hauteur du volume, 35% des réponses estiment se référer aux normes d'hygiène relatives au volume d'air par occupant (Planche 2.15).

Concernant l'élément très spécifique du Mihrab, l'ensemble des architectes lui confèrent une première fonction pratique pour indiquer la direction de la qibla, pour 30 % des architectes sa deuxième fonction est esthétique et seulement 25 % considèrent que le Mihrab a une fonction acoustique de rediffusion du son de l'imam vers les fidèles (Planche 2.15).

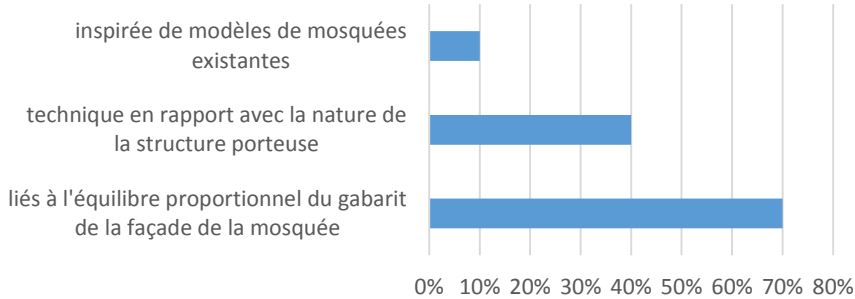
### Critère des choix conceptuels de l'architecte



### forme de la salle de prière



### taille de la coupole



### fonction du mihrab

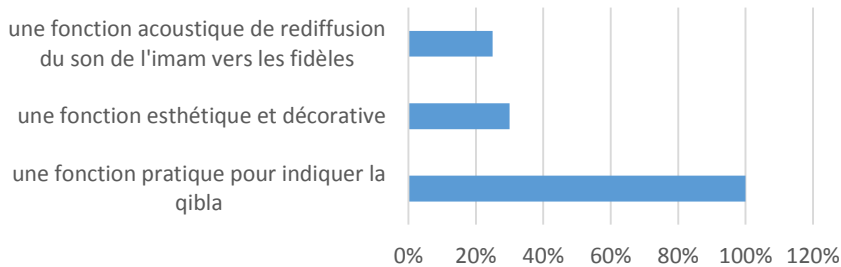


Planche 2.15 : histogrammes illustrant le traitement des réponses des architectes liées aux choix conceptuels.



### **2.9.1.b. Résultats liés aux choix conceptuels en relation avec la composante acoustique.**

La majorité des architectes (48%), considèrent que les choix conceptuels ont un impact « moyen » sur le confort acoustique des mosquées, un écart de 5 % les sépare de ceux qui estiment que cet impact est majeur (43%). Seulement 10 % pensent que cet impact est négligeable. (Planche 2.16)

La question relatant de la nature des composants architecturaux ayant un impact sur le confort sonore, on reçut des réponses différenciées, en fonction des connaissances de l'architecte dans ce domaine. Ainsi 70% des réponses optent pour deux éléments, le type de sonorisation et la nature des matériaux de revêtement de la salle de prière. En deuxième position, la forme de la salle de prière obtient 60% des réponses des architectes. On remarque par contre que la nature du tapis, composant dont l'impact est majeur sur la qualité sonore, n'a reçu que 45% des réponses.

Les questions ont également porté sur le rôle de l'architecte dans le choix d'aménagements tels que le tapis et le type de sonorisation. Concernant le choix du tapis, la majorité des réponses à 95%, estiment qu'il est proposé par le comité de la mosquée en fonction des dons de particulier. Le type et l'installation de la sonorisation est proposé dans 65% des réponses, par le comité de la mosquée ou par le fournisseur de ce matériel. (Planche 2.16)

Les dernières questions de l'enquête, avaient pour but d'identifier le type de méthodes d'assistance à la conception préconisées par les architectes pour la prise en compte du confort acoustique dans leur projet de mosquée. Les résultats révèlent une tendance majoritaire 70%, favorable pour une collaboration étroite avec un ingénieur acousticien. Dans 90% des réponses, les architectes estiment que cette collaboration est nécessaire pour toutes les mosquées. Dans 95% des réponses, les architectes sont favorables pour soumettre leur projet finalisé à un spécialiste en acoustique pour évaluation et correction. Enfin, les réponses à la question qui propose à l'architecte de choisir entre plusieurs outils d'assistance à la conception, s'orientent majoritairement 95% pour le choix des documents techniques de normalisation et de réglementation ; 10% seulement préfèrent disposer d'un cahier des charges détaillé. (Planche 2.16).

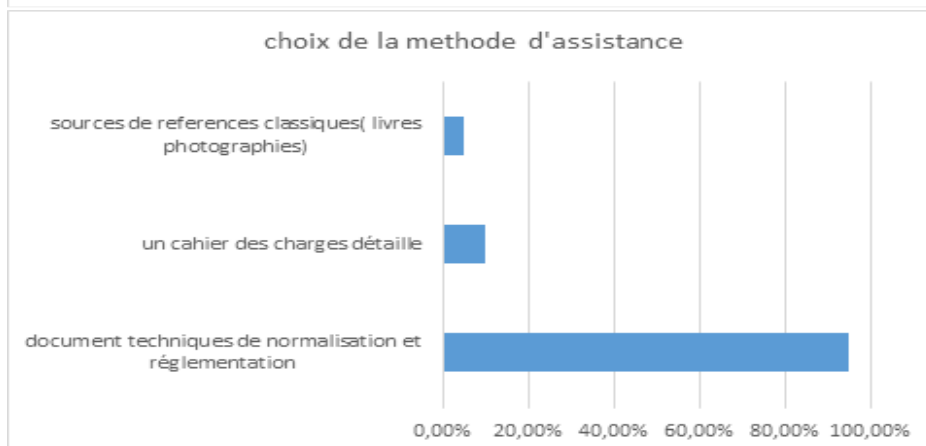
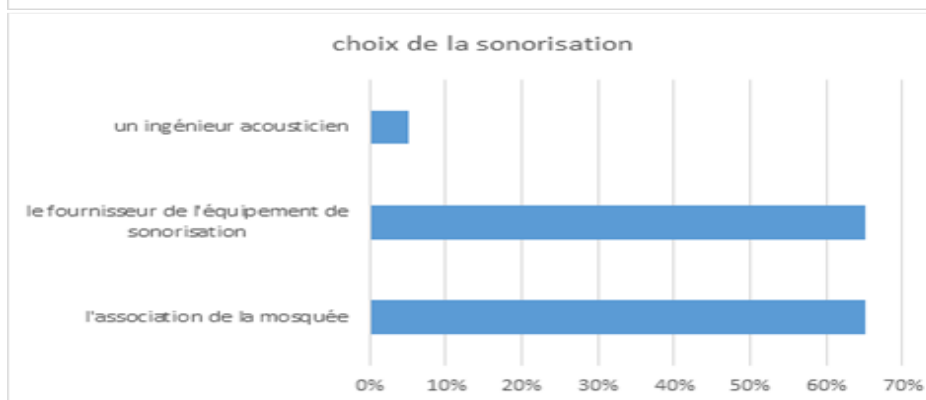
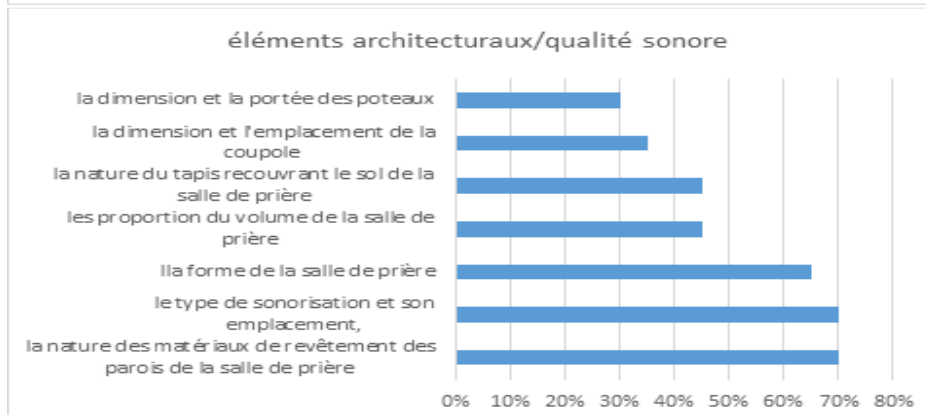
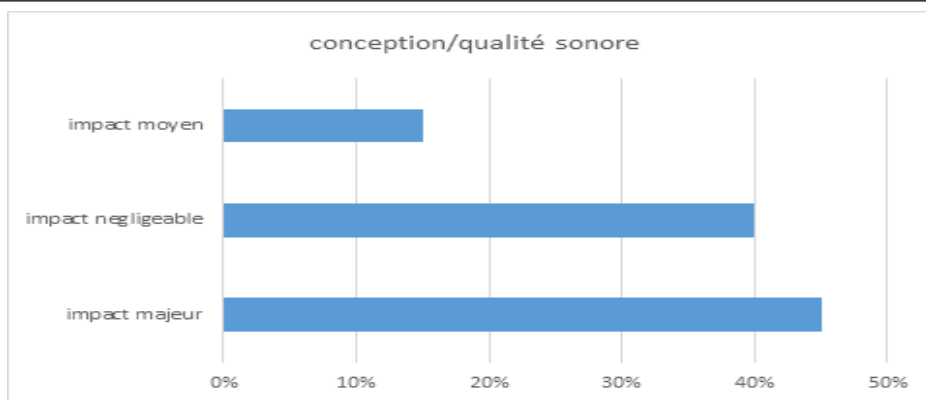


Planche 2.16 : histogrammes illustrant les réponses des architectes liés à la composante acoustique de la mosquée.

## **2.9.2 Conclusion de l'enquête.**

Cette évaluation révèle un grand nombre de difficultés liés à la conception des mosquées, en plus des problèmes de la maîtrise des ambiances acoustiques. On remarque que l'architecte dans la majorité des cas se voit contraint d'adopter certains choix imposés par le comité de la mosquée en fonction des dons, ou par manque de moyens financier, tel que le choix des matériaux de finition, du tapis et de la sonorisation. Cette situation est amplifiée par le fait que la majorité des décisions et des choix conceptuels de l'architecte, ne prennent pas en compte la composante du confort acoustique. Plusieurs facteurs de natures différentes expliquent cet état de fait.

Le premier facteur concerne le statut même de l'architecte dans le cas spécifique de la conception des mosquées. L'architecte en tant que bénévole secondé par le comité de mosquée, ne peut pas assurer pleinement son rôle de chef de projet, il est souvent confronté à des situations conflictuelles avec le comité ce qui le pousse à se désister de son rôle d'architecte, surtout durant le suivis des travaux de construction. En outre la majorité des mosquées construites grâce aux dons de la population, demeurent à l'état de chantier durant plusieurs années, ceci engendre beaucoup de problèmes liés au suivis du chantier qui est laissé au soin de non spécialistes.

Le deuxième facteur concerne les domaines de connaissances des ambiances en général et des ambiances acoustiques en particulier, ces derniers sont assez éloignés des compétences de l'architecte. Cela s'explique par le manque de formation et d'apprentissage autour de ces connaissances dans l'enseignement de l'architecture, ce qui a engendré un manque d'intérêt des architectes pour le domaine des ambiances. Néanmoins malgré cet état de fait, les architectes sont conscients de l'importance de la composante sonore pour la conception des mosquées, et sont favorable à développer leurs compétences dans ce domaine, soit par une collaboration étroite avec des spécialistes, ou bien en exploitant des outils adaptée à la conception architecturale.

Les résultats de cette enquête, ont permis d'identifier les problèmes rencontrés par les architectes dans la conception des mosquées, en orientant notre travail vers les outils suggérés par les architectes, afin de promouvoir l'intégration de la composante acoustique au projet de conception des mosquées.

## **2.10 Conclusion du chapitre 2.**

Le présent chapitre a tenté de retracer l'ensemble des caractéristiques qui définissent notre objet d'étude, qui est la mosquée dans sa relation aux attributs des ambiances sonores. Cette relation est identifiable à travers les niveaux d'influences et d'échanges mutuels qui caractérisent les rapports, entre la mosquée en tant que projet architectural et le confort acoustique en tant que composante sonore. Ces rapports sont définis en terme de contraintes et intentions conceptuels liées aux différentes phases du projet architectural. De fait, il était essentiel de caractériser les méthodes et les outils d'assistance à la conception architecturale appliqués à la composante sonore. Cette caractérisation a permis de mettre en évidence, les apports et les potentialités de ces outils à s'adapter au processus de conception entrepris par les architectes. Dans le but d'évaluer, le potentiel d'assistance de ces méthodes, en tant qu'outil de référence pour les architectes, les résultats de l'enquête ont permis de valider le type de références préconisés. Le chapitre suivant se propose d'évaluer par la mesure et la simulation numérique, la qualité acoustique des mosquées choisies. Cette évaluation sera également l'occasion d'identifier les relations réciproques entre des composants de l'espace architecturale et la composante sonore. Le chapitre prochain, tentera d'établir une lecture globale des corrélations réciproques, entre la composante acoustique et l'espace de la mosquée.

## **Chapitre 3. Etude expérimentale par la simulation et la mesure in-situ.**

### **3.1. Introduction**

Le chapitre précédent a permis d'aborder la question des outils et méthodes d'assistance à la conception pour la maîtrise des ambiances acoustiques, et de préciser la nature des références préconisées par les architectes ; particulièrement en tant que support portant une information technique ou morphologique à intégrer au projet architectural.

L'objectif de ce chapitre, est d'identifier le rôle acoustique des différents composants architecturaux de la mosquée. À cet effet, il sera nécessaire d'élaborer un protocole de l'étude expérimentale pour évaluer et caractériser le confort acoustique de la mosquée. Les résultats de cette phase expérimentale, fournira une base de données scientifique en vue d'établir un guide référentiel pour la maîtrise des ambiances sonore pour la conception des mosquées. Ce chapitre débutera par une présentation des différents aspects architecturaux des mosquées choisies.

### **3.2 Spécificités architecturales et architectoniques des mosquées en Algérie.**

Les spécificités architecturales des mosquées contemporaines en Algérie, s'inscrivent dans des choix architecturaux et architectoniques, que l'on retrouve dans les cinq approches définies au deuxième chapitre. L'architecture des mosquées en Algérie, possède des spécificités distinctives, reflet de son identité culturelle et de son histoire. La majorité des mosquées construites après l'indépendance en Algérie, font références à une typologie architecturale inspirée du plan à hypostyle traditionnel « que l'on retrouve au Moyen-Orient et au Maghreb » (Senhadji K., 2011). La conception des mosquées contemporaines en Algérie, se composent des principaux espaces suivants :

- La salle de prière de forme orthogonale simple carrée ou rectangulaire et rarement de forme polygonale complexe, elle se distingue par un mur frontal celui de la qibla (direction de la Mecque) aménagé d'un mihrab et d'un minbar. La cour jouxtant la salle de prière a complètement disparu remplacée par une galerie d'entrée aménagée sur une façade ou plus.
- La mezzanine : étage conçu comme extension verticale de la salle de prière, couvrant généralement les parties latérales et arrière de cette dernière et ouvert dans les travées supportant la coupole. La mezzanine est habituellement affectée à la prière des femmes.
- L'espace d'ablutions (maidha) : espace humide possédant un double accès sur la salle de prière et sur l'extérieur de façon direct ou bien à travers des escaliers.

Les éléments du volume architectural qui distinguent les mosquées sont, la grande coupole qui couvre l'espace de prière, un minaret de forme carré, le portique en arcature protégeant les entrées à la mosquée. La cour intérieure a complètement disparu de la conception de l'espace de la mosquée contemporaine en Algérie. Le caractère architectonique particulier de la mosquée se distingue dans la nature des matériaux de finition, ces derniers doivent allier facilité d'entretien, durabilité et esthétique, comme le marbre la faïence et les moulures décoratif de plâtre ou les sculptures sur le bois. Le sol de la salle de prière est toujours recouvert d'un tapis ou bien de moquette ; les murs se composent en partie basse par un placage en marbre ou faïence avec finition de peinture en hauteur. Les décorations en plâtre, recouvrent généralement les plafonds, les poutres, la coupole et quelquefois les murs et les poteaux.

### **3.2.1 Choix des mosquées étudiées.**

Les critères qui ont guidés notre choix, étaient d'ordres méthodologiques liés la spécificité de notre champ de recherche. L'évaluation de la composante acoustique dans l'espace architecturale fait référence à deux éléments clé de l'espace, à savoir la taille du volume, certains choix conceptuels ainsi que la nature des matériaux. On a donc entrepris une étude statistique sur l'ensemble des mosquées construite dans la wilaya de Constantine, en prenant la taille de la mosquée comme critère de classement. Les mosquées ont été classées en quatre groupes, avec des estimations de surfaces comprises entre, moins 250 m<sup>2</sup> à plus 1000 m<sup>2</sup>. Le volume des mosquées classées a été calculé en lui affectant une hauteur de 9 m (c'est-à-dire un rez-de-chaussée plus un étage) .L'objectif de cet étude est de fonder notre choix du corpus d'étude sur le groupe de mosquées le plus représentatif, c'est-à-dire comptant le plus grand nombre de mosquées construite dans la wilaya de Constantine. Nous avons donc exclue de notre choix, l'ensemble des mosquées anciennes implantées dans la vieille ville de Constantine, également les Eglises converties en mosquées, construites durant la période coloniale, ainsi que la grande mosquée Emir Abdelkader. Selon le tableau et l'histogramme de la (planche 3.1), illustrant ce classement, le groupe représentatif est constitué des mosquées dont la surface bâtie est comprise entre 500 et 1000 m<sup>2</sup> et d'un volume de 4500 à 9000 m<sup>3</sup>. Les deux mosquées choisis pour l'étude expérimentale, appartiennent à ce groupe.

Les mosquées choisis « Ibn Arabi » et « Ennour », se situent dans deux communes différentes, respectivement « Zouaghi » et « Ain Smara ». L'architecture de ces mosquées fait référence à l'approche conventionnelle ou adaptative<sup>10</sup> , c'est-à-dire adoptant un vocabulaire stylistique

---

<sup>10</sup> Voir sous-chapitre 2.4.

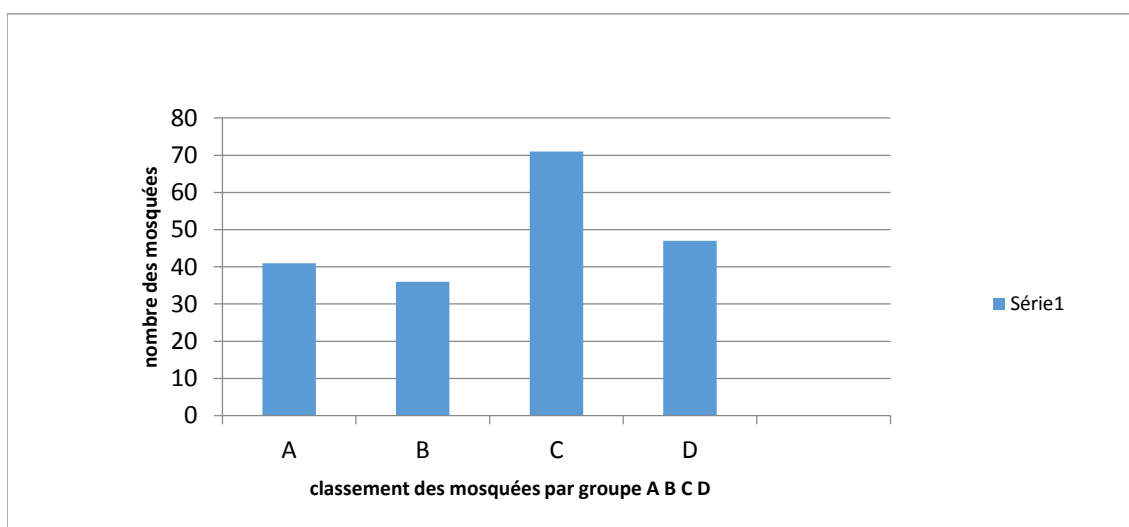
inspiré des mosquées traditionnelles avec une technologie de mise en œuvre et des matériaux modernes. Ainsi (comme la majorité des mosquées construites en Algérie) les deux mosquées présentent des similitudes dans la conception architecturale et architectonique. La conception de l'espace de prière comporte quelques différences, liées particulièrement au dimensionnement de la structure porteuse ; en effet la mosquée « Ennour » possède une salle de prière dégagée sous la coupole, cette dernière est supportée par quatre poteaux espacés de 13 mètres. La conception de la salle de prière dénudée de poteaux représente vis-à-vis du confort acoustique un cas d'étude très intéressant à explorer. Cet aspect conceptuel très peu répandue dans nos mosquées, a motivé notre choix pour l'investigation acoustique de ce type de mosquée. L'autre caractère particulier, lié à la conception de l'espace de prière caractérisant la deuxième mosquée « Ibn-Arabi », concerne la typologie des ouvertures, les fenêtres sont conçues sous forme de grandes baies disposées en bandes verticales continues, sur l'ensemble des façades. Ce type d'ouvertures constitue également un critère de base pour le choix de cette mosquée. Enfin un autre critère motivant le choix de ces deux mosquées, est qu'elles ont été financées par un seul donateur et se trouvaient totalement finalisées malgré leur construction récente.

Tableau représentant un classement des mosquées en fonction de leurs volumes.

les groupes de mosquées associées à leur surface bâtie et à leur volume				
Les quatre groupes de mosquées	A	B	C	D
Volume en m <sup>3</sup> de chaque groupe	<2250	>2250<4500	>4500<9000	>9000
Surface en m <sup>2</sup> de chaque groupe	<250	>250<500	>500<1000	>1000

Tableau représentant un classement par groupe du nombre de mosquées implantées dans la wilaya de Constantine.

Le nombre de mosquée associé à chaque groupe.				
Les cinq groupes	A	B	C	D
Nombre de mosquées par catégorie	41	36	71	47



Histogramme illustrant le classement des mosquées de la wilaya de Constantine par catégories de volume (Données recueillis auprès de la Direction des affaires religieuse et des wakfs de la wilaya de Constantine 2013)

Planche 3.1 : Classement du nombre de mosquées en fonction de leurs volumes implantées dans la wilaya de Constantine. (Auteur)



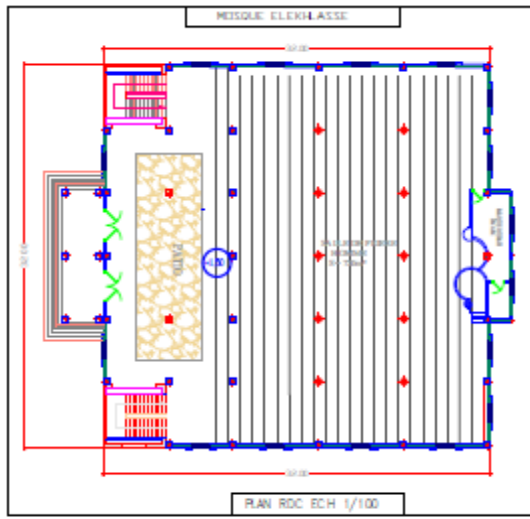
## **A. La mosquée Ibn-Arabi**

Inaugurée en juillet 2011 la mosquée Ibn Arabi fait partie des mosquées construites par un seul donateur, ce dernier prend à sa charge l'ensemble des ouvrages jusqu'aux travaux de finitions. Ce mode de financement individuel, a l'avantage de réduire considérablement la durée de construction de la mosquée. En effet de nombreuses mosquées financées par des dons de la population, souffrent d'un état de chantier, perpétuel, pouvant s'étaler sur des dizaines d'années, polluant ainsi le paysage urbain et offrant une image inappropriée de cet édifice qu'est la mosquée.

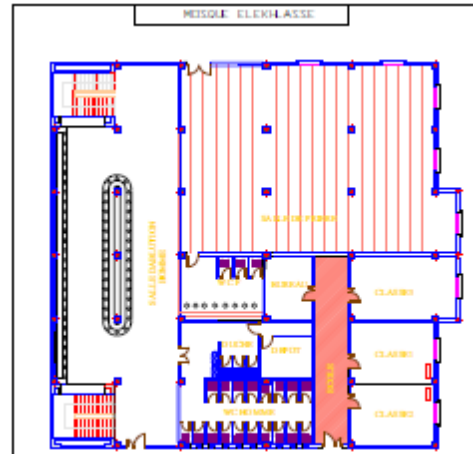
La mosquée Ibn Arabi se situe à la périphérie d'un lotissement résidentiel à caractère individuel appelé « cité Khaznadar ». Implantée à une vingtaine de mètres de la ligne de tramway et de la route nationale 27 qui traverse Constantine. Cette proximité aux voies de communications, lui confère un avantage de visibilité et une facilité d'accès.

La mosquée Ibn Arabi est surnommée « le petit émir » pour son architecture inspirée de la grande mosquée de l'Emir Abdelkader. Situé sur un terrain en pente, Elle se compose d'un entresol qui comprend la salle des ablutions, la salle de prière des femmes et les salles de cours. Le rez-de-chaussée affecté à la prière des hommes, se compose de la salle de prière avec accès principal, surmonté d'une mezzanine à l'étage. La mosquée possède une grande coupole positionnée sur l'axe de symétrie de la façade principale encadré par deux minarets latéraux. Les quatre façades de la mosquée, comportent de grandes baies vitrées verticales. (Planche 3.2)

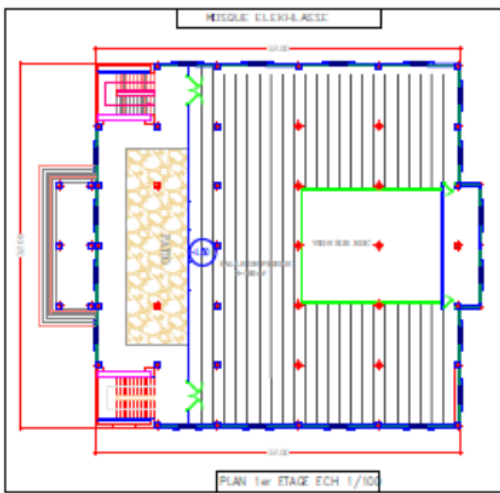
L'accès à la salle de prière au rez-de-chaussée, se fait à travers un sas sous un espace en porche et deux grands portails en bois. La salle de prière est de forme carrée de 30 mètres de côté, surmonté d'un étage en mezzanine couvrant toute la surface de la salle de prière à l'exception de deux ouvertures (sur le R-D-C), positionnées à l'entrée et sous la coupole. La salle de prière est richement décorée, par du plâtre sculpté au niveau des plafonds et du mur de la qibla. (Planche 3.3) Les poteaux et les murs à 1,50 m sont recouverts de carreaux de faïence. Le sol est recouvert d'un tapis disposé en panneaux parallèles à la qibla pour aider à la formation des rangs de fidèles.



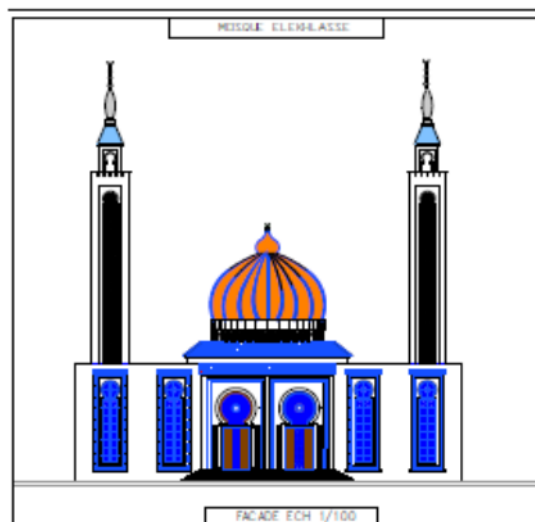
Plan du rez-de-chaussée



Plan de l'entresol



Plan de l'étage



Vue de la façade principale

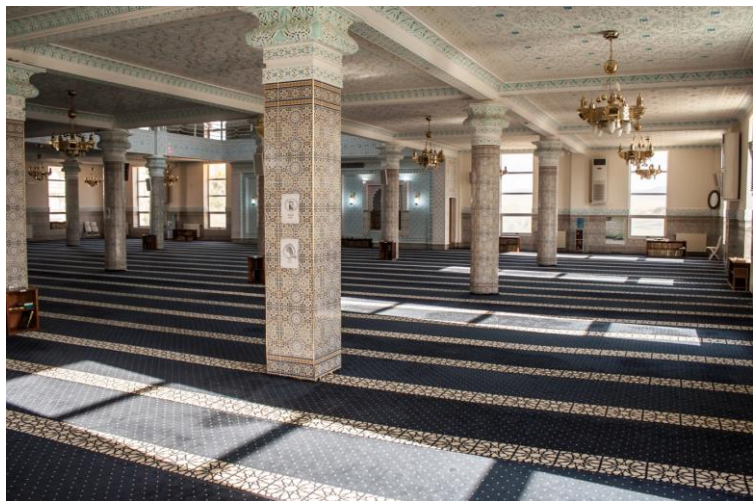
Planche 3.2 : différents plans et façade principale de la mosquée Ibn-Arabi.



Vue de la coupole et de l'ouverture de la mezzanine en balcon sur la salle de prière du RDC.



Vue du mur de la qibla comportant la niche du Mihrab et le Minbar encastré dans le mur.



Vue de la salle de prière au RDC à partir du mur latérale, on peut remarquer sur le tapis l'intrusion assez profonde du soleil à partir des grandes baies verticales.

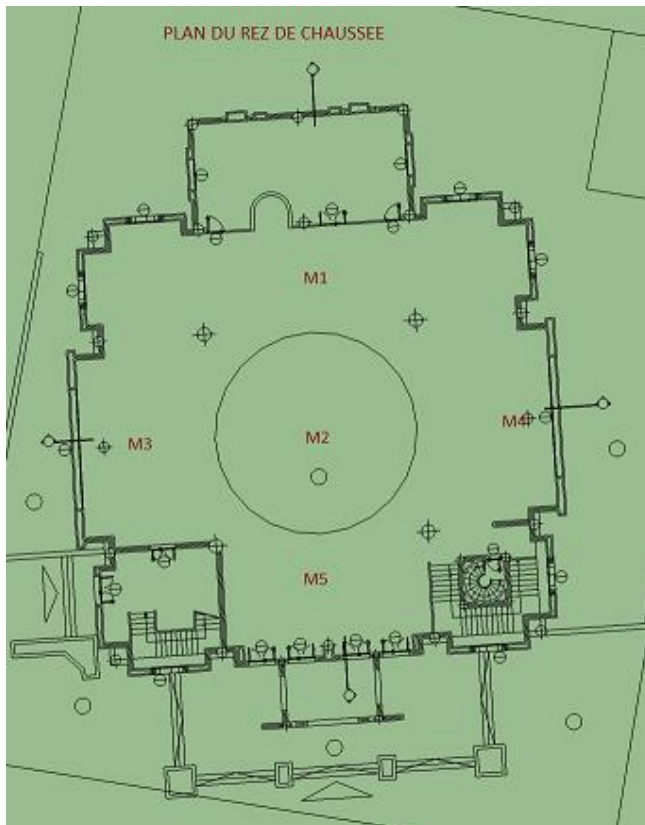
Planche 3.3 : prises de vues illustrant la salle de prière de la mosquée Ibn-Arabi (Auteur).

## **B. La mosquée Ennour.**

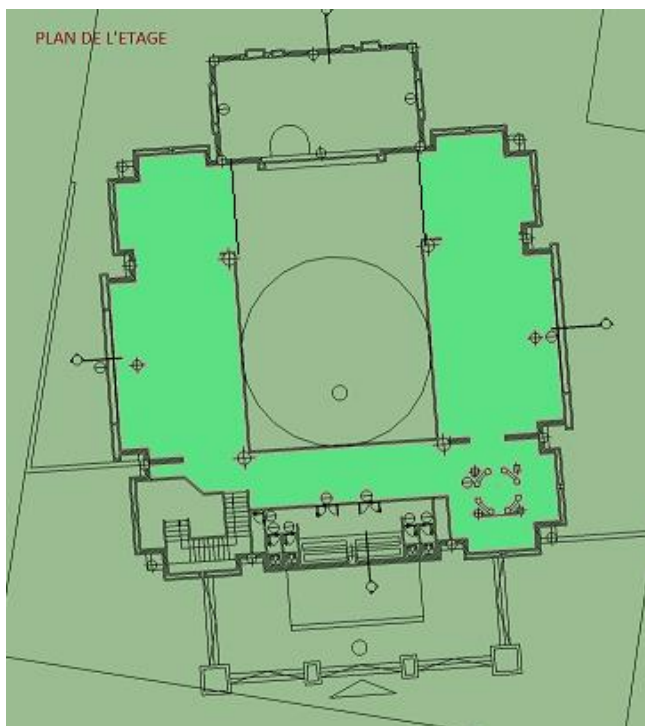
Inaugurée au mois de juin 2013 la mosquée Ennour comme Ibn-Arabi, fait partie des mosquées construite par un seul donateur, ce dernier prend à sa charge l'ensemble des ouvrages jusqu'aux travaux de finitions. La mosquée Ennour se situe dans la commune d'Ain Smara, une banlieue située à une vingtaine de kilomètres de Constantine. La mosquée Ennour est implantée à l'intérieur d'un lotissement individuel éloignée des principales voies de communication.

La mosquée Ennour a une surface moins importante que la mosquée Ibn-Arabi. Située sur un terrain en pente, Elle se compose d'un entresol qui comprend la salle des ablutions des hommes. Le rez-de-chaussée affecté à la prière des hommes, se compose de la salle de prière avec accès principal, et également un accès latéral pour les femmes. La salle de prière des hommes est surmontée d'une mezzanine couvrant les travées latérales et ouverte au centre sous la coupole. (Planche 3.4) La mosquée possède une grande coupole positionnée au centre de la salle de prière, supportée par quatre grands poteaux. En fait la conception de cette mosquée, s'inspire des mosquées composées « d'une salle de prière centrale surmontée d'une coupole aux dimensions généralement importante que l'on trouve principalement en Turquie et en Asie centrale, » (Bayle, M.H. ,2007). Comparée à la mosquée Ibn-Arabi comportant un grand nombre de poteaux, la mosquée Ennour possède une salle de prière dégagée, avec seulement les poteaux supportant la coupole.

L'accès à la salle de prière au rez-de-chaussée se fait par un allongement du trottoir directement de la rue par un porche .La salle de prière est de forme carrée de 25 mètres de côté, surmonté d'un étage en mezzanine pour les femmes. La salle de prière possède une décoration moins riche que la mosquée précédente, mais constituée de même type de matériaux. Les plafonds sont décorés très simplement en plâtre. Les poteaux sont totalement recouverts de faïence. Les murs extérieurs comportent des fenêtres de taille ordinaire, recouvert de carreau de faïence jusqu'à 1,50 m du sol. Le sol est recouvert d'un tapis disposé en panneaux parallèles à la qibla pour aider à la formation des rangs de fidèles. La coupole comporte des décorations de motifs en mosaïques simplement peintes sur une surface lisse sans reliefs. (Planche 3.5)



Plan du Rez-de-chaussée de la mosquée Ennour. Le plan de forme carré comporte une grande coupole centrale supportée par quatre poteaux.



Plan de l'étage de la mosquée Ennour, la mezzanine apparaît en couleur verte foncée.

Planche 3.4 : plan du R-D-C et de l'étage de la mosquée Ennour située dans la commune d'Ain-Smara



Prise de vue de la façade principale de la mosquée Ennour.



Vue intérieure de la salle de prière homme, avec le mur de la qibla en face et l'étage en mezzanine sur les deux cotés latéraux.



Vue intérieure de la salle de prière avec les portails de l'entrée principale et l'étage en mezzanine. La coupole centrale couvre la salle de prière.

Planche 3.5 : prises de vues illustrant l'espace intérieur et l'extérieur de la mosquée Ennour (Auteur).

### **3.3 Présentation du logiciel de prédiction acoustique EASE4.4.**

#### **Introduction.**

Au cours de ce chapitre, sera présenté le processus d'expérimentation suivi pour la caractérisation acoustique des mosquées choisies. Il sera question de définir le protocole expérimental utilisé pour les deux processus d'évaluation, simulation acoustique et mesure in-situ. Durant cette phase expérimentale, l'objectif étant de caractériser de façon scientifique et rigoureuse, la qualité acoustique des deux mosquées investiguées. Cette évaluation se fera par le calcul de quatre critères objectifs spécifique au discours parlé.<sup>11</sup>

Le processus d'expérimentation est clôturé par une phase d'analyse des résultats, afin de vérifier la validité de notre modèle sous EASE en comparaison avec les résultats des mesures in-situ. Par la suite on procédera à l'évaluation des différents critères acoustiques en les comparant aux valeurs optimales propre au discours parlé. Cette phase expérimentale sera suivie d'une évaluation objective de la qualité acoustique des mosquées, élaborée à travers une enquête auprès des fidèles qui fréquentent régulièrement les deux mosquées. L'analyse des résultats issus du questionnaire, permettra de conforter les résultats de l'expérimentation, pour présenter des résultats évalués au moyen des systèmes de mesures in-situ, de calculs simulés et d'enquêtes.

#### **3.3.1. Introduction du logiciel EASE4.4.**

Les logiciels de simulation acoustique des espaces sonores sont des outils très efficaces lorsqu'il s'agit de prédire le comportement d'une salle à des faits acoustiques. On peut en effet, par la modélisation numérique évaluer à l'avance les critères objectifs et dans certains cas, affranchir l'acousticien de l'expérimentation sur maquette difficilement réalisable. Après une introduction du logiciel de prédiction acoustique EASE4.4, les différentes étapes suivies pour modéliser les deux mosquées seront décrites. Enfin les résultats fournis par notre modèle seront présentés.

L'absence de procédés, autorisant une modélisation interne dans les deux logiciels de simulation acoustique (I-Simpa et Catt Acoustic) crée des problèmes d'inadéquation des données et du temps consommé. Ainsi le logiciel de simulation EASE 4.4 permet de répondre aux spécificités du travail de l'architecte, en offrant une interface de saisie de la géométrie du modèle intégrée et pratique. EASE offre la possibilité de la modélisation des espaces, des sources acoustiques et électro-acoustiques et des récepteurs, il permet de calculer de nombreux

---

<sup>11</sup> Voir sous-chapitre 1.5.

critères acoustiques. Ce logiciel peut fournir une simulation d'écoute d'une ou de plusieurs sources, à différents points d'observation de l'espace ; ce qui permet d'avoir un aperçu sonore général de l'espace simulé.

Les calculs acoustiques effectuées par ce logiciel, se basent sur les techniques de l'acoustique géométrique, et offre deux type de prédictions acoustiques :

- Le mapping, ou cartographie des différents paramètres acoustiques grâce à un procédé de tracés de rayons acoustiques.
- Les calculs détaillés des différents critères acoustiques, sous forme de diagrammes et de courbes et également sous forme de fichiers texte. Les résultats apparaissent aussi dans des visualisations 2D et 3D.

Comme tout logiciel de simulation, les fonctionnalités pris en charge par EASE débute par la saisie des paramètres d'entrée de la simulation, qui sont de deux types :

Les paramètres géométriques, concernant la saisie de la géométrie de la salle, ainsi que la position des sources et des récepteurs.

Les paramètres non géométriques, relatifs aux propriétés acoustiques des matériaux (coefficients d'absorption et de diffusion), ainsi que la définition des caractéristiques acoustiques des sources et des récepteurs. La saisie de ces paramètres doit se faire avec un certain degré de précision, pour contribuer à des résultats de qualité, à cet effet, les différentes étapes, seront présentées plus en détails

#### **A. Saisie de la géométrie de la salle.**

Cette opération part du principe que le modèle numérisé résultant se doit de reproduire le plus fidèlement possible toutes les caractéristiques de l'espace qu'il représente. Cette saisie repose directement sur différents mode de représentation de l'architecture à savoir les plans les coupes et les façades. Il reste néanmoins nécessaire d'effectuer des relevés sur site de certains détails qui ne figurent pas sur ces dessins. Le relevé architectural reste une opération nécessaire, puisque chaque matériau qui compose l'espace en question, doit être saisi de façon exacte. L'interface graphique d'EASE, permet un suivi visuel de la construction du modèle informatique. La saisie des surfaces courbes, comme le mihrab et la coupole, sont représentés par un ensemble de polygones. Il est important de noter que les volumes modélisés afin d'être utilisables par EASE (ou tout autre logiciel de simulation acoustique), doivent être représentés sous forme de facettes coplanaires. La construction du modèle, apparait comme une géométrie



volumique en une seule poly ligne, qui définit toutes les cotes des surfaces qui composent le modèle architectural. La simulation acoustique ne prend en compte que les surfaces intérieures, l'espace architectural est ainsi modélisé sous forme d'un volume surfacique sans épaisseur avec une seule peau.

En fin de modélisation, il est indispensable de vérifier le nombre total des facettes que comprend la géométrie modélisée ; afin de ne pas dépasser le nombre adéquat de facettes, posé par la limite du logiciel pour le calcul acoustique. A cet effet pour respecter ce principe de fonctionnement, on allège le nombre de facettes des surfaces courbes par une opération qui consiste à redéfinir les propriétés géométriques de ces volumes.

La conception architecturale des mosquées, comprend toujours des formes courbes, comme une ou plusieurs coupes et le mihrab, ces formes complexes, créent des problèmes car les procédés informatiques de simulation acoustique ont besoin de surfaces planes. Il est donc nécessaire, pour aborder au mieux les surfaces courbes, de travailler avec un grand nombre de facettes. « Par ailleurs le nombre élevé de facettes pose des problèmes informatiques de mémoire. Dans tous les cas la simplification du modèle architectural est indispensable car toute modélisation numérique implique une simplification et une réduction de la réalité » ( Kouzeleas. S., 2002). Les données géométriques, doivent également décrire de façon précise la source et les récepteurs présents dans la mosquée. La saisie de ces informations numériques se fait sur un ensemble de fichiers, décrivant la directivité, l'orientation et le positionnement de ces transducteurs. Seront définis ainsi, le type, l'emplacement, l'orientation et la directivité de la source, ainsi que les différents emplacements des récepteurs ou les points d'écoute dans l'espace.

### **B. Saisie des propriétés acoustique des surfaces**

Tous les matériaux qui constituent et couvrent chacune des facettes du projet modélisé, possèdent des propriétés acoustiques d'absorption et de diffusion, définies par bande d'octave sur le spectre des fréquences allant de 125 à 10000 Hz. les coefficients d'absorption sont donnés par EASE sous la forme des coefficients d'absorption de Sabine. La formalisation de la théorie de Sabine, suppose l'établissement d'un champ sonore diffus, c'est-à-dire obtenu selon un principe de mesure ne prenant pas en compte l'angle d'incidence. La prise en compte de l'angle d'incidence est appliquée aux hypothèses de réflexion spéculaire, ce modèle de réflexion n'est pas pris en compte dans le protocole de caractérisation acoustique des matériaux.

Concernant la prise en compte des coefficients de diffusion, il n'existe pas de vrai consensus quant à leur définition précise, et au protocole de mesure à employer. Le processus de simulation acoustique, considère que l'énergie totale réfléchié par une quelconque surface est amoindrie de façon proportionnelle au coefficient d'absorption. Les coefficients d'absorption sont donc affectés directement à partir de la base de données d'EASE ou tirés d'une documentation spécifique.

### **C. Lancement du calcul des critères acoustiques.**

Une fois la saisie de tous les caractéristiques géométriques et acoustiques terminée le logiciel passe à une étape final, qui consiste à vérifier les incorrections survenues durant la modélisation des surfaces, des arrête et des points. C'est une étape décisive, qui peut s'étaler dans le temps, puisque le lancement du processus calcul, ne peut s'exécuter qu'au terme de la correction complète du modèle géométrique construit.

La plupart des résultats sont visibles sur des diagrammes, courbes et autres cartes colorées mais également synthétisés dans des fichiers texte. Les principaux résultats utilisés sont les valeurs des critères subjectifs tel que le C50 ou le STI, les valeurs des indices objectifs le Tr Sabine et Eyring, le T30 et l'EDT. Le modèle architectural est visualisé en 2D et 3D sous forme de facettes colorées ou transparent avec seulement des arêtes.

En conclusion, l'étude virtuelle des mosquées sous EASE se déroulera selon trois phases principales : la modélisation géométrique de l'architecture, l'entrée des paramètres d'absorption et de diffusion des matériaux constitutifs de la mosquée, l'entrée des paramètres de la source sonore et des points de réceptions.

#### **3.3.2. Conception du modèle numérique des mosquées.**

Pour créer le modèle numérique de chaque mosquée, les documents de représentation graphique utilisés pour chaque mosquée, sont les plans, coupes, façades et détails de constructions.<sup>12</sup> Le modèle numérique réalisé doit comporter tous les détails de l'architecture intérieure de l'espace, forme, dimension et nature des matériaux. Ces informations ont été recueillies par des relevés in-situ effectués dans chaque mosquée avec différentes prises des photographies de l'intérieur et de l'extérieur. (Planches 3.3 et 3.5)

---

<sup>12</sup> Voir planche 3.2 et planche 3.4 du sou-chapitre 3.2.1.

### A. Entrée des paramètres d'absorption et de diffusion des matériaux.

Il existe une banque de données sous EASE dans laquelle des paramètres d'absorption et de diffusion sont entrés. Cependant pour plus de précision, les paramètres fournis par des sites spécialisés<sup>13</sup> ont été également utilisés.<sup>14</sup>

### B. Les caractéristiques de la source sonore de la zone d'audience et des récepteurs.

Dans le but de comparer les valeurs mesurées in situ et les prédictions d'EASE, on procèdera à la définition des coordonnées géométriques de la source virtuelle et des points de réception dans la salle de prière aux endroits où ont été faites les mesures. On pourra ainsi comparer les résultats fournis par le logiciel et ceux fournis par les mesures réelles. Les positions des récepteurs ont été choisis en rapport avec les caractéristiques architecturales de la mosquée, afin d'explorer l'impact de ces derniers sur la qualité acoustique des différents emplacements. On a donc choisi pour les deux mosquées, cinq emplacements, dont trois sur l'axe centrale perpendiculaire au mur de *la qibla*, et deux sur les deux cotés latéraux.

La source sonore est placée à l'endroit où se tient l'imam, avec un spectre représenté dans le tableau ci-dessous.

Spectre (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Voix Imam (dBA)	40	56	62	61	58	52

Pour calculer le niveau sonore dans la mosquée ainsi que les différents paramètres acoustiques, EASE 4.4 permet de définir des récepteurs ponctuels en différents endroits de la salle de prière, également des récepteurs surfaciques positionnés au niveau de la zone d'audience. Dans le but de cartographier les différents paramètres acoustiques, la zone d'audience a été placée à 1 mètre du sol (distance intermédiaire entre la position assise et debout)

<sup>13</sup> [www.acousticalsurfaces.com](http://www.acousticalsurfaces.com)

<sup>14</sup> Voir annexe 4.

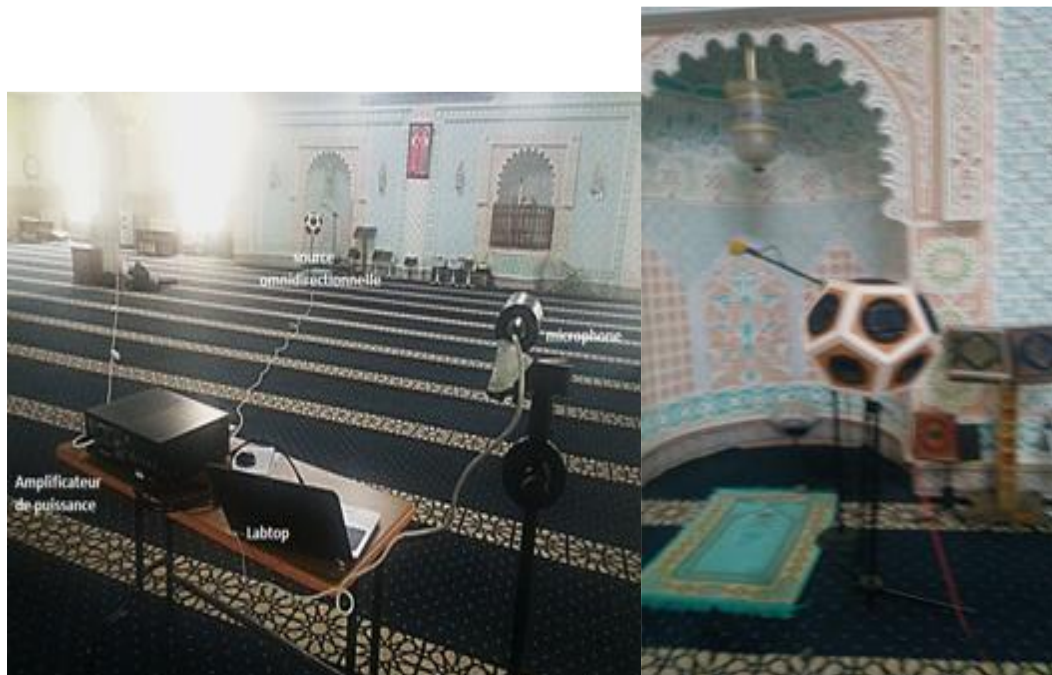
### **3.3.3. Méthode des mesures in-situ.**

Pour rendre compte des ambiances sonores à l'intérieur des mosquées sélectionnées, on a entrepris deux procédures de mesures. La première par la méthode du ballon de baudruche, la seconde en utilisant la source omnidirectionnelle. Toute salle peut être considérée comme un système de transmission acoustique, la réponse impulsionnelle donne une description complète des changements subis par un signal sonore quand il se déplace d'un point à l'autre. A travers cette réponse impulsionnelle, des paramètres acoustiques pertinents peuvent être dérivés de cette réponse. Avec ces méthodes, on a calculé le Tr 30 au cours de la première série de mesures. Au cours des mesures suivantes avec la source omnidirectionnelle, on a élargi le calcul vers d'autres paramètres intéressants parmi lesquels, les paramètres de l'intelligibilité, les paramètres de réverbération, les paramètres énergétique. Pour chaque mosquée, les mesures seront effectuées à l'intérieure de la salle de prière vide avant la prière du *dohr* à cinq endroits différents. Le niveau sonore du bruit de fond sera également mesuré aux mêmes emplacements.

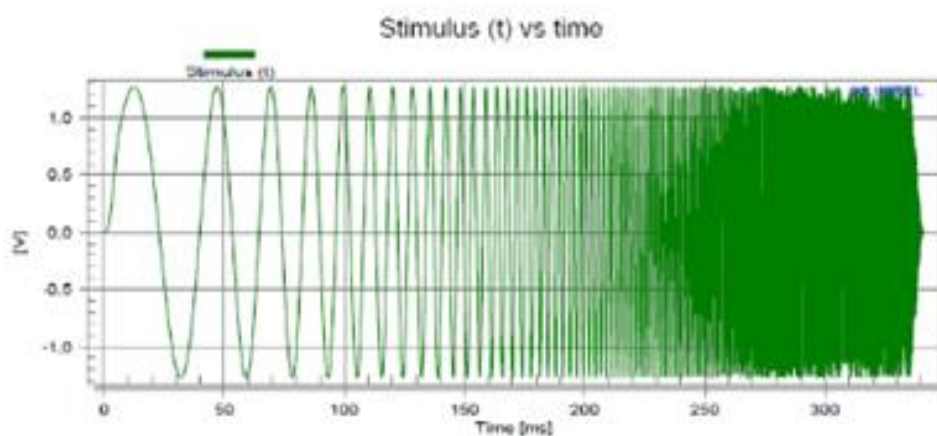
Plusieurs méthodes impulsionnelles peuvent être appliquées pour caractériser les salles (Hidaka, Y, et al 1991) cependant, concernant ce travail nous donnerons juste les caractéristiques de la méthode sinus balayé (sweep) utilisée pour la caractérisation des mosquées Ibn Arabi et Ennour. En utilisant un balayage fréquentielle à croissance logarithmique du temps, il est possible d'exciter la salle sur toute la bande audible en une seule excitation sans avoir recours à produire plusieurs excitations pour balayer toute la bande audible. (Planche 3.6)

#### **A. L'instrumentation utilisée pour les deux méthodes de mesure.**

Les premières mesures, ont été effectuées avec une émission d'un bruit blanc et éclatement d'un ballon de baudruche ce dernier engendre un son proche d'une impulsion de Dirac qui comporte le spectre de toutes les fréquences audibles à la même intensité acoustique et permet donc d'exciter une salle à toutes les fréquences. L'impulsion sera reçue sur le microphone et enregistré sur la carte d'acquisition du signal intégrée au PC. Les mesures suivantes ont été effectuées grâce à un signal sweep logarithmique généré par le logiciel Easera de mesure et de traitement du signal. 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 mosquée. Cette impulsion est ensuite envoyée à une enceinte acoustique omnidirectionnelle qui envoie le signal sonore dans toutes les directions. Pour les deux méthodes, L'interprétation de la réponse de la salle de prière à l'explosion et à l'impulsion, nous fournira les valeurs des différents paramètres acoustiques.



L'instrumentation utilisée dans les deux mosquées pour leur caractérisation comprenant : Le laptop pour la génération du son impulsionnel et l'enregistrement ; un microphone, un amplificateur de puissance et une source omnidirectionnelle pour l'excitation de la salle



Représentation graphique de seen sweep logarithmique.

Planche 3.6 : Représentation de l'instrumentation et de la méthode, utilisées pour les mesures in-situ dans les deux mosquées.

## **B. Caractéristique 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<sup>15</sup>. Tous les haut-parleurs de la source sont reliés par un réseau série–parallèle assurant leur fonctionnement en phase et une adaptation d'impédance de  $4 \Omega$  à l'amplificateur de puissance. 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 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  $7.5^\circ$ . Le tableau de mesure<sup>16</sup> comprend les réponses à 500Hz, 1KHz et 4KHz. Sa réponse omnidirectionnelle dans un plan horizontal est illustré en figure 1 de la planche 3.7. 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 présentées seront donc compatibles et normalisées aux normes des mesures acoustiques

---

<sup>15</sup> La construction de la source a été faite sur la base d'un dodécaèdre. En feuille de contreplaqué de 0.8cm.

<sup>16</sup> Le tableau des mesures est en annexe 1.

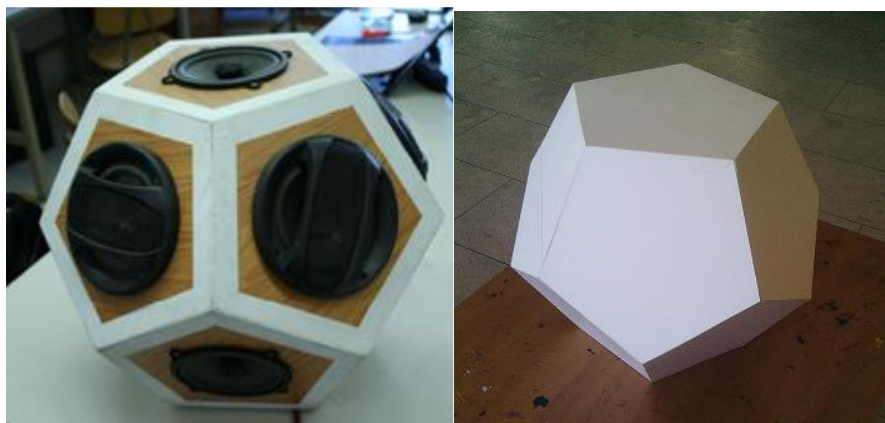


Figure 1 Source omnidirectionnelle et son prototype en carton.

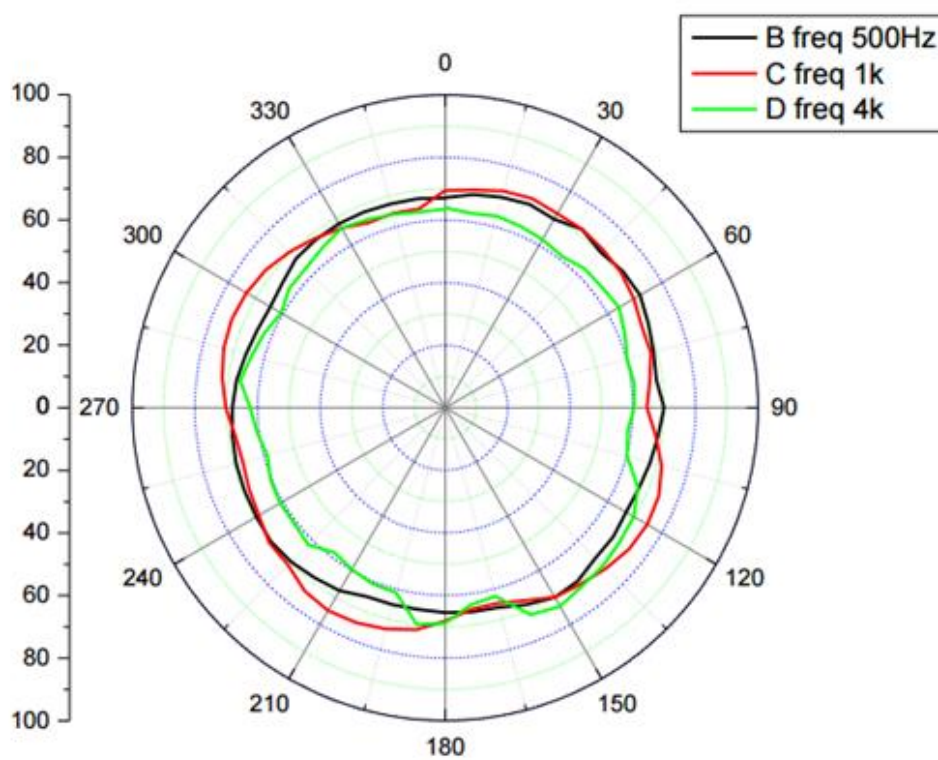


Figure2. Directivité de la source aux fréquences 500Hz, 1000 Hz et 4000 Hz.

Planche 3.7 : illustration de la source omnidirectionnelle et de sa directivité.

### 3.3.4. Résultats des mesures in-situ de la mosquée Ibn- Arabi.

Le protocole de mesure présenté au début de ce sous-chapitre a été effectué pour cinq positions de mesure comme illustré sur le plan de la salle de prière de la planche 3.8. Les résultats des critères acoustiques mesurés (avec la source omnidirectionnelle) sur les cinq récepteurs, pour la fréquence 1000 Hz apparaissent sur le tableau 1 de la planche 3.8.

Le tableau ci-dessous, comporte les résultats du Tr30 (mesurés avec le ballon) sur les cinq récepteurs pour toutes les fréquences.

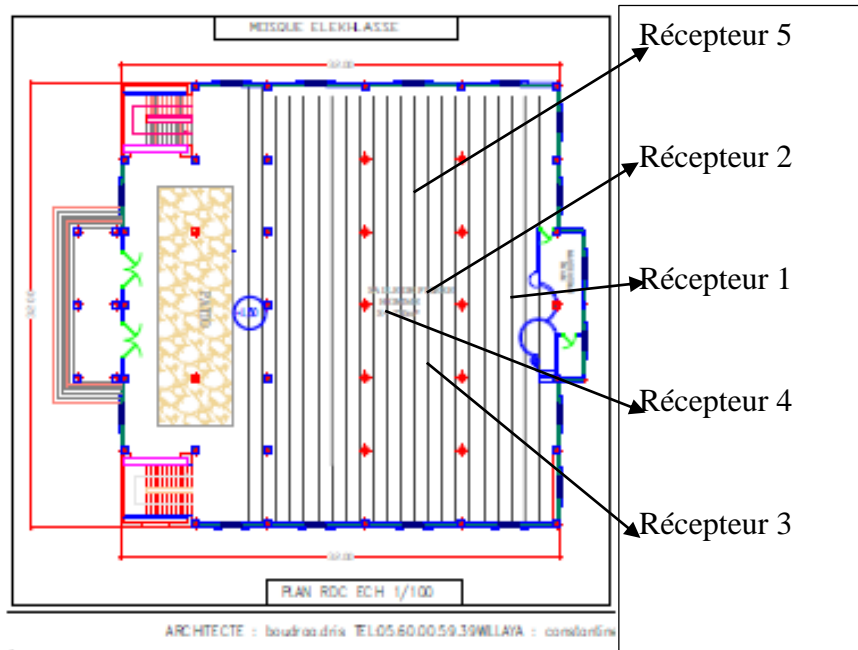
Les valeurs du Tr 30 mesurés avec la méthode du ballon sur les cinq récepteurs				
Fréquence (Hz)	500	1000	2000	4000
Proche de l'imam	<b>3,67s</b>	<b>1,79s</b>	<b>1,55s</b>	<b>1,39s</b>
Sous la coupole centre	<b>2,42s</b>	<b>1,96s</b>	<b>1,51s</b>	<b>1,31s</b>
Sous la coupole droite	<b>2,75s</b>	<b>1,75s</b>	<b>1,45s</b>	<b>1,57s</b>
Sous la mezzanine centre	<b>2,88s</b>	<b>1,88s</b>	<b>1,48s</b>	<b>1,24s</b>
Sous la mezzanine gauche	<b>2.66s</b>	<b>1.65s</b>	<b>1.45s</b>	<b>1.18s</b>

La comparaison des résultats du critère le plus important, le Tr30 pour les fréquences 500 et 1000 Hz, mesuré avec les deux méthodes est représentée sur le tableau 2 de la planche 3.8. Concernant les valeurs du Tr 30 mesurée par rapport à la valeur optimale<sup>17</sup> ( $Tr_{optimal} = 0,98$  s), Le Tr 30 nominal moyen pour l'ensemble des récepteurs, mesuré avec la source omnidirectionnelle étant égal à **2.26s**, et le même Tr 30 mesuré avec le ballon est égal à **2.35s**. On peut noter donc, que les résultats du Tr 30 mesuré avec les deux méthodes, sont supérieurs au Tr30 recommandé égal à **0.98s**. Néanmoins il est important de noter que les deux méthodes des mesures in-situ, ont donné des valeurs du Tr30 très proches (**2.35s et 2.26s**). Ceci constitue un critère positif de validation des deux méthodes des mesures in-situ.

<sup>17</sup> Voir sous-chapitre 2.6.5.



Plan de la salle de prière de la mosquée Ibn-Arabi avec les positions des mesures.



position	Description de la position	Tr 30 (s)1KHz	Tr 30 (s)500Hz	EDT (s) 1KHz	C50 (dB) 1KHz
1	Proche de l'imam	1.84	2.62	1.21	5.8
2	Sous la coupole centre	1.71	2.27	1.33	7.9
3	Sous la coupole droite	1.84	2.79	1.5	8.3
4	Sous la mezzanine centre	1.92	2.77	1.78	4.4
5	Sous la mezzanine gauche	1.91	2.99	1.83	0.4

Tableau 1 : les valeurs des critères acoustiques mesurés avec la source omnidirectionnelle sur les cinq positions des récepteurs.

Fréquences Hz	Tr 30 moyen de tous récepteurs mesuré avec la source omni	Tr 30 moyen de tous les récepteurs mesuré avec le ballon
500 Hz	2.68 s	2.87 s
1000 Hz	1.84 s	1.80 s
<b>Fréquence moyenne (500 et 1000 Hz)</b>	<b>2.26 s</b>	<b>2.35 s</b>

Tableau 2 ; les valeurs du Tr 30 nominal moyen de l'ensemble des récepteurs, mesurées avec les deux méthodes.

Planche 3.8 : Valeurs des critères acoustiques mesurés avec les deux méthodes, de la mosquée Ibn-Arabi

### **3.4. Résultats de la simulation acoustique de la mosquée Ibn-Arabi**

Les différents paramètres acoustiques ont été calculés par simulation sur l'ensemble de l'aire d'audience, ainsi qu'au niveau des différents récepteurs. Le « récepteur 1 » proche de l'imam sous la coupole, le « récepteur 2 » sous la mezzanine au centre et le « récepteur 3 » à l'arrière. Les deux autres positions ont été choisies sur les deux côtés latéraux de la salle sous la mezzanine, le « récepteur 4 » à droite et le « récepteur 5 » à gauche. Les matériaux de finitions utilisés sont précisés et quantifiés dans le tableau de la planche 3.9 ; les valeurs des coefficients d'absorption, sont représentées dans le graphe suivant sur la même planche. L'architecture des différentes vues de la mosquée avec la position des récepteurs, est illustrée sur la planche 3.10.

#### **3.4.1 L'indice de réverbération**

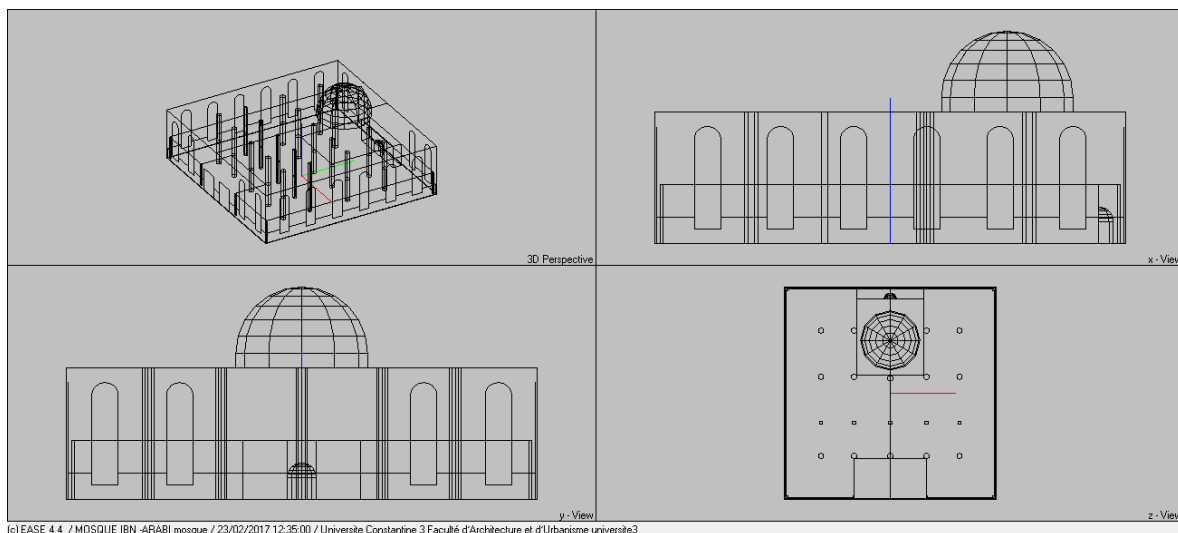
Les mesures du temps de réverbération calculé avec EASE, doivent nous renseigner sur la réponse acoustique de la salle dans l'intervalle temporel des premières réflexions et du champ diffus. Pour ce faire en plus du  $Tr_{60}$  qui représente la durée de la décroissance du niveau sonore de - 60 dB, on exécutera le calcul du  $Tr_{30}$  et de la durée de décroissance rapide EDT.<sup>18</sup> Les réflexions précoces subissent l'influence des propriétés géométriques et architecturales de l'espace, en plus des caractéristiques de la source et du récepteur. Quant aux réflexions du champ diffus, elles sont surtout dépendantes des caractéristiques de l'espace architecturale et donc peu dépendantes des propriétés de la source et du récepteur.

Nous avons procédé au calcul du  $Tr_{60}$  et du  $Tr_{30}$ . Le calcul du  $Tr_{60}$  selon Sabine, nous renseignera sur la nature du champ réverbéré uniformément reparti dans la mosquée. Cependant, le  $Tr_{30}$ , n'est pas constant dans la salle de prière ; il dépend de la position du récepteur dans l'espace, il permet d'évaluer l'effet de réverbération précoce. Le  $Tr_{60}$  calculé sera comparé au temps de réverbération optimal défini au sous chapitre 2.6.5. Pour le comparer au  $Tr$  recommandé, on fera le calcul du  $Tr$  nominal qui représente la moyenne du  $Tr$  dans les bandes de fréquences (500 Hz et 1000 Hz) propre à la parole. Le temps de réverbération nominal est donné par la formule  $Tr_{nom} = (Tr_{500} + Tr_{1000}) / 2$ . Le  $Tr$  nominal de la salle de prière sera égal à 1,9 s (Planche 3.11) ; ce temps de réverbérations est nettement supérieur au  $Tr$  optimal égal à 0,9s<sup>19</sup>. On peut déjà conclure suite à ce résultat, que notre salle est réverbérante mais pas de manière excessive si on tient compte que les matériaux de revêtement de la salle ont un coefficient d'absorption plus faible en basse fréquence.

---

<sup>18</sup> Voir sous-chapitre 1.5.

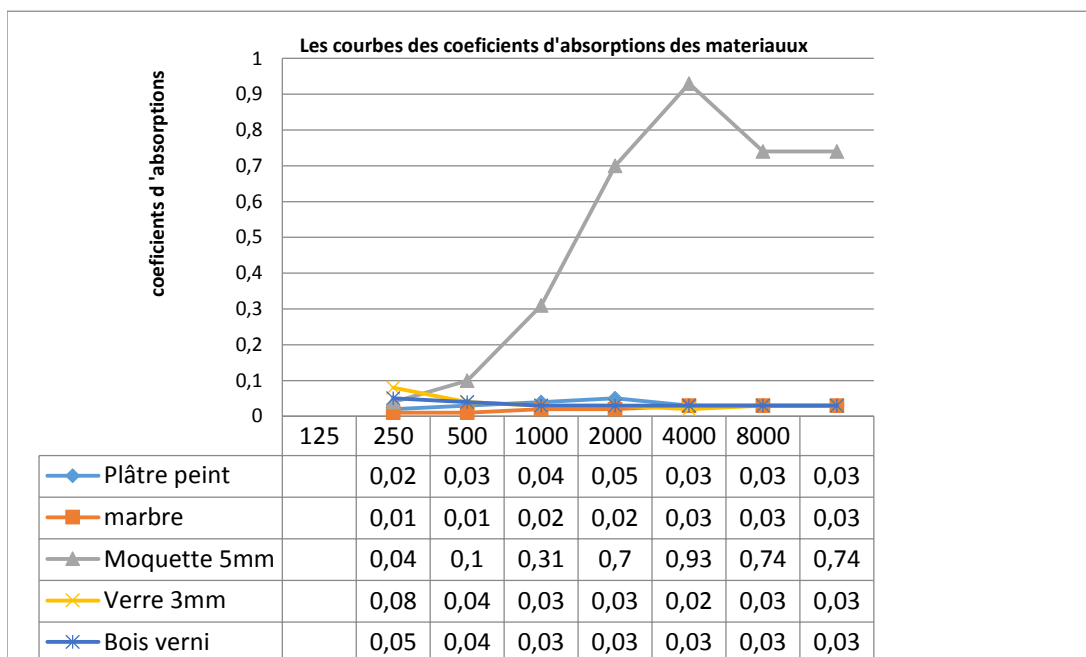
<sup>19</sup> Revenir au sous-chapitre 2.6.5, la durée de réverbération optimale choisie étant égale à 0.9 s.



Vue axonométrique, façades et vue en plan de la mosquée Ibn-Arabi

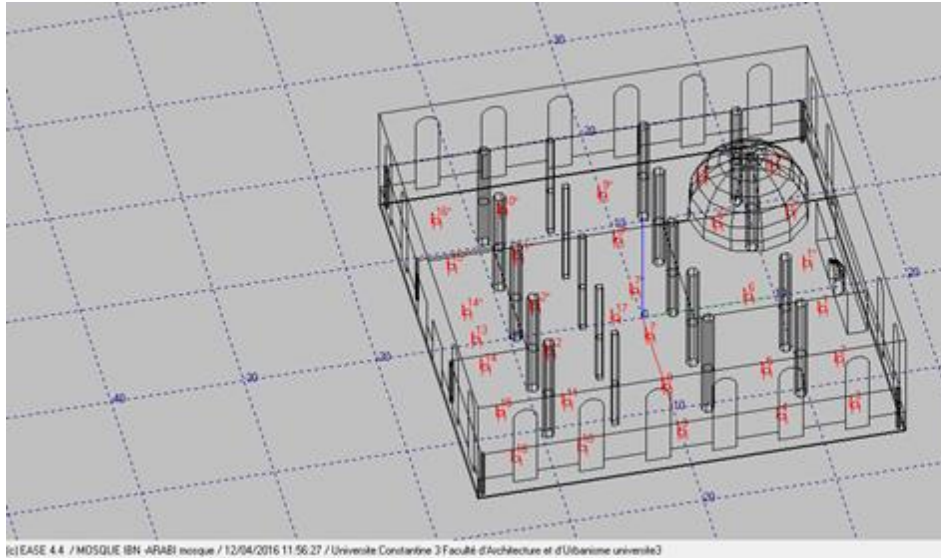
Mosquée	Volume m <sup>3</sup>	Surface m <sup>2</sup>	Plâtre %	Faïence %	Moquette %	Verre %	Bois %	Etage m <sup>2</sup>	Etage %
Ibn-Arabi	9486,95	1036,84	71,8 %	7,75 %	16,19 %	3,82%	0,38%	795,31	76,6%

Propriétés quantifiées des surfaces et des matériaux utilisés pour la mosquée Ibn-Arabi



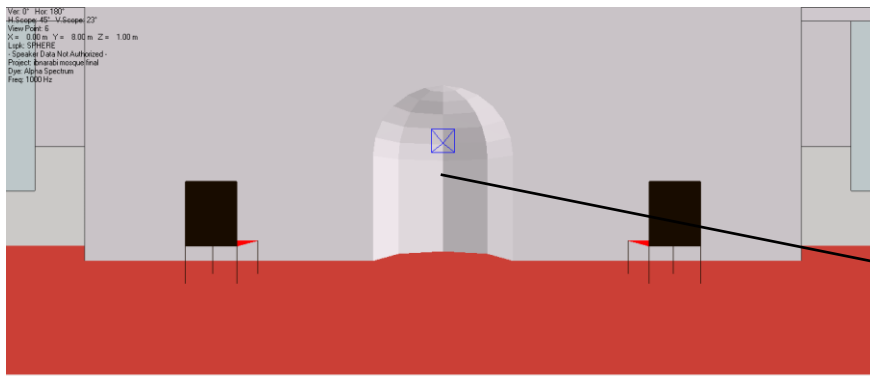
Courbes et valeurs des coefficients d'absorption des matériaux de la mosquée Ibn-Arabi.

Planche 3.9 : Représentation architecturale et propriétés des matériaux de la mosquée Ibn-Arabi



Vue axonométrique de la mosquée Ibn-Arabi avec les différentes positions des récepteurs numérotées (en rouge)

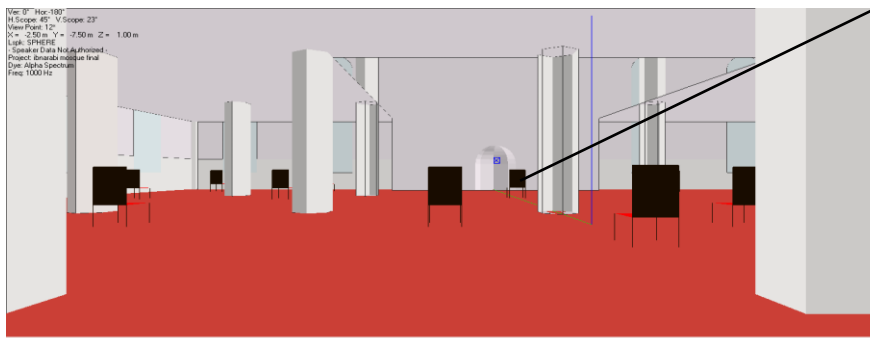
Les récepteurs sont visualisés par EASE sur le plancher de la salle de prière sous forme de chaises, numérotées de 1 à 17 disposées suivant les coordonnées x, y, z.



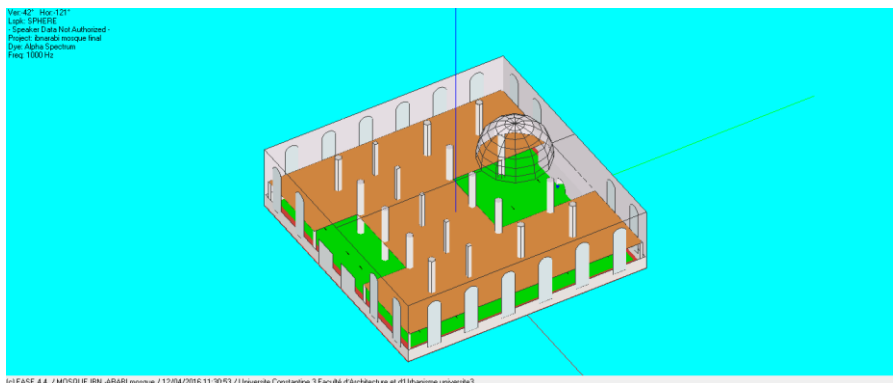
Vue intérieure de la salle de prière sur le mur de la qibla avec le Mihrab.

Le Mihrab

Récepteur 1

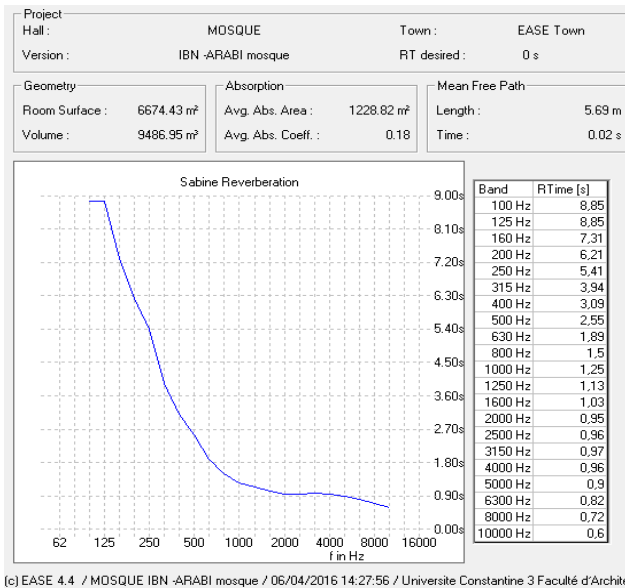


Vue intérieure. On peut remarquer la position du récepteur 1 proche de l'imam sous la coupole.



Vue axonométrique du R-D-C coloré en vert et de l'étage coloré en marron. Les ouvertures de l'étage en mezzanine apparaissent clairement.

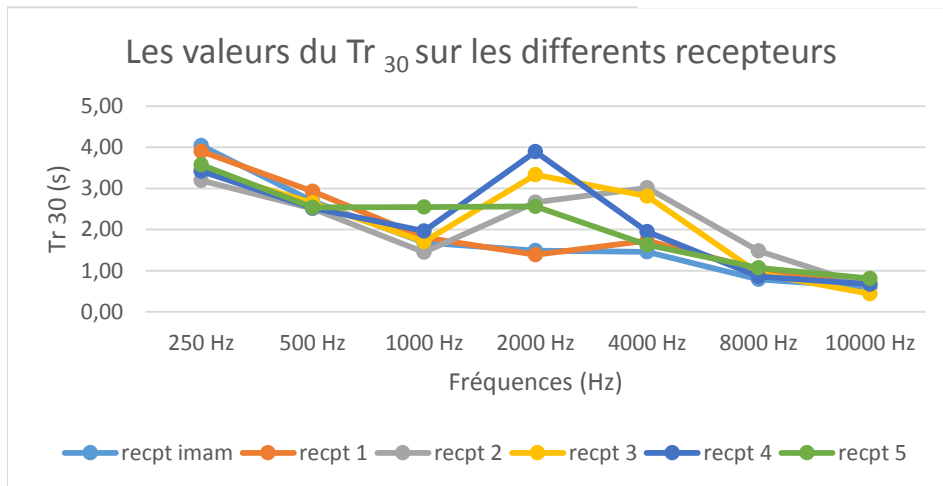
Planche 3.10 : vues axonométriques et vues d'intérieures de la mosquée Ibn-Arabi.



Durées de réverbérations sur toutes les bandes de fréquences selon Sabine.

Le  $Tr_{nom} = 2,55s + 1.25s/2 = 1,9s$

Ci-dessous, les durées de réverbérations  $Tr_{30}$ , sur les différents récepteurs. Le  $Tr_{30}$  moyen pour l'ensemble des positions est de 2,46 s.



Histogramme de la distribution du  $Tr_{30}$  à la fréquence 1000 Hz. 62 % du volume de la salle de prière possède un  $Tr_{30}$  entre 1,5 s et 2s, les 38 % du volume ont un  $Tr_{30}$  qui varie entre 2,5s à 5 s.

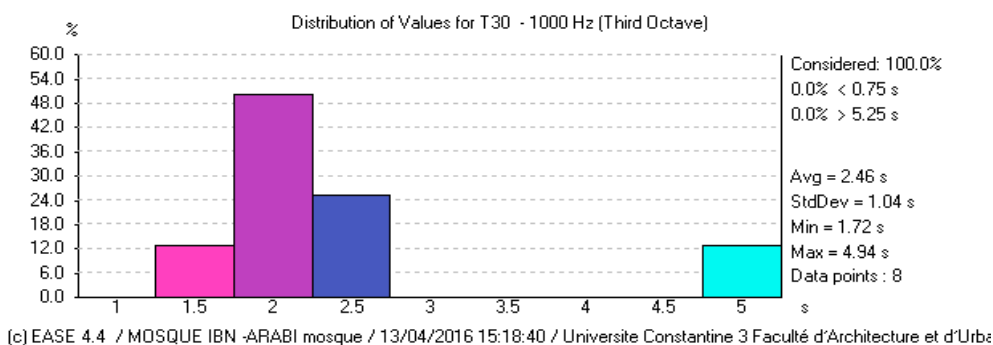


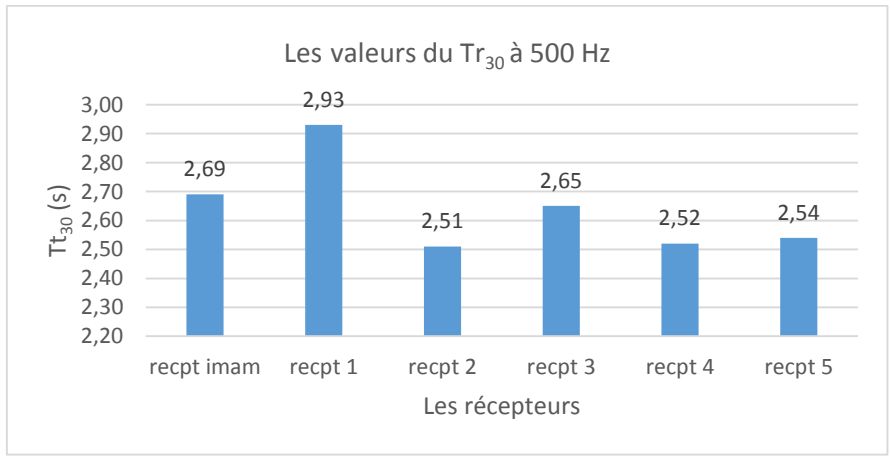
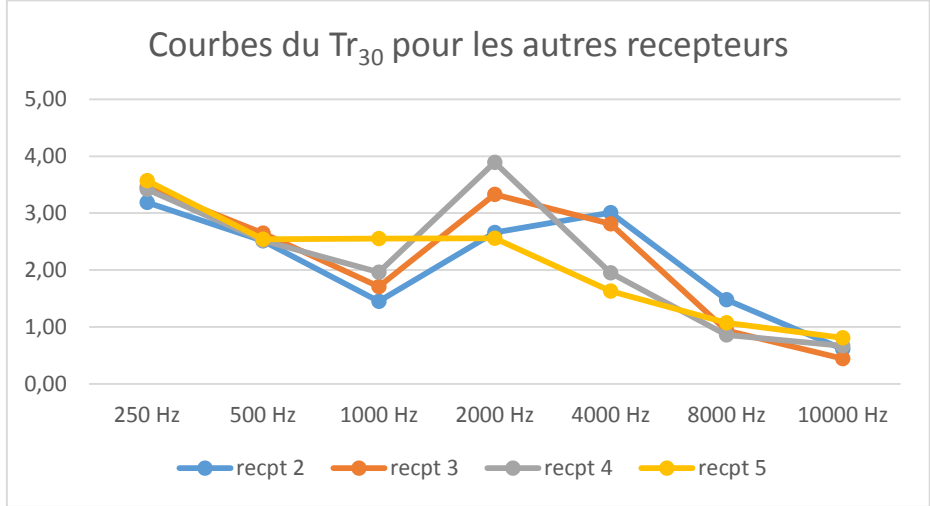
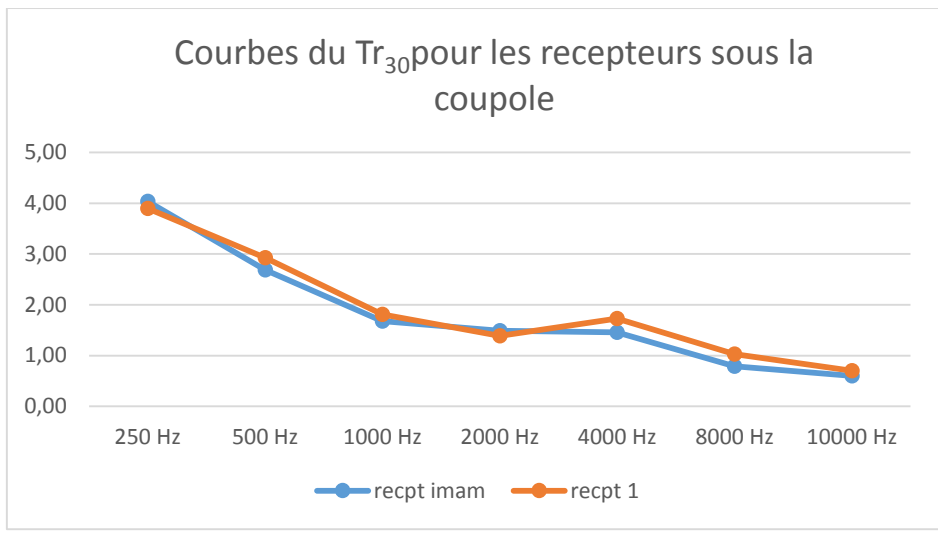
Planche 3.11 : Valeurs des durées de réverbérations de la mosquée Ibn-Arabi.

Les valeurs données par le calcul du  $Tr_{30}$  sur l'ensemble des fréquences nous renseigne sur le champ réverbéré des réflexions précoces et donc sur certains aspects architecturaux liés à la position des différents récepteurs. Sur l'histogramme de la distribution du  $Tr_{30}$  sur l'ensemble des récepteurs à 1000 Hz varie de 1.72s à 4.94 s. (planche 3.11). On remarque aussi que les courbes du  $Tr_{30}$  aux fréquences allant de 500 Hz à 4000Hz (bande de fréquence propre à la parole) pour les différents récepteurs, ont une tendance très irrégulière pour certains récepteurs (planche 3.11).

Dans le but d'examiner plus en détail les résultats de ce critère pour les différents récepteurs, on a séparé dans deux graphes distincts les courbes des récepteurs situés dans un volume uniforme et ceux positionnés dans des espaces avec volume variant. Ces graphes représentés sur la planche 3.12, illustrent bien pour les deux récepteurs situés sous la coupole (volume uniforme) une décroissance régulière en partant des fréquences basse vers les hautes fréquences. On remarque par contre sur le deuxième graphe, que le  $Tr_{30}$  pour les récepteurs 2,3,4 et 5 situés dans des emplacements avec des volumes variant (en hauteur), présente des courbes avec des pics et des creux ; ce type de courbe est représentative du  $Tr$  propre aux « salles couplées ». Aussi, ces variations sont tout à fait évidentes vue l'inhomogénéité du champ acoustique lorsque le récepteur est proche des parois.

Les valeurs du  $Tr_{30}$  sur la fréquence représentative de la parole 500 Hz en fonction des récepteurs varie entre 2.93s et 2,52s, ce qui constitue des valeurs élevée par rapport au volume de la mosquée (planche 3.12). Selon l'histogramme de la planche 3.12, les positions les plus critiques sont ceux des récepteurs situés sous la coupole, récepteur imam et récepteur 1.

On peut également noter que les valeurs du temps de réverbération diminuent en fonction de la fréquence, ceci est dû principalement au fait que le coefficient d'absorption pour la majorité des matériaux augmente en fonction de la fréquence. Ainsi la coupole et le mur de la qibla, nécessitent un traitement spécifique pour réduire l'intensité des réflexions précoces à ces emplacements de la mosquée.



L'histogramme de la répartition des valeurs moyennes du  $Tr_{30}$  pour la fréquence 500Hz, nous indique des valeurs très élevées pour les positions situées principalement sous la coupole « recpt 1 » et le « recpt imam ».

Planche 3.12 : Repartions des valeurs du  $Tr_{30}$  des principaux récepteurs de la mosquée Ibn-Arabi.

### 3.4.2. L'indice de l'EDT.

La durée de décroissance précoce entre 0dB et -10dB, EDT va nous renseigner sur le temps de réverbération calculé à partir du début de la réponse impulsionnelle, cette dernière joue un rôle plus important que la réverbération tardive puisqu'elle est mieux perçue. Il permet de mesurer l'impression de réverbération ressentie par différents auditeurs écoutant un flux sonore continu. On a sélectionné dans la salle de prière 31 positions d'auditeurs, comprenant les cinq positions choisies pour les mesures in-situ (planche 3.13). Les courbes des valeurs de l'EDT sur les trois bandes de fréquences, ont un aspect très uniforme avec des valeurs décroissantes, en allant des basses fréquences vers les fréquences hautes. Les valeurs de l'EDT pour les fréquences 500Hz et 1000 Hz sont comprises entre 4s et 2.5s, elles se rapprochent des valeurs optimales définies entre 2.7s et 3.85s.<sup>20</sup>

L'histogramme de la planche 3.12, illustrant les valeurs moyennes de l'EDT, fait ressortir deux zones avec un EDT élevé ; celui du (récepteur 1) positionné à l'avant sous la coupole avec 2,46s, et le récepteur 3 à l'arrière avec 2,26s, Comparées à la valeur moyenne des autres positions qui est de 1,51s. Cela s'explique par le fait que la hauteur du volume à l'avant et à l'arrière est plus importante puisque la mezzanine est ouverte sur la salle de prière à ces emplacements.<sup>21</sup>

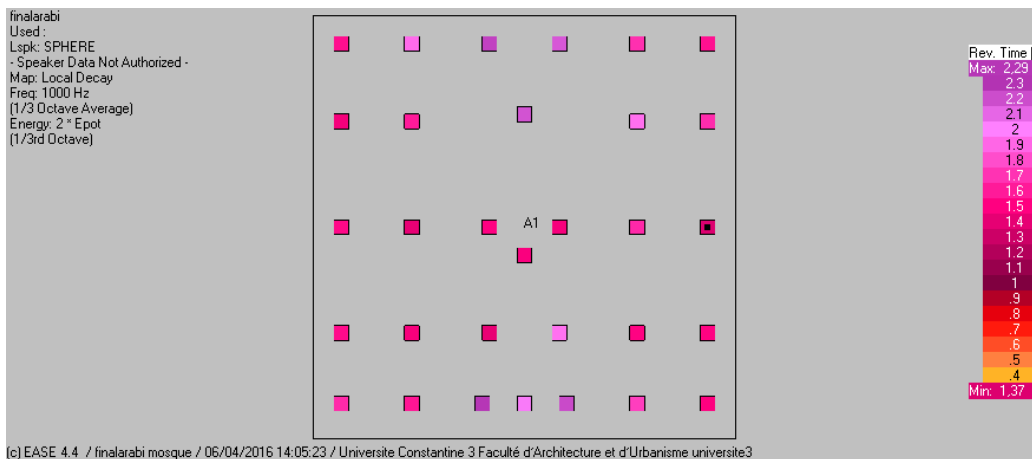
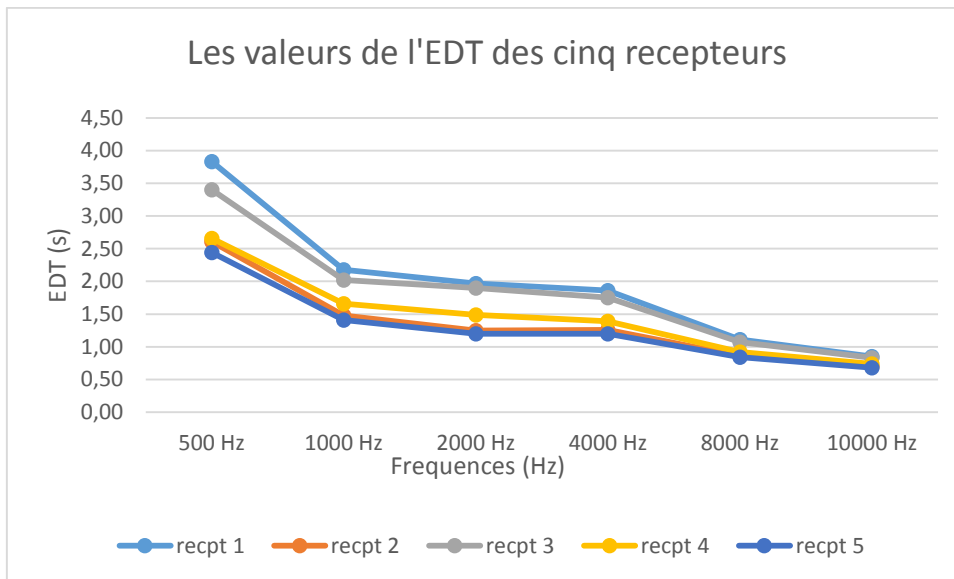
En conclusion le Tr et l'EDT en tant qu'indices objectifs simulés, ont permis d'apporter des informations temporelle et spatiale liées au comportement acoustique de l'espace de la mosquée. Ainsi concernant la distribution temporelle de la réponse impulsionnelle, l'EDT a précisé les parties de l'espace où les réflexions précoces sont élevées. D'un point de vue spatial (aire d'absorption et volume de la salle), les valeurs élevées des deux critères, requièrent une correction par un réaménagement lié aux caractéristiques d'absorption des matériaux et à leurs emplacements dans l'espace.

---

<sup>20</sup> Voir le sous-chapitre 2.6.5.

<sup>21</sup> Voir planche 3.10.





Cartographie des valeurs de l'EDT sur l'ensemble des 31 points de réceptions repartis sur l'espace de la salle de prière.

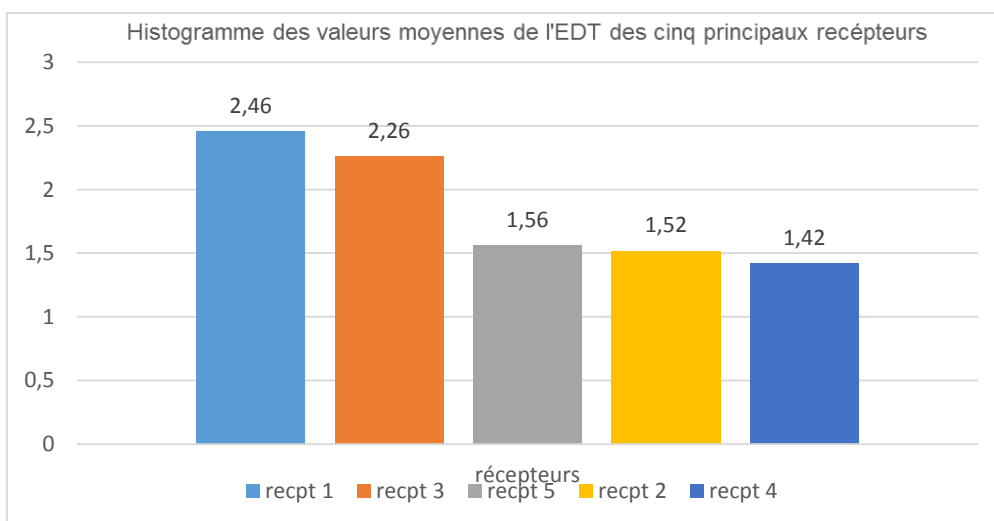


Planche 3.13 : graphe, cartographie et histogrammes des valeurs de l'EDT des principaux récepteurs de la mosquée Ibn-Arabi.

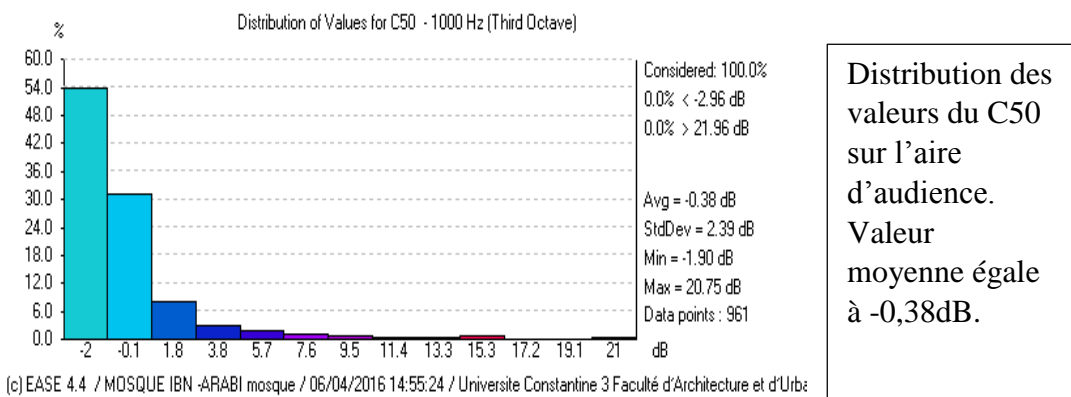
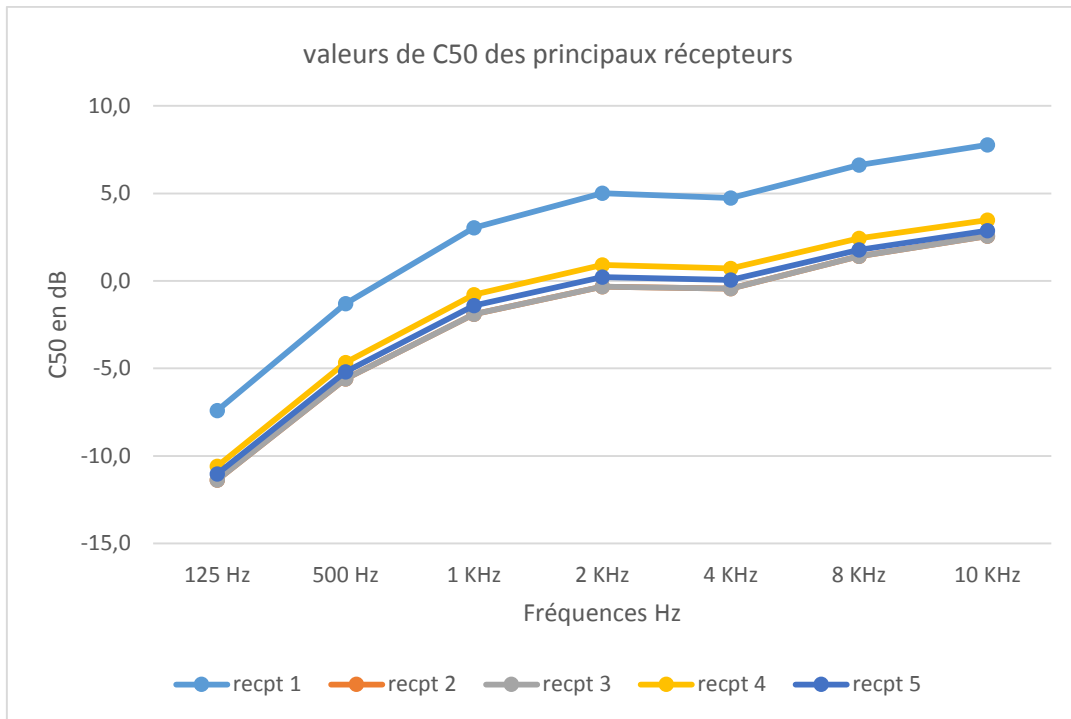
### 3.4.3. L'indice de clarté C50

La simulation de cet indice nous indique la clarté qui est due au son direct et une partie des réflexions précoces. Les 50 ms qui suivent le son direct sont intégrées à celui-ci et font partie du signal direct. Ce critère est utilisé pour la voix parlée dont l'évolution temporelle est plus rapide (le C80 est utilisé pour la musique) dans le cas de la voix parlée une bonne clarté requiert une valeur supérieure à 0 dB<sup>22</sup>. La cartographie et la distribution des valeurs de la clarté à la fréquence 1000 Hz représentée dans la planche 3.14, illustre une très bonne clarté dans la zone des premiers rangs proches du minbar, surtout sous la coupole où il n'y a pas de poteaux. Ces valeurs commencent à baisser au-dessous du zéro dès que l'on s'éloigne de la source vers les derniers rangs. Les valeurs les plus défavorables -1.9 dB sont dues aux zones d'ombres provoquées par les poteaux visibles sur la cartographie, aussi bien dans les parties proches qu'éloignées du minbar. La moyenne de la distribution du C50 est de -0.38dB avec un minimum de -1.9 dB et un maximum de 20.75 dB. Le graphe illustrant les valeurs du C50 sur les différents récepteurs (planche 3.14) fait ressortir en débutant par les fréquences basses, une croissance régulière des valeurs de la clarté jusqu'aux fréquences hautes. En outre la variation de ces valeurs entre le récepteur situé proche du Minbar et le récepteur situé à l'arrière n'excède pas 5 dB.

En conclusion l'indice de clarté permet d'évaluer la précision d'écoute, elle est très liée au temps de réverbération. Ainsi si elle est inférieure à 0dB, cela indique qu'il y a plus d'énergie en champ diffus qu'en premières réflexions et que le Tr est plutôt long. Si la valeur de la clarté est égale à 0dB, cela révèle qu'il y a autant d'énergie en champs diffus qu'en premières réflexions et c'est un bon compromis pour le temps de réverbération. Enfin si les valeurs de la clarté sont supérieures à 0dB, cela indique que les premières réflexions sont beaucoup plus énergétiques que le champ diffus et donc un temps de réverbération plus court. Dans le cas de notre mosquée malgré une faible variation de l'indice de la clarté entre les différents récepteurs, la moyenne du rapport du niveau du champ direct par rapport au champ diffus est inférieure à zéro, ce qui indique une mauvaise clarté. Cela est dû au manque de matériaux absorbants et à la présence d'un grand nombre de poteaux générant de multiples réflexions.

---

<sup>22</sup> Voir le sous-chapitre 2.6.5, planche 2.9, tableau 3.



Distribution des valeurs du C50 sur l'aire d'audience. Valeur moyenne égale à -0,38dB.

Cartographie du C50 sur la zone d'audience de la salle de prière. Les zones en gris illustrent l'effet de masque des poteaux.

(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 06/04/2016 14:55:24 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbz

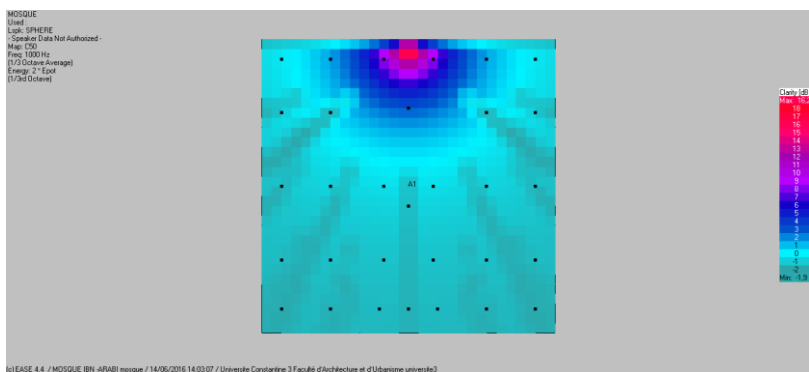
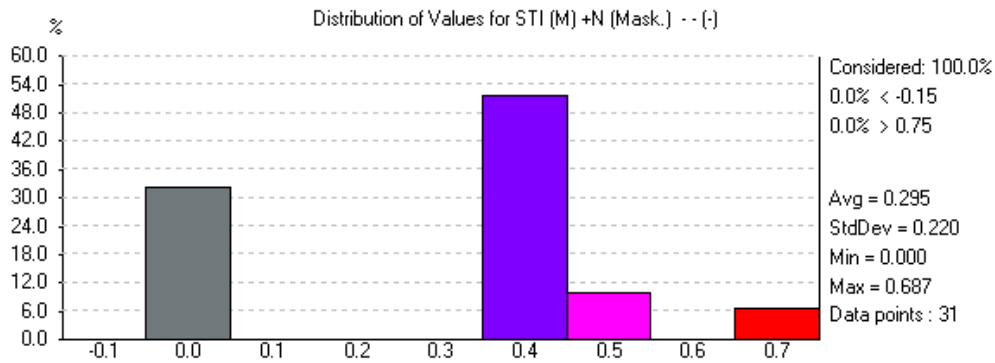


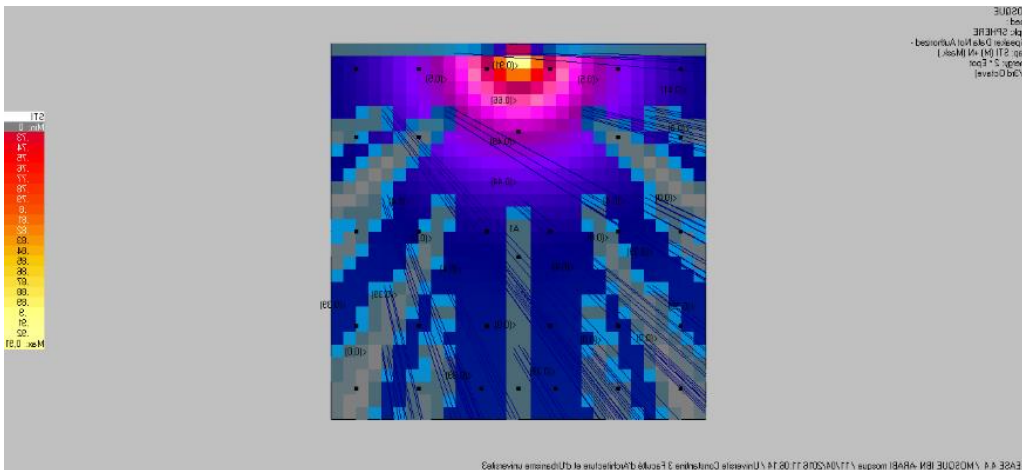
Planche 3.14 : courbes, distribution et cartographie des valeurs du C50 sur les principaux Récepteurs de la mosquée Ibn-Arabi.

#### **3.4.4. L'indice de l'intelligibilité.**

Le STI (Speech Transmission Index) est un critère objectif qui permet de quantifier l'influence d'une salle sur l'intelligibilité du message sonore reçu. La clarté permet une évaluation de cette influence, mais elle ne prend pas en compte le bruit de fond ni les particularités d'un message parlé ; pour notre cas une voix male. Le calcul du STI est basé sur l'étude des taux de modulations d'un signal émis et reçu dans une salle. Ainsi une bonne intelligibilité correspond à un signal où les pics se détachent bien des creux, ce qui peut être altéré par la réverbération qui masque les creux. Cet indice est compris entre 0 et 1 ; une bonne intelligibilité doit être comprise entre 0,6 et 1. On remarque sur la cartographie de la distribution du STI, une bonne intelligibilité dans les premiers rangs proche de la source sonore de 0,4 à 0,6. En s'éloignant de la source jusqu'au centre de la salle de prière le STI demeure moyen 0,40, par contre à ces mêmes positions, les valeurs du STI à l'ombre des poteaux deviennent nulle donc avec une intelligibilité médiocre. (Planche 3.15)



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 11/04/2016 12:05:20 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme



### Cartographie du STI.

L'effet de masque provoqué par les poteaux apparait clairement sur la cartographie du STI.

### Distribution du STI sur la zone d'audience

Moyenne de la distribution du STI 0,29. Valeur minimale 0,00

Valeur maximale 0,68. Valeur égale à 0,00 pour 35% de l'audience

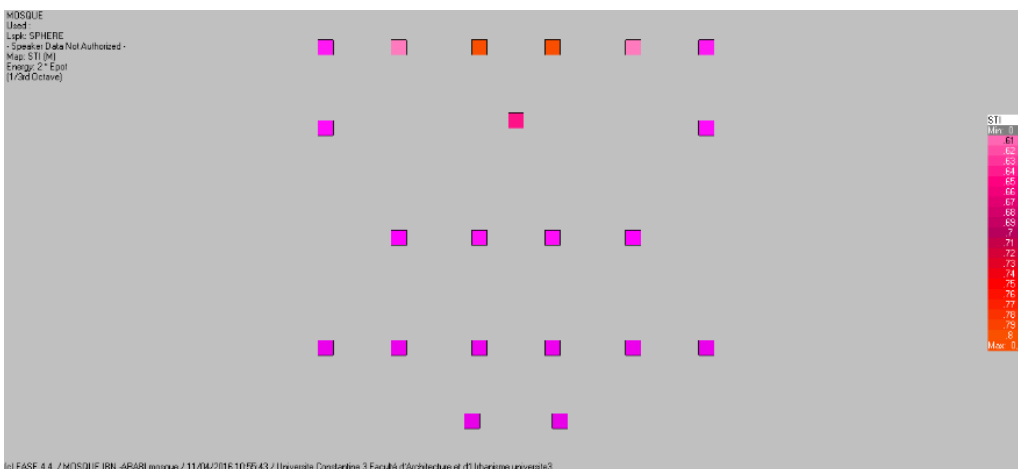


Planche 3.15 : histogramme et cartographie de la distribution du STI sur les principaux récepteurs de la mosquée Ibn-Arabi.

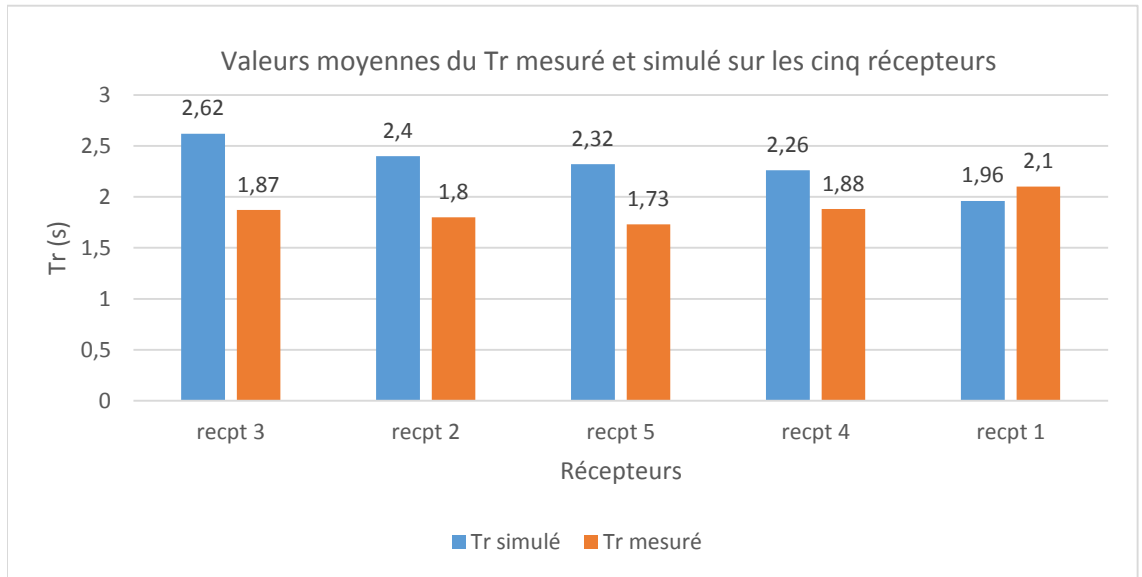
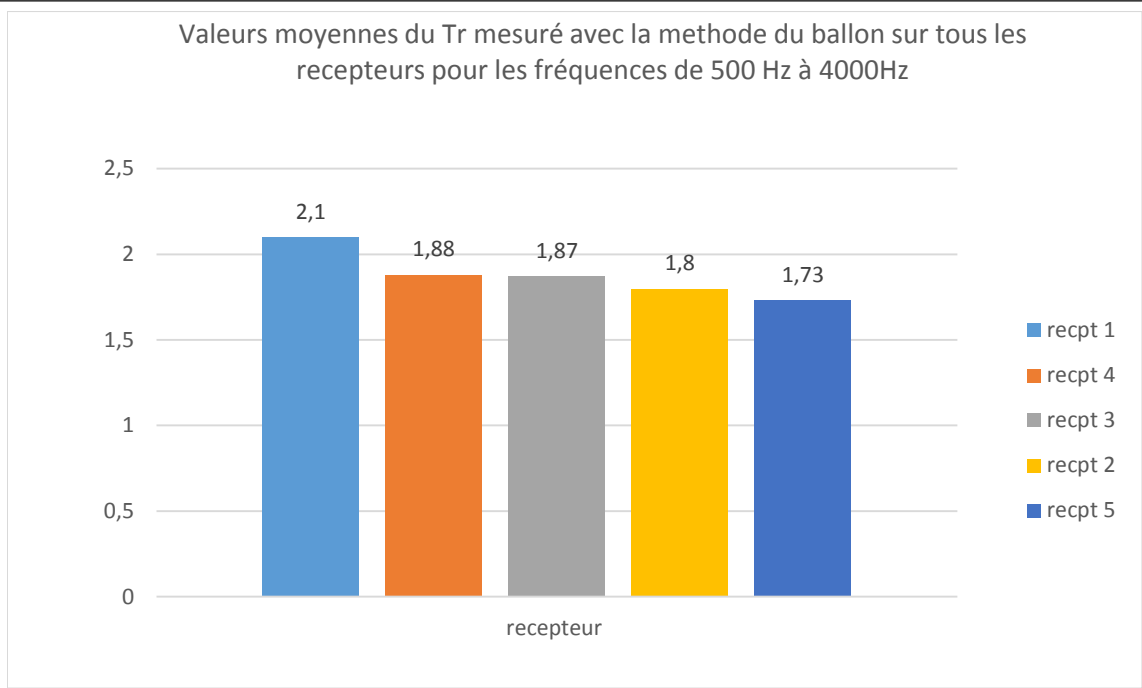
### **3.4.6. Conclusion.**

Au terme de la simulation numérique de la mosquée Ibn-arabi, on résumera les résultats en rapport avec le critère de qualification acoustique le plus important à savoir la durée de réverbération. Les valeurs du  $Tr$  révèlent un espace assez réverbérant, ayant eu un impact sur les autres critères, comme la clarté et l'intelligibilité. Les valeurs de ces indices acoustiques dépendent en grande partie de facteurs tels que le bruit de fond, le volume et la géométrie de l'espace ainsi que la répartition des matériaux et leurs natures réfléchissantes et absorbantes. On relève ainsi les effets préjudiciables de certains éléments conceptuels comme les poteaux sur la qualité d'écoute ; ainsi que certaines parties de l'espace possédant des hauteurs de volumes différentes. La conception de tous ces facteurs nécessitent un réaménagement architectural et architectonique, en ciblant des emplacements et des éléments spécifiques tel que la coupole le mur de la qibla et le fond de l'espace ; dans le but d'améliorer le confort d'écoute à l'intérieur de la mosquée.

### **3.4.7. Comparaison des résultats simulés et mesurés de la mosquée Ibn Arabi**

La comparaison des résultats simulés et mesurés concernent les mesures effectués avec la méthode du ballon. Les résultats illustrés sur l'histogramme de la planche 3.16, affichent pour tous les récepteurs des valeurs simulées plus importantes que ceux calculées lors des mesures in-situ par la méthode du ballon. Cette différence est due essentiellement aux conditions des mesures en rapport avec les caractéristiques réelles de l'air et de la température, qui influencent la propagation du son et auront un impact sur les résultats mesurés.

En outre les valeurs des coefficients d'absorption des matériaux pris en compte dans la simulation, peuvent varier avec le même matériau et sa mise en œuvre dans la réalité. « Il est donc difficile de définir l'absorption d'une paroi sans connaître sa composition et les solutions techniques adoptées ainsi que le soin porté à la mise en œuvre.» (Champilou. V.,et al 2012). Néanmoins on peut conclure que les valeurs du  $Tr_{30}$  dans les deux conditions, mesurées et simulées, demeure supérieur à la valeur optimale.



	Rec1 imam	Rec5 mezzanine gauche	Rec4 coupole droite	Rec2 coupole centre	Rec3 mezzanine centre
Tr30 s simulé	<b>1.96</b>	<b>2.32</b>	<b>2.26</b>	<b>2.4</b>	<b>2.62</b>
Tr 30 s mesuré	<b>2.1</b>	<b>1.73</b>	<b>1.88</b>	<b>1.8</b>	<b>1.87</b>

Tableau des valeurs du Tr30 moyen (pour les fréquences de 500 à 4000 Hz) simulés et mesurés avec la méthode du ballon de baudruche.

Planche 3.16 : Comparaison des valeurs moyennes du Tr30 mesurées et simulées sur les cinq positions des réceptions.

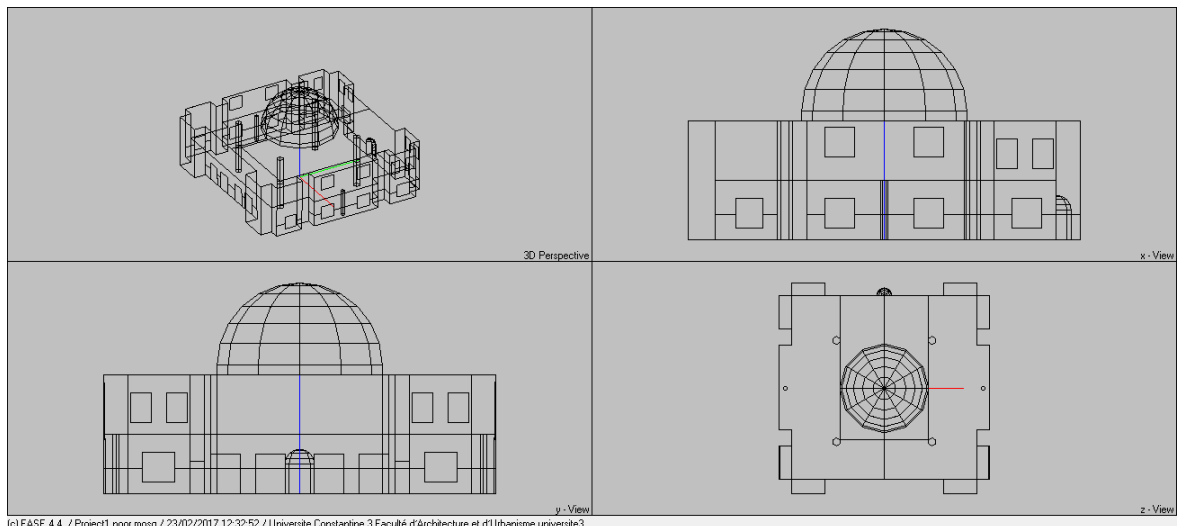
### **3.5. Résultats de la simulation acoustique de la mosquée Ennour.**

Les différents paramètres acoustiques ont été calculés sur l'ensemble de l'aire d'audience, ainsi qu'au niveau des différents récepteurs. Le « récepteur 1 » près du Mihrab, le « récepteur 4 » au centre sous la coupole et le « récepteur 3 » sur le côté latéral droit, le récepteur 3\* sur le côté latéral gauche et enfin le récepteur 6 à l'arrière. On peut noter que chaque récepteur, se positionne dans une partie de l'espace possédant des propriétés architecturales différentes. Ainsi le récepteur 1 proche de la source se positionne sous une hauteur de volume de 9 mètres. Les récepteurs 3 et 3\* sont sous la mezzanine avec seulement 4 mètres de hauteur. Le récepteur 4 se trouve au centre de la mosquée sous la coupole qui se situe à 14 mètres de hauteur et enfin le récepteur 6 le plus éloigné de la source se situe sous la mezzanine.

On pourra au terme du calcul des critères acoustiques pour chaque position, identifier l'impact de ces aspects architecturaux sur la qualité sonore de l'espace. Les matériaux de finitions utilisés pour les deux mosquées sont identiques, donc ayant les mêmes coefficients d'absorption. Les valeurs quantifiées des différents matériaux de la mosquée Ennour, sont précisées dans le tableau de la planche 3.17.

La planche 3.18, comprend deux vues axonométriques intérieures de la mosquée Ennour pour illustrer les éléments caractéristiques, comme le Mihrab, l'étage en mezzanine, l'espace se trouvant sous l'ouverture de la coupole. Les différents récepteurs sont visualisés sur le modèle de la mosquée sous forme de chaise. Enfin la figure du bas de la planche 3.18, représente une vue axonométrique d'ensemble de la mosquée, avec des parois transparente dans le but de donner une image d'ensemble de l'espace intérieur.

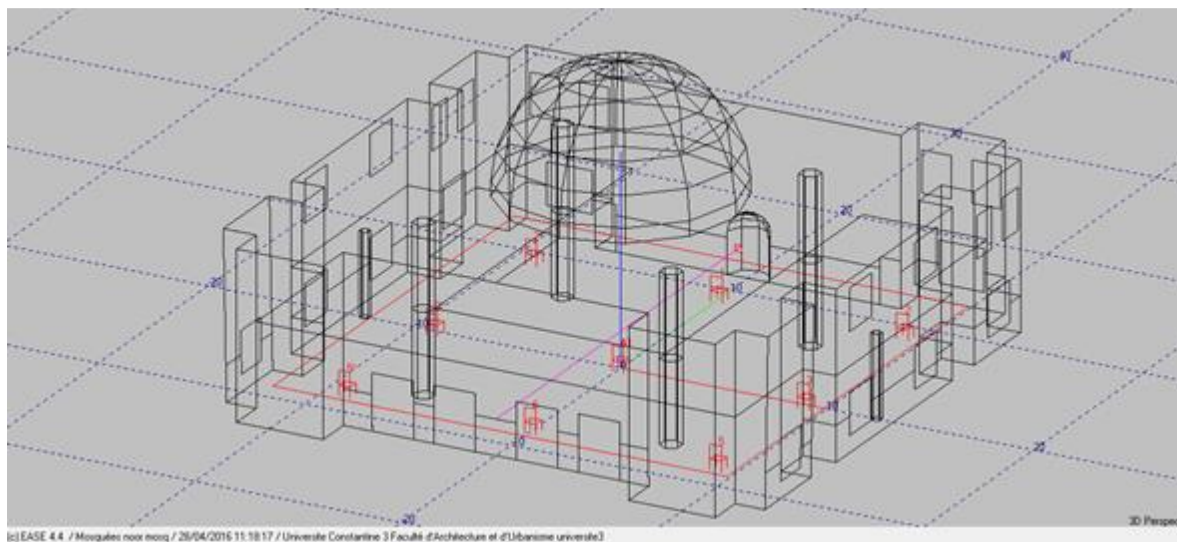




Vue axonométrique, façades et vue en plan de la mosquée Ennour

Mosquée	Volume m <sup>3</sup>	Surface m <sup>2</sup>	Plâtre %	Faïence %	Moquette %	Verre %	Bois %	l'étage en m <sup>2</sup>	L'étage en %
Ennour	5382,98	622,14	71,16%	7,19%	18,53%	2,34%	0,78%	366,5	58,7%

Propriétés quantifiées des surfaces et des matériaux utilisés dans la mosquée Ennour



Vue axonométrique de la mosquée Ennour avec le positionnement des récepteurs en rouge.

Planche 3.17 : Représentation architecturale et propriétés des matériaux de la mosquée Ennour.

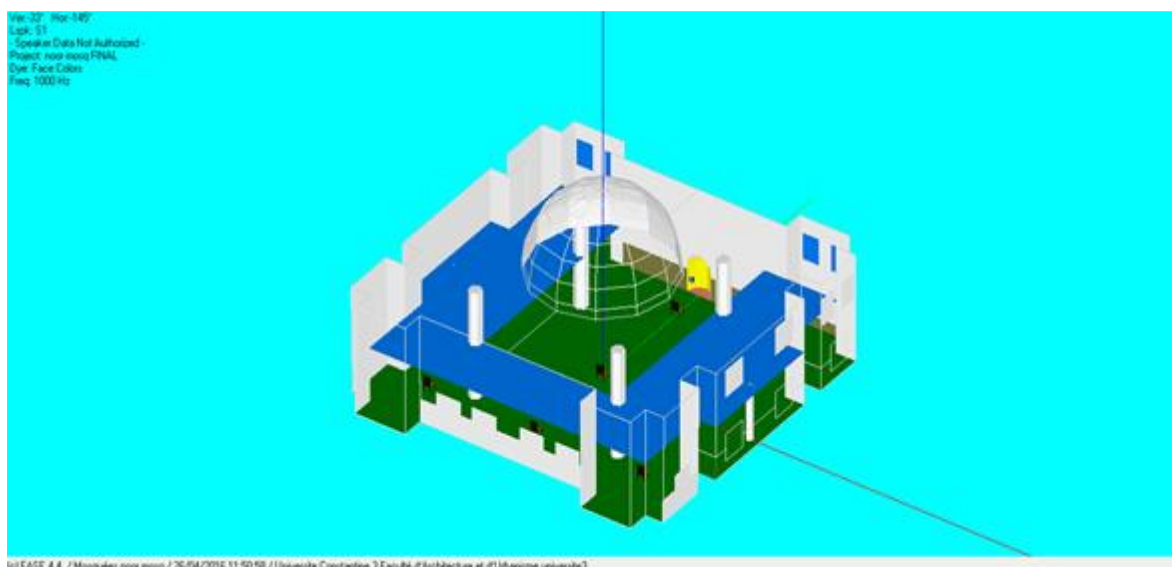
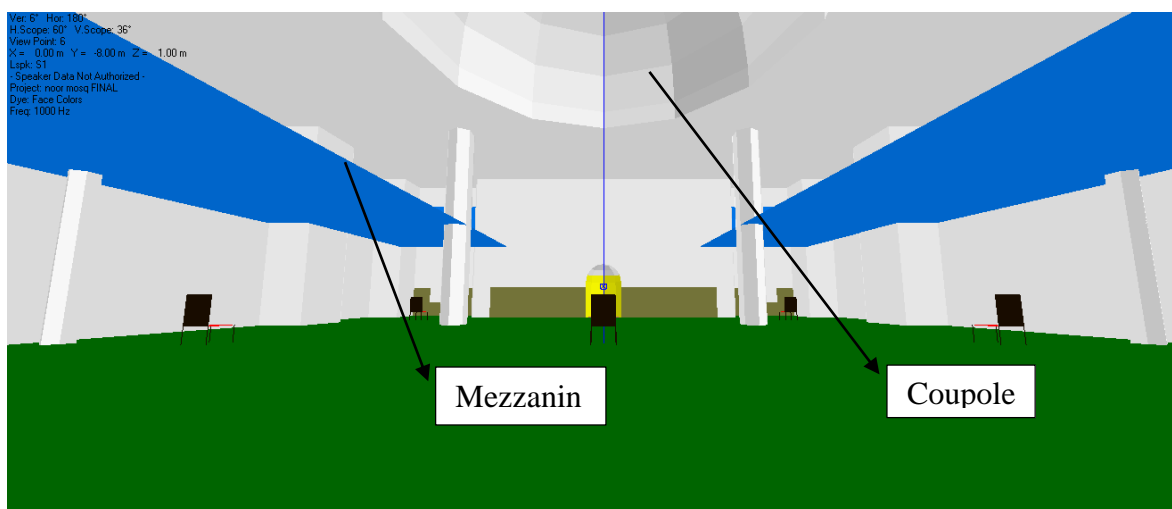
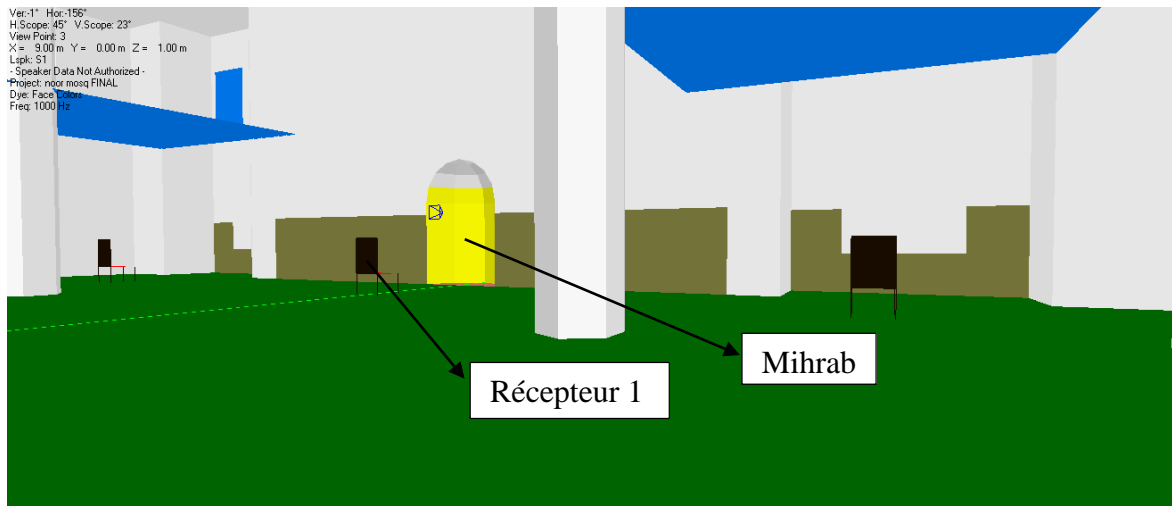


Planche 3.18 : Les vues axonométrique et les vues d'intérieures de la mosquée Ennour.

### 3.5.1. L'indice de réverbération

Comme pour la mosquée Ibn-el-Arabi, les premiers critères acoustiques calculés pour la mosquée Ennour sont le  $Tr_{60}$  et du  $Tr_{30}$ , dans le but d'avoir plus de précision sur la nature du champ réverbéré et ce en fonction de la position des cinq récepteurs sélectionnés. Les valeurs du  $Tr_{60}$  selon Sabine apportent des indications sur la nature du champ réverbéré tardif reparti de façon uniforme dans l'espace de la mosquée. Le  $Tr_{30}$ , par contre renseignera sur la réverbération précoce et dépendra de la position du récepteur dans l'espace. Le temps de réverbération calculé sera comparé au temps de réverbération optimal pour les fréquences 500 et 1000 Hz, égal à 0.9 s. ce dernier a été défini au chapitre 2.<sup>23</sup>

Dans le cas de notre salle de prière, le temps de réverbération nominal calculé, représente la moyenne du  $Tr$  dans les bandes de fréquences (500 Hz et 1000 Hz) propre à la parole. Le temps de réverbération nominal est donné par la formule :

$$Tr_{nom} = Tr_{500} + Tr_{1000} / 2. \text{ Donc } Tr_{nom} = 2.22 + 1.09 / 2 = 1.65 \text{ s. (planche 3.19)}$$

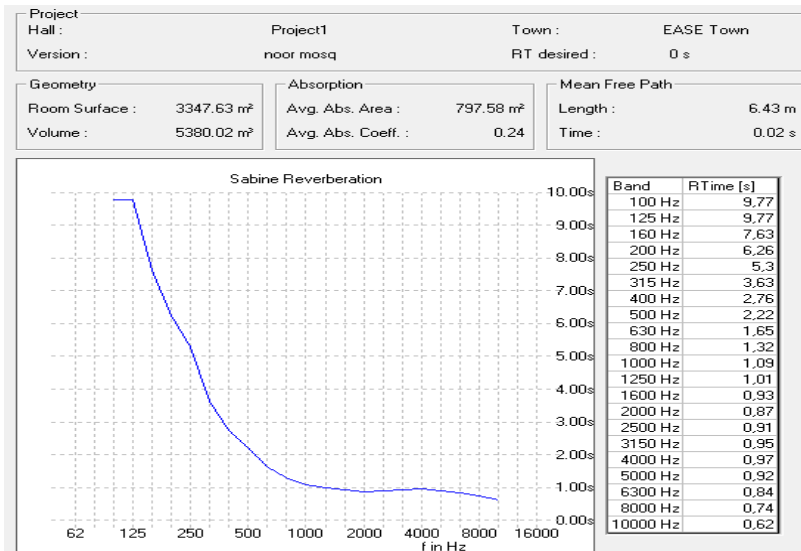
Le  $Tr$  nominal de la salle de prière est égal à 1,65s, il est supérieur au  $Tr$  optimal de 0,90s.

Les valeurs du  $Tr_{30}$ , fourniront des indications sur la durée de réverbération en fonction des différentes positions des récepteurs, afin d'évaluer l'impact des caractéristiques architecturales de l'espace sur le champ réverbéré des réflexions précoces. Les valeurs du  $Tr_{30}$  sur l'ensemble des fréquences représentées dans l'organigramme de la planche 3.19, illustre une variation très homogène pour tous les récepteurs, à l'exception du récepteur 4 au centre sous la coupole avec un pic de 2.9s à 1000Hz. Cela est dû essentiellement au phénomène de focalisation présent sous la coupole qui amplifie les réflexions et donc la durée de réverbération. Le  $Tr_{30}$  nominal pour l'ensemble des récepteurs varie entre 1.72s et 2,22s, ces sont des valeurs élevées par rapport à la durée de réverbération recommandée pour cette catégorie de volume (planche 3.19).

Le graphe et l'histogramme de la planche 3.20, exposent les valeurs du  $Tr_{30}$  propres aux fréquences médiums. Ainsi, le récepteur situé sous la coupole de la salle de prière, reçoit un flux sonore plus important des réflexions précoces, suivis du récepteur à l'arrière, avec respectivement 2.22s et 1.95 s. Cela nécessite un traitement spécifique pour réduire l'intensité de la réverbération précoce à ces emplacements précis de la mosquée en particulier pour les fréquences médiums.

---

<sup>23</sup> Voir sous-chapitre 2.6.5.

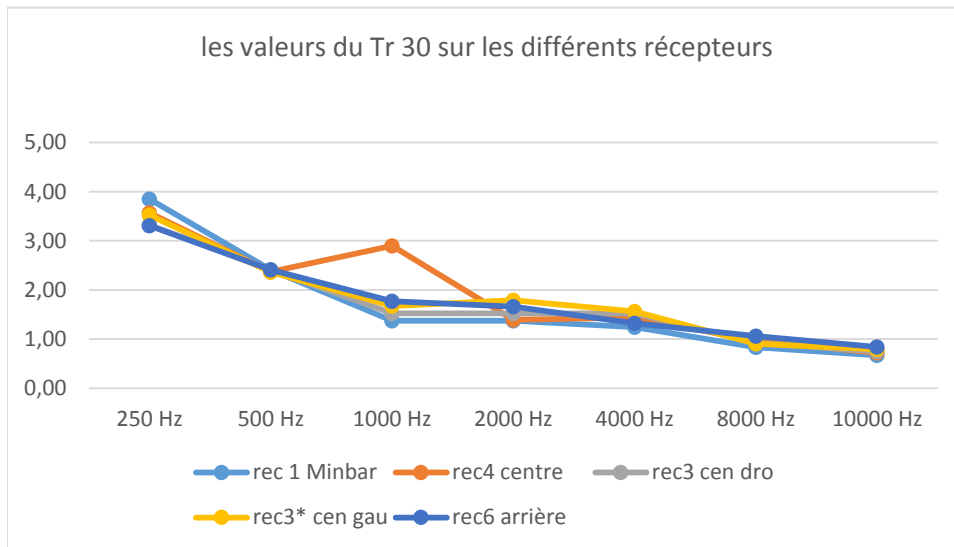


(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 26/04/2016 11:19:57 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Uit

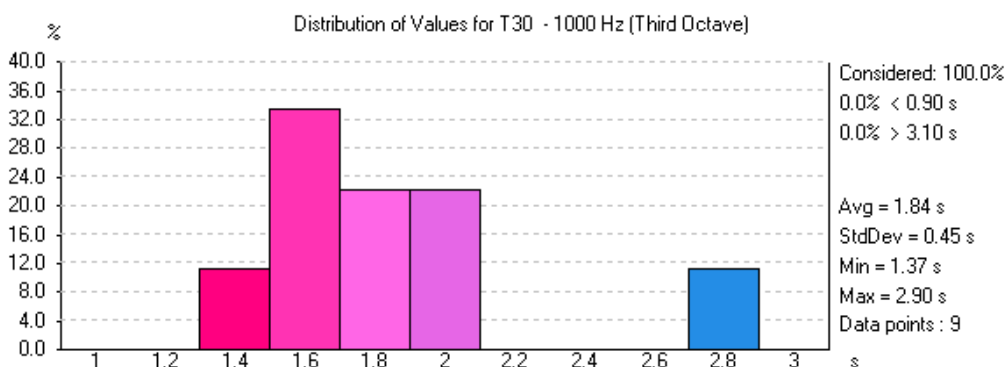
Durées de réverbérations selon Sabine sur toutes les bandes de fréquences.  
 $Tr_{500} = 2.22s.$

$Tr_{1000} = 1.09 s.$

Le  $Tr_{nom} = 2.22 + 1.09 / 2 = 1,65s.$



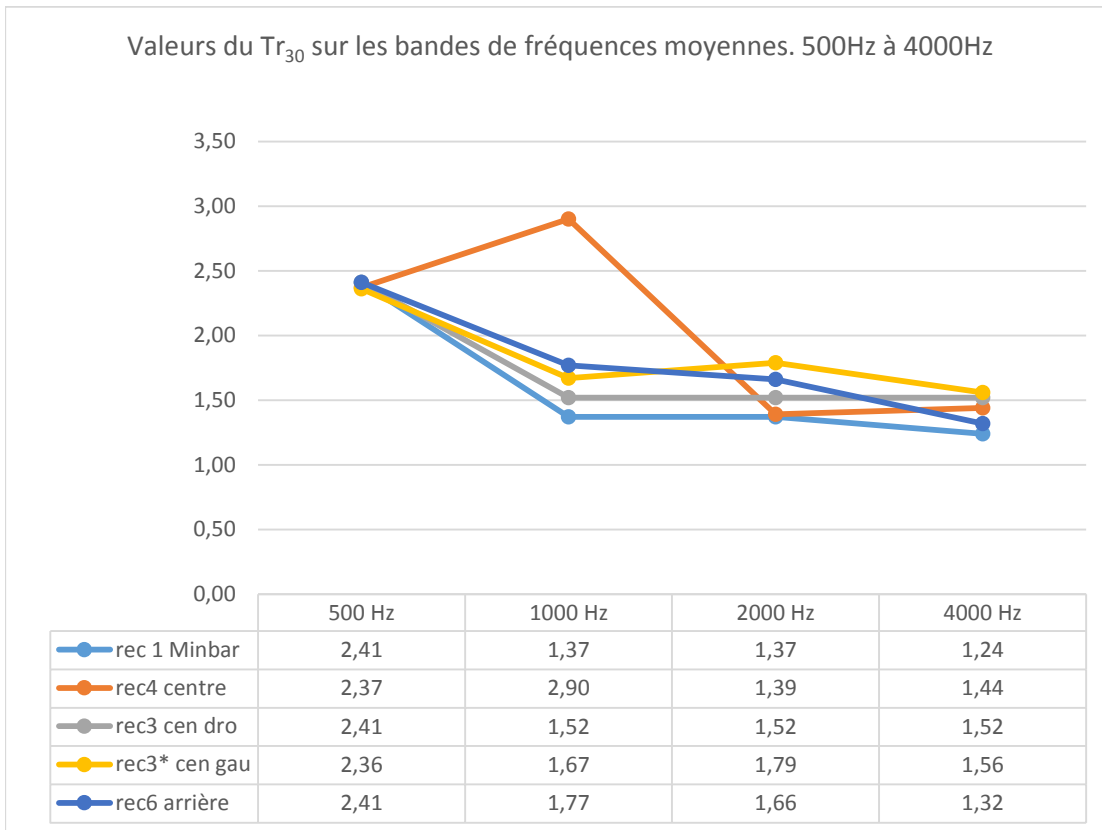
Organigramme des durées de réverbérations  $Tr_{30}$ , sur les différents récepteurs. Le  $Tr_{30nominal}$  moyen pour l'ensemble des positions est de 2,31 s.



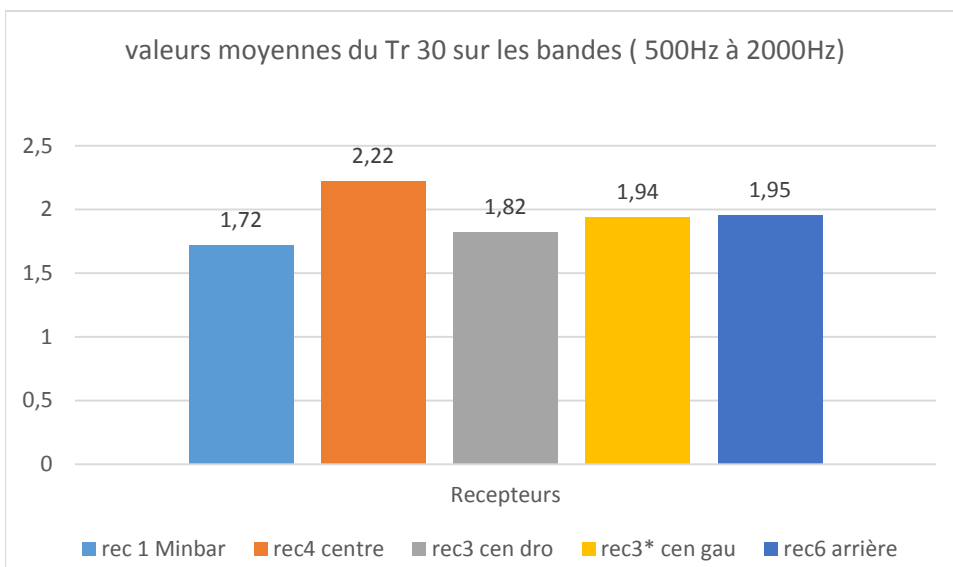
(c) EASE 4.4 / Mosquées noor mosq / 26/04/2016 12:31:42 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme un

Histogramme de la distribution du  $Tr_{30}$  à la fréquence 1000 Hz. 35 % du volume de la salle de prière possède un  $Tr_{30}$  entre 1,5 s et 1,7s, les 25 % du volume ont un  $Tr_{30}$  qui varie entre 1,7s à 2 s. ces valeurs sont supérieures au  $Tr$  recommandé de 0,90s.

Planche 3.19 : Valeurs des durées de réverbérations  $Tr_{60}$  et  $Tr_{30}$  de la mosquée Ennour.



Les valeurs du  $Tr_{30}$  sur les bandes des fréquences moyennes propres à la parole, sont homogènes suivant les différents récepteurs, à l'exception du récepteur du centre sous la coupole.



L'histogramme de la répartition des valeurs moyennes du  $Tr_{30}$  en fonction des différents récepteurs, nous indique des valeurs très élevées pour les positions situées au centre et à l'arrière.

Planche 3.20 : Représentations détaillées des valeurs du  $Tr_{30}$  des cinq principaux récepteurs de la mosquée Ennour.

### 3.5.2. L'indice de l'EDT.

La durée de décroissance précoce évalue la durée de réverbération précoce à partir du début de la réponse impulsionnelle jusqu'à -10dB. L'EDT apporte des indications sur l'état du champ réverbéré à travers l'espace de la mosquée au cours des 80 ms. Il permet donc d'évaluer l'impression de réverbération perçue par différents auditeurs écoutant un flux sonore continu. Dans le but de couvrir l'ensemble de la surface d'audience dans la salle de prière, 24 positions d'auditeurs ont été sélectionnés, comprenant les cinq positions choisies pour les mesures in-situ. La planche 3.21, illustre la variation des valeurs de l'EDT pour les différents récepteurs. Les courbes des différents récepteurs ont un aspect très homogène, avec une allure décroissante en partant des basses fréquences, vers les fréquences hautes.

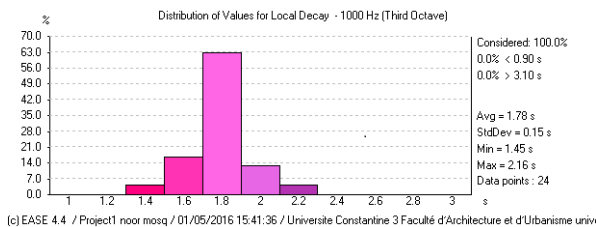
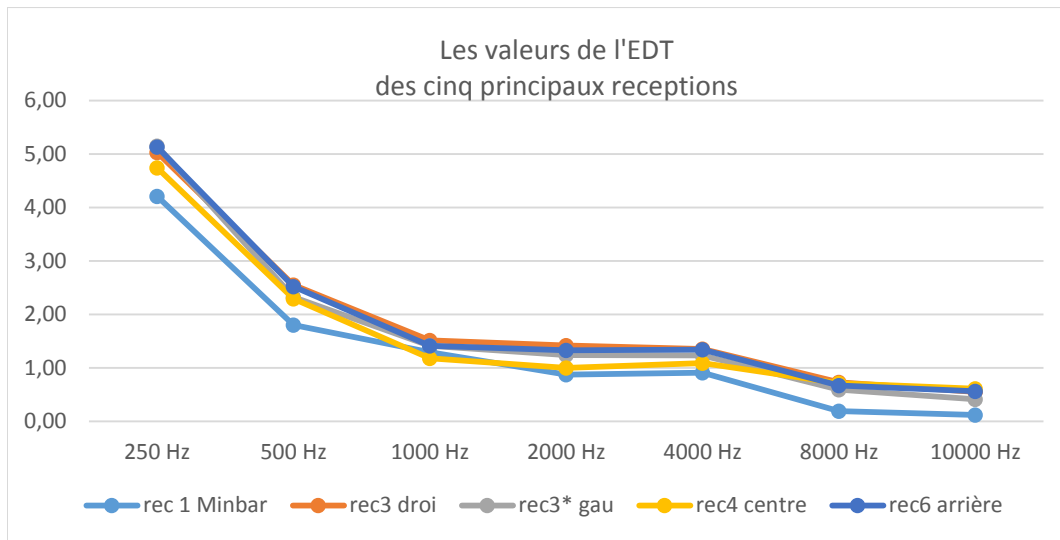
La planche 3.21, illustre également les variations de l'EDT sur l'histogramme de la distribution pour la fréquence 1000Hz. Ces valeurs sont comprises entre un minimum de 1,45s et un maximum de 2,16s, la distribution de ces valeurs sur les 24 récepteurs apparaît sur la cartographie assez homogène avec peu d'écart entre les différentes positions. Néanmoins, ces résultats sont en deçà des valeurs optimales comprises entre 2,7s et 3,8s<sup>24</sup>

Dans le but d'avoir une estimation plus spécifique à la plage des fréquences médium, le calcul de la moyenne des valeurs de l'EDT pour les cinq récepteurs, apparaît sur l'histogramme de la planche 3.21. On constate ainsi des variations assez négligeables entre les récepteurs, ces moyennes varient entre 1,83s et 1,32s.

En conclusion l'EDT en tant qu'indice objectif simulé, a permis d'apporter des informations temporelle et spatiale liées au comportement acoustique de l'espace vis à vis des premières réflexions. La mosquée Ennour possède un volume assez uniforme, ainsi la distribution spatiale des premières réflexions, comparée à la mosquée Ibn-Arabi, ne subit pas de grandes différenciations du fait de l'homogénéité du volume.

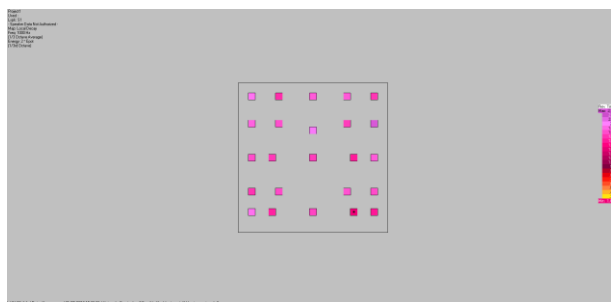
---

<sup>24</sup> Voir le sous-chapitre 2.6.5.



Histogramme de la distribution des valeurs de l'EDT sur l'ensemble des points de réceptions.

(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 01/05/2016 15:41:36 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme univ



Cartographie des valeurs de l'EDT sur les 24 points de réceptions : répartition homogène sur la salle de prière de la mosquée Ennour.

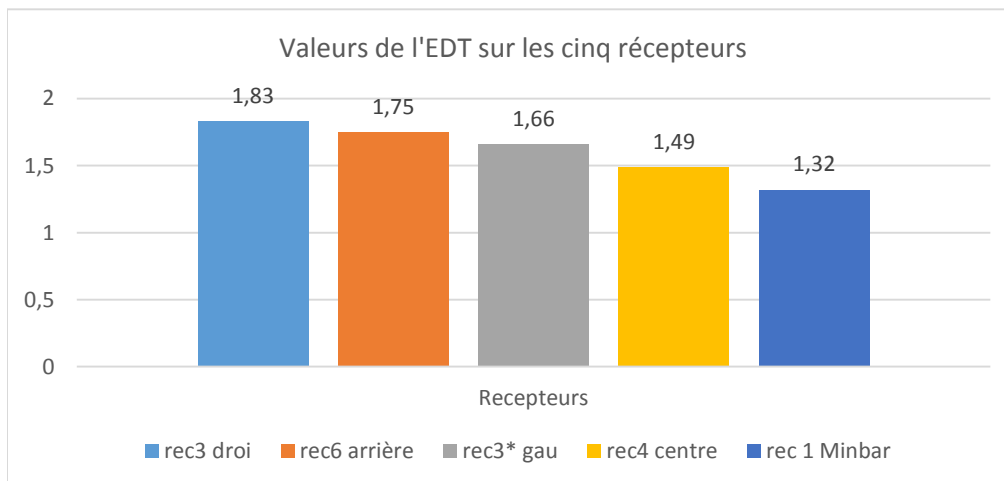


Planche 3.21 : graphe, cartographie et histogrammes des valeurs de l'EDT des principaux récepteurs de la mosquée Ennour.

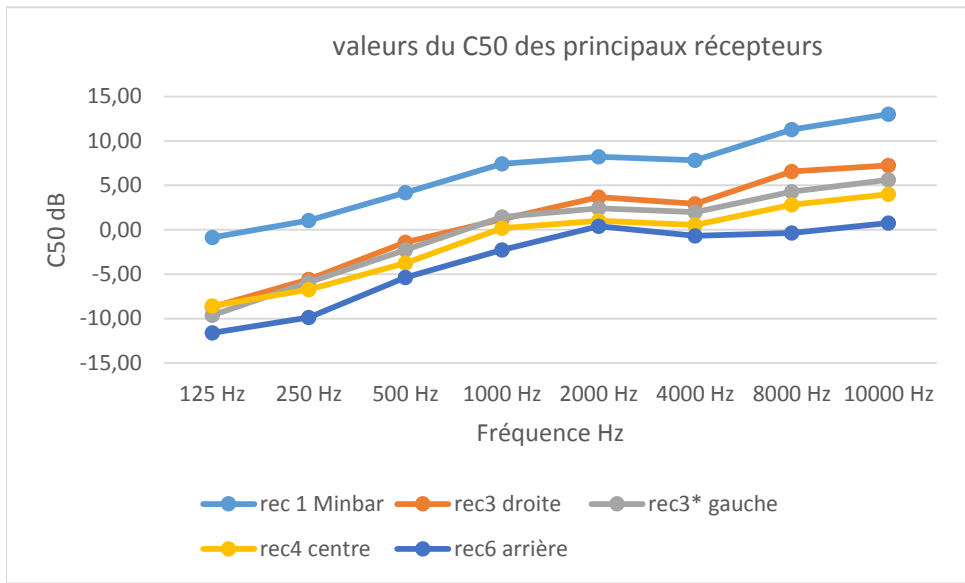
### 3.5.3. L'indice de clarté C50

L'indice de clarté C50, évalue le rapport d'énergie sonore entre le champ des premières réflexions et le champ diffus en décibel, il donne une appréciation de la précision d'écoute. La clarté est très liée au temps de réverbération. Ainsi s'il y a plus d'énergie en champ diffus qu'en premières réflexions, le Tr est plutôt long et la clarté est inférieure à 0dB. Si la valeur de la clarté est égale à 0dB, cela indique qu'il y a autant d'énergie en champs diffus qu'en premières réflexions et c'est un bon compromis pour le temps de réverbération. Enfin si les valeurs de la clarté sont supérieures à 0dB, cela indique que les premières réflexions sont beaucoup plus énergétiques que le champ diffus et donc un temps de réverbération plus court.

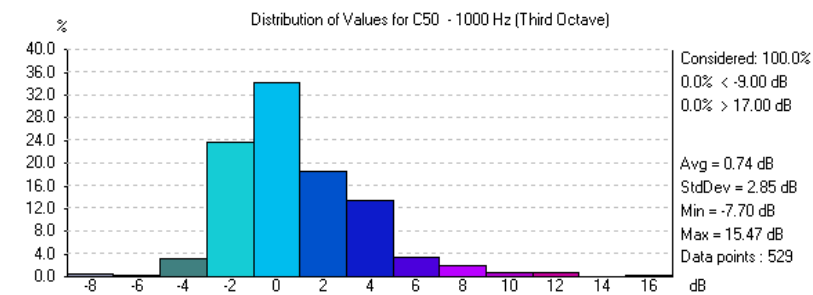
La simulation de cet indice C50 évalue l'évolution temporelle du champ sonore les 50ms qui suivent le son direct. La cartographie et la distribution des valeurs de la clarté à la fréquence 1000 Hz représentée dans la planche 3.22, illustrent une bonne clarté (supérieure à 0dB) dans les zones proche du Minbar. En progressant vers l'arrière de la mosquée les valeurs de la clarté sont égales à zéro au centre, mais dans les parties latérales droite et gauche on remarque les zones d'ombres engendrées par les quatre piliers, les valeurs de la clarté sont alors inférieures à zéro. On observe également ces mêmes valeurs, vers l'arrière dans la partie centrale sous la coupole ; une grande zone de mauvaise clarté est provoquée par le phénomène de focalisation engendrée par le grand volume de la coupole. Dans l'ensemble la moyenne de la clarté de la mosquée Ennour est acceptable 0,74 dB, avec un minimum de -7,7 dB, et un maximum de 15,47dB. Par contre la distribution de ces valeurs sur l'aire d'audience varie considérablement, entre l'ensemble des récepteurs et le récepteur 1 (Graphe de la planche 3.22). Sur la cartographie de la planche 3.22, illustrant les valeurs du C50 pour les différents récepteurs, la clarté chute de -10 dB entre le récepteur 1 proche du Minbar et le récepteur 6 situé à l'arrière. Cette différence est également élevée -7dB entre le récepteur 1 et le récepteur 4 situé au centre de la mosquée sous la coupole.

En conclusion, dans le cas de cette mosquée, même si la moyenne du rapport du niveau du champ direct par rapport au champ diffus est acceptable, les variations entre les différents récepteurs est considérable. La détérioration de la clarté dans les zones indiquées est engendrée par plusieurs facteurs liés au choix des matériaux de finition, à la présence des piliers et enfin au phénomène de focalisation provoqué par la coupole.



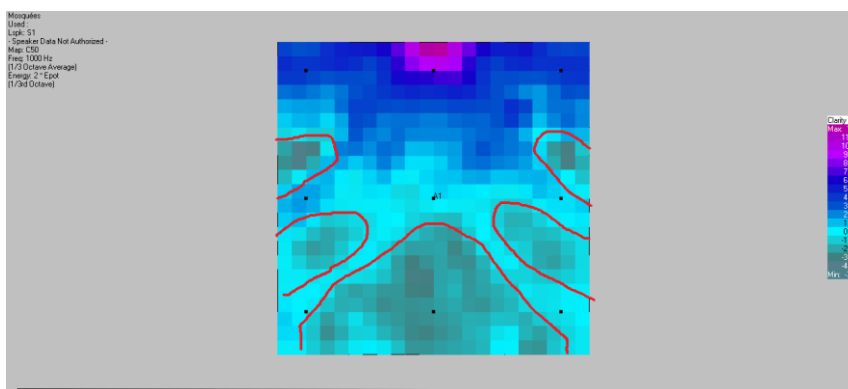


Graphe illustrant les valeurs du C50 pour les cinq récepteurs sur les trois plages de fréquences.



Histogramme de la distribution des valeurs du C50 à la fréquence 1000Hz sur l'aire d'audience. Valeur moyenne égale à 0,74dB.

(c) EASE 4.4 / Mosquées noor mosq / 26/04/2016 13:50:56 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme un



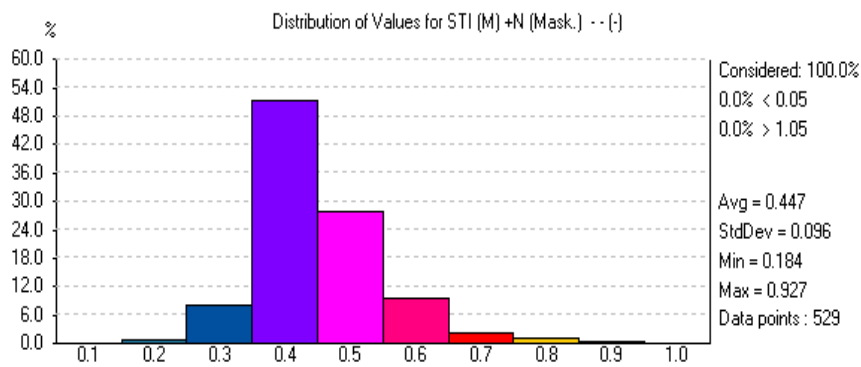
Cartographie du C50 sur la zone d'audience de la salle de prière. Les zones d'ombre des 4 poteaux et l'effet de focalisation de la coupole, tracés en rouge.

Planche 3.22 : courbes, distribution et cartographie des valeurs du C50 sur les principaux récepteurs de la mosquée Ennour.

#### **3.5.4. L'indice de l'intelligibilité.**

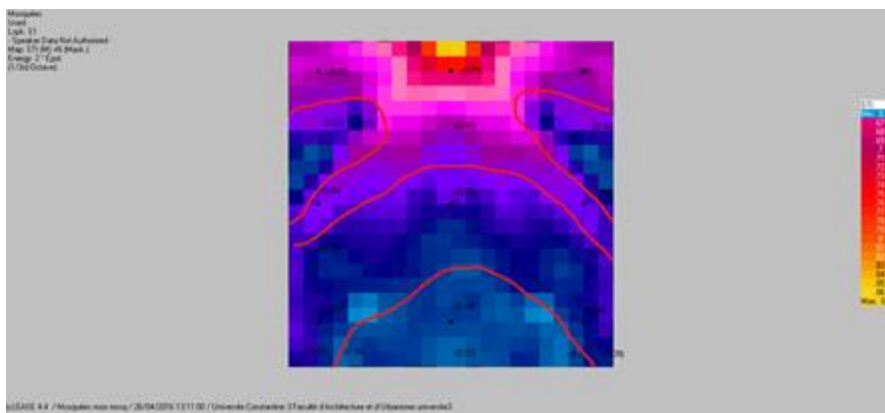
Le STI (Speech Transmission Index) permet d'évaluer le degré d'intelligibilité de la parole, il dépend de la différence entre le signal sonore et le bruit de fond. Il est compris entre 0 et 1, une bonne intelligibilité doit être supérieure à 0,6, une intelligibilité moyenne est comprise entre 0,4 et 0,5. Les résultats simulés de cet indice se rapprochent des résultats de la clarté C50. On remarque sur l'histogramme de la distribution du STI sur l'aire d'audience, (planche 3.23) une très bonne intelligibilité supérieure à 0,6 dans les 10% de l'espace proche du Minbar, une intelligibilité moyenne de 0,45 à 0,6 dans 28% de la zone autour du Minbar et une intelligibilité pauvre de 0,35 à 0,45 dans 50% de l'aire d'audience. (Planche 3.23)

Comme pour la clarté, on peut distinguer sur la cartographie du STI de l'aire d'audience, les zones en bleu foncé, tracées en rouge pour illustrer les parties de l'espace où l'intelligibilité est moyenne à faible. Cette zone se situe derrière les poteaux par rapport à la source qui se trouve au Minbar, ainsi que sous une partie de la couple qui occupe le centre de l'espace. On peut conclure que les valeurs du STI sont moyennes à faible avec une variation significative entre les différents récepteurs du fait des caractéristiques architecturales différentes de l'espace.



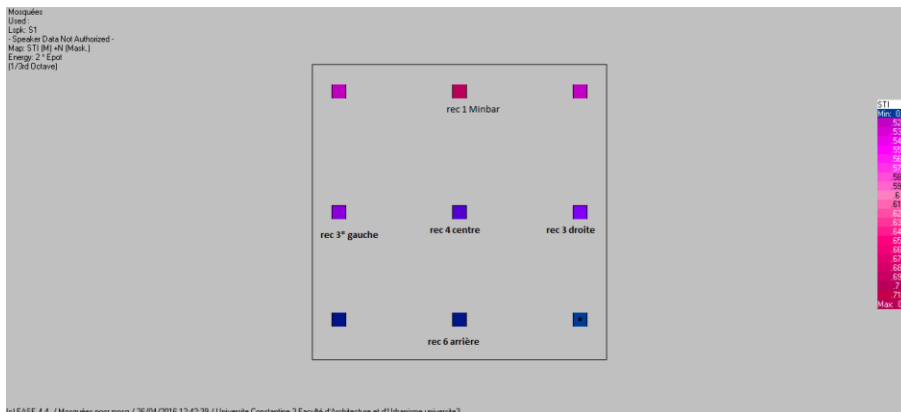
(c) EASE 4.4 / Mosquées noor mosq / 26/04/2016 13:06:29 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme un

Distribution des valeurs du STI sur l'aire d'audience, avec une moyenne de 0,44.



(c) EASE 4.4 / Mosquées noor mosq / 26/04/2016 13:11:00 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme un

Cartographie du STI sur l'aire d'audience, illustrant les zones d'ombres « en bleu » tracées en rouge, dues aux piliers avec un STI inférieur 0,45.



(c) EASE 4.4 / Mosquées noor mosq / 26/04/2016 12:42:39 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme un

Les valeurs du STI sur les neuf récepteurs varient entre 0,3 et 0,7.

Planche 3.23 : histogramme et cartographie de la distribution du STI sur l'aire d'audience ainsi que les principaux récepteurs de la mosquée Ennour.

### 3.5.5. Résultats des mesures in-situ de la mosquée Ennour.

Le protocole de mesure utilisé pour la mosquée Ibn Arabi <sup>25</sup> a été repris dans les mêmes conditions pour la mosquée Ennour. Les mesures ont été effectuées sur cinq positions pour la méthode du ballon et seulement trois positions pour la méthode avec la source omnidirectionnelle. Les points de mesure sont illustrés sur le plan du RDC de la mosquée Ennour sur la planche 3.25. Les tableaux 1 et 2 de la planche 3.23 comportent les résultats des critères acoustiques, mesurés in situ en utilisant les deux méthodes.

La comparaison des résultats du Tr30 nominal des deux méthodes (dans le tableau ci-dessous) nous donne des valeurs du Tr30 très supérieures à la valeur optimale <sup>26</sup> égale à 0.9 s. Néanmoins comme pour la mosquée Ibn Arabi, les valeurs du Tr30 issues des deux méthodes sont très proches.

Fréquences Hz	Tr 30 moyen de tous récepteurs mesuré avec la source omni	Tr 30 moyen de tous les récepteurs mesuré avec le ballon
500 Hz	3.36 s	3.74 s
1000 Hz	2.00 s	2.14 s
<b>Fréquence moyenne (500 et 1000 Hz)</b>	<b>2.68 s</b>	<b>2.94 s</b>

Tableau 2 ; les valeurs du Tr 30 nominal mesuré avec les deux méthodes.

Les résultats du Tr30 en fonction des récepteurs sur l’histogramme la planche 3.24 indique un Tr nominal le plus élevé **2.4 s** pour le récepteur 4 au centre sous la coupole. En effet la réverbération à cette position est élevée, du fait des réflexions multiples dues à la focalisation de la coupole.

Les résultats comparés du même critère entre la simulation et la mesure indique (comme pour la mosquée Ibn Arabi) des valeurs plus élevés issues des mesures (tableau 1 planche 3.25). Enfin en comparant sur l’histogramme de la planche 3.25, les résultats du même critère en fonction des récepteurs, on note une certaine cohérence entre les des valeurs du Tr30 simulées et mesurées.

---

<sup>25</sup> Voir sous-chapitre 3.3.3.

<sup>26</sup> Voir sous-chapitre 2.6.5.

Position des récepteurs	Tr 30 (s)		C50 (dB)		EDT (s)	
	500 Hz	1000 Hz	500 Hz	1000 Hz	500 Hz	1000 Hz
Minbar (1)	3.92	2.43	1.4	3.9	2.47	1.86
Centre (4)	3.92	2.6	-3.1	2.6	3.54	2.44
Centre Gauche (3*)	2.17	0.98	-3.5	9.1	2.79	0.24

Tableau1 : les valeurs des critères acoustiques mesurés avec la méthode de la source omnidirectionnelle pour les fréquences 500 et 1000 Hz sur trois récepteurs.

Les valeurs du Tr30 en seconde mesurés sur les cinq récepteurs					
Fréquence (Hz)	500	1000	2000	4000	moyenne
Minbar (1)	2,94	2,27	1,51	1,35	2.01
Centre Gauche(3*)	3,75	2,42	1,45	1,33	2.2
Centre Droite(3)	3,69	1,96	1,54	1,45	2.16
Centre (4)	4,72	2,12	1,5	1,27	2.4
Arrière (6)	3,75	1,97	1,45	1,27	2.03

Tableau2 : les valeurs du Tr 3mesurés avec la méthode du ballon de baudruche pour les fréquences de 500 à 4000 Hz

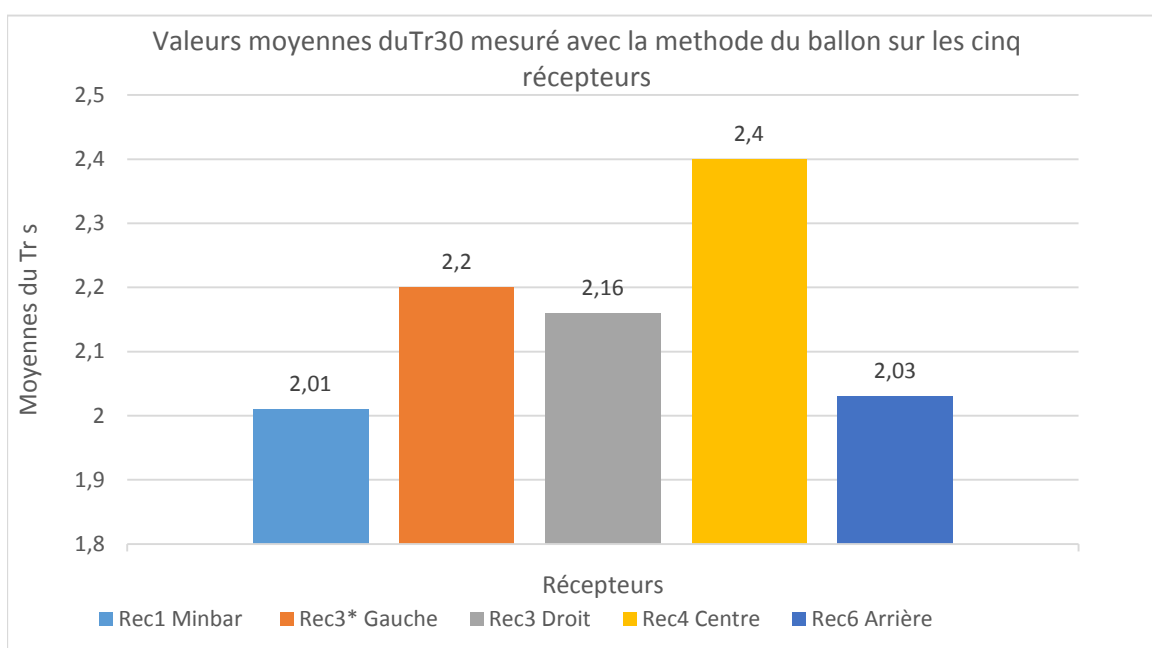
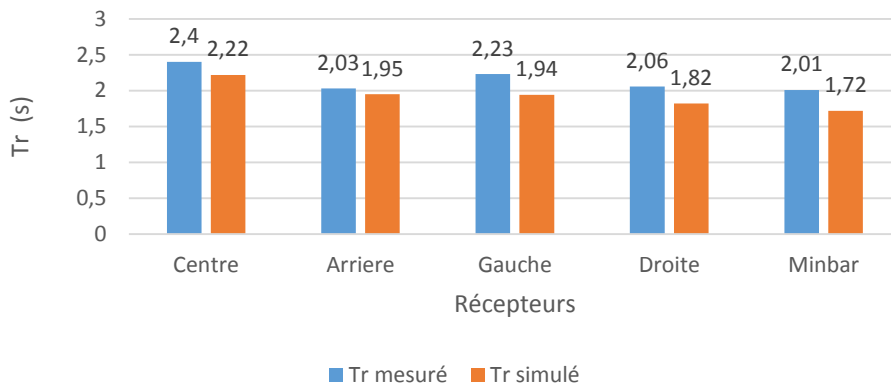


Planche 3.24 : Valeurs des critères acoustiques mesurés in situ avec les deux méthodes pour la mosquée Ennour.

Valeurs moyennes du Tr30 simulé et mesuré avec la méthode du ballon sur les cinq récepteurs



	Centre	Arrière	Gauche	Droite	Minbar
Tr 30 simulé (s)	<b>2.22</b>	1.95	1.95	1.82	1.72
Tr 30 mesuré(s)	<b>2.4</b>	2.03	2.23	2.06	2.01

Tableau 1 : comparaison entre les valeurs du Tr30 nominal simulées et mesurées avec la méthode du ballon sur les cinq récepteurs.

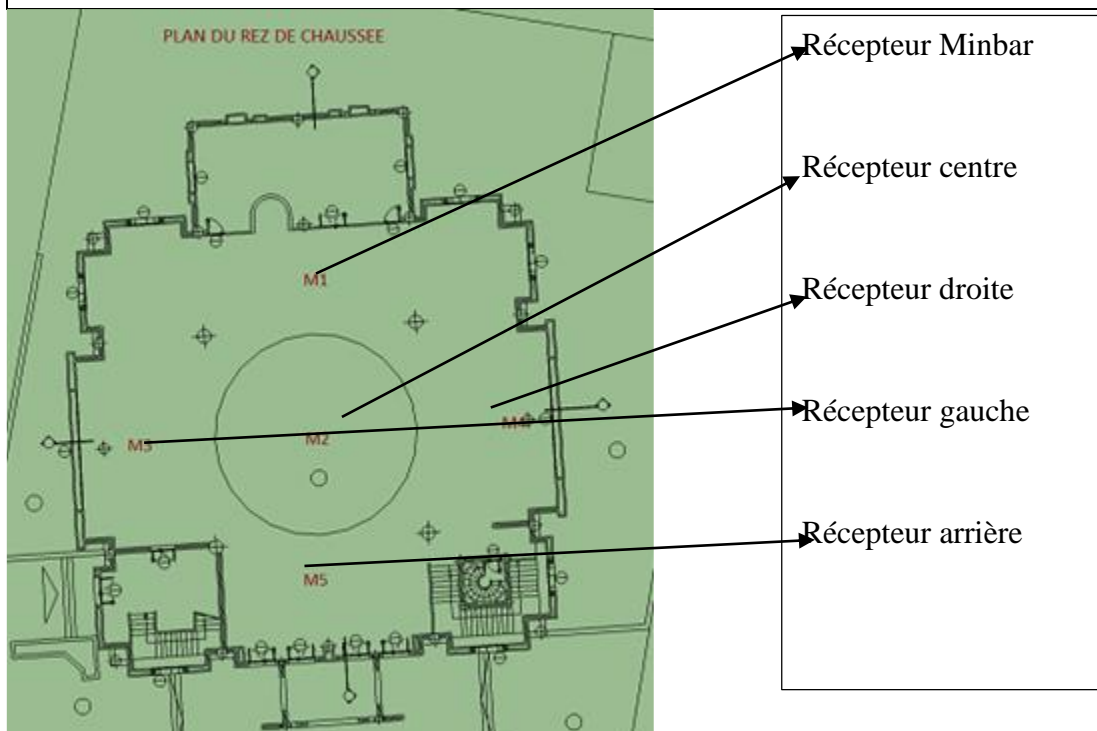


Planche 3.25 : comparaison des valeurs du temps de revrberation simulées et mesurées de la mosquée Ennour.

### **3.5.6. Conclusion de la simulation.**

La simulation acoustique des différents indices, ainsi que les mesures in-situ de ces indices, a permis d'établir un diagnostic détaillé de l'espace de la mosquée vis-à-vis de ses qualités acoustiques. En débutant par la durée de réverbération précoce et tardive, les valeurs ont révélé un espace assez réverbérant, notamment au niveau des positions situées au centre sous la coupole et à l'arrière de la mosquée. Ces premiers résultats orientent notre travail de réaménagement vers ces emplacements spécifiques, c'est-à-dire le mur arrière et la coupole, dans le but d'avoir un espace beaucoup plus uniforme dans la répartition des matériaux absorbants.

Concernant les indices liés à la clarté et à l'intelligibilité de la parole, le niveau global de clarté du message était moyen à faible avec des variations importantes entre les différentes positions des récepteurs. Ainsi les inconvénients liés aux positions situés à l'arrière des poteaux et sous la coupole ont été relevés. En effet les poteaux dans les mosquées constituent des masques qui bloquent le son, la solution technique étant de positionner et d'orienter la sonorisation vers ces emplacements. La coupole est aussi un composant architectural qui fonde l'identité de la mosquée, mais qui peut créer des problèmes acoustiques, que l'on peut toutefois éviter par certains aménagements spécifiques.

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

## **3.6 Enquête auprès des fidèles des deux mosquées.**

### **3.6.1. Mise en œuvre de l'enquête.**

L'enquête par questionnaire fermé effectué auprès des fidèles des mosquées,<sup>27</sup> a pour but de collecter des informations pour l'évaluation subjective du confort d'écoute dans les mosquées. Cette évaluation pourra nous renseigner sur la dimension perceptive des fidèles pour traduire leurs sensations auditives. Pour juger de la qualité acoustique à l'aide d'appréciation subjective, le questionnaire a été structuré en rapport avec les différents paramètres, pouvant influencer cette appréciation. Ces paramètres sont liés d'un côté aux modalités sensorielles et de l'autre aux attributs de l'espace architectural. On a effectué la saisie et le traitement de l'enquête par le logiciel Modalisa.

L'établissement du questionnaire s'est fait en prenant comme référence l'ensemble des critères acoustiques définis précédemment.<sup>28</sup> Le choix de ces facteurs perceptifs dans l'enquête est essentiel, puisque ces indices acoustiques vont décrire une sensation auditive qui sera calculée et mesurée sous forme de grandeur physique. Ainsi les résultats des indices acoustiques obtenus par la mesure, puis l'enquête, pourront être comparés et commentés. Les indices objectifs corrélés avec les facteurs perceptifs sont : l'appréciation de la clarté des paroles, représente le critère du C50, la qualité des paroles de l'imam, traduit le critère de l'intelligibilité, le STI et la présence de l'écho exprime le critère du temps de réverbération Tr60.

Dans le but de faciliter la compréhension des questions posées, on a opté pour une rédaction dans un style direct, avec un vocabulaire très simple en évitant les termes techniques. Toutes les questions posées offrent un nombre précis de réponse rédigée à la première personne du singulier, impliquant la personne interrogée. On a également prévu des questions qui se recoupent pour vérifier la fiabilité et la cohérence des questions. En raison de l'originalité du sujet (pour les répondants), on a essayé de formuler des questions claires, concises et précises.

Les premières questions permettent de collecter des informations, liées à la position du fidèle par rapport à la source (voix de l'imam) et à l'appréciation de l'intensité et de la clarté du message perçu. La deuxième série des questions, permettent de collecter les appréciations des fidèles vis-à-vis de certains facteurs perceptifs, choisis pour leurs corrélations avec les critères acoustiques calculés, à savoir la clarté C50, le temps de réverbération Tr 60 et l'intelligibilité de la parole le STI. Enfin la dernière série de question, tente de recueillir les jugements de

---

<sup>27</sup> Voir le texte du questionnaire en Annexe 2.

<sup>28</sup> Voir sous-chapitre 1.5.4.



fidèles, liés à l'ergonomie des différentes activités pratiquées par les fidèles (prière journalières, prière du vendredi et prêche) et leurs corrélations avec le confort d'audition.

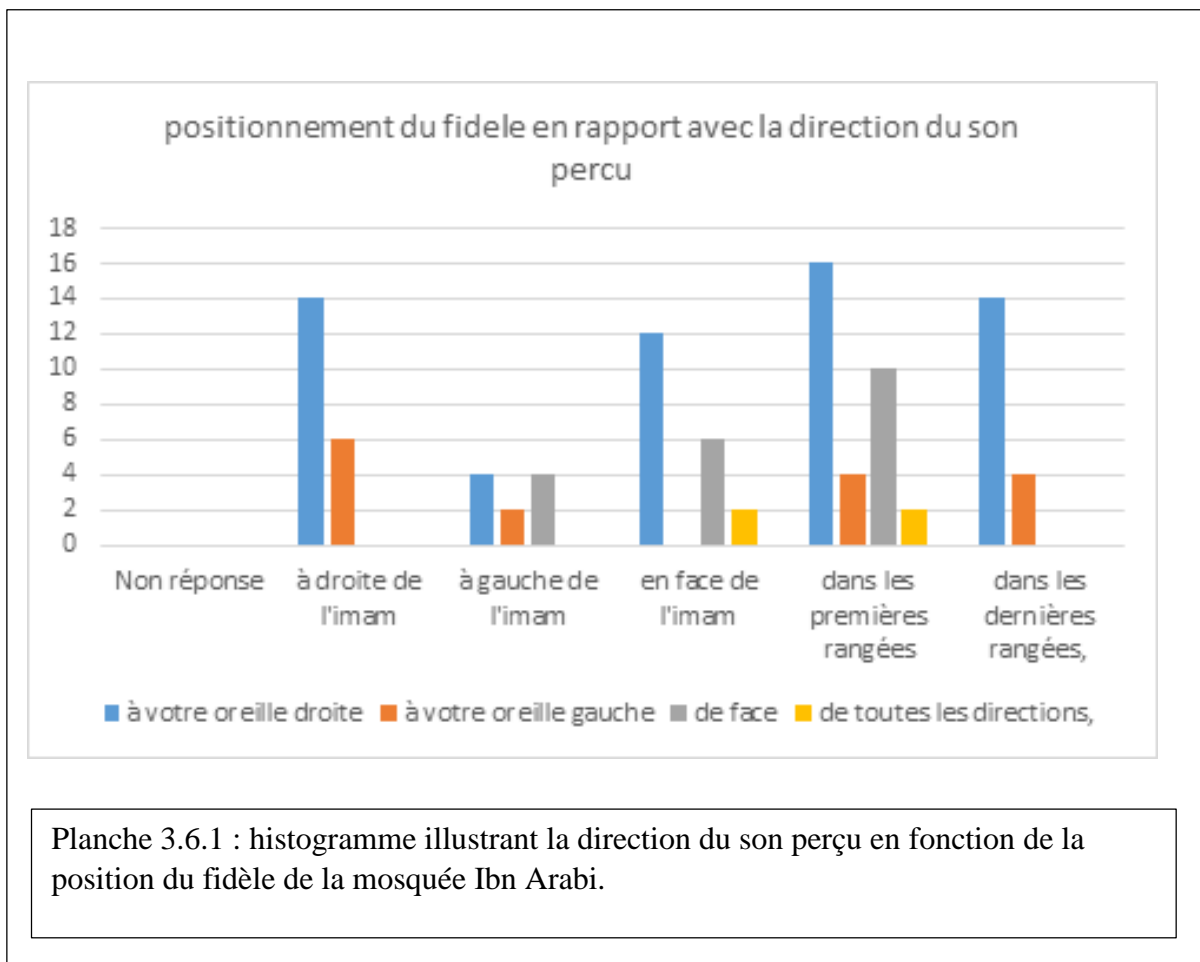
### **3.6.2. Déroulement de l'enquête.**

En raison du caractère nouveau et inhabituel du sujet de l'enquête, on a débuté notre travail par une pré-enquête dans le but de tester le questionnaire, de vérifier la clarté des questions et la facilité d'y répondre. L'enquête pour chaque mosquée, s'est déroulée en deux temps. Dans un souci de faisabilité et en raison des contraintes sociales liées à l'accès de la mosquée pour une femme, nous avons choisi d'exploiter les réseaux sociaux pour nous rapprocher de la population cible. Malgré le temps assez long qu'on a passé dans cette prospection, cette dernière a donné de très bon résultat. Nous avons ainsi pu bénéficier du concours de jeunes personnes motivés (des habitués des mosquées), qui nous ont aidés dans notre démarche d'enquête. Notre travail d'enquête a débuté par un premier contact avec notre partenaire local pour discuter des objectifs et des modalités de l'enquête. Un premier échantillon de personnes hétéroclites a ainsi été sélectionné pour la première phase test de l'enquête. On a donc effectué une première enquête préliminaire pour tester le niveau de compréhension des questions posées, en rapport avec l'âge et le niveau d'instruction du répondant. L'analyse des résultats de cette pré-enquête, a permis de sélectionner un ensemble de fidèles pour constituer notre échantillon de répondants ; En écarté de notre échantillon les fidèles qui ont remis leur questionnaire avec un nombre important de non-réponses. Ces derniers représentaient une majorité de seniors. notre questionnaire définitif plus élaboré a été soumis à l'échantillon sélectionné, constitué majoritairement de jeunes.

### 3.6.3. Résultat de l'enquête de la mosquée Ibn-Arabi.

On débutera le traitement de l'enquête par un tri à plat, dans le but d'avoir une estimation globale aux différentes questions posées, on effectuera par la suite un tri croisé afin d'établir les corrélations existantes entre certains aspects de la pratique du fidèle avec le confort d'audition. Les résultats du tri à plat permettent d'exposer les conclusions suivantes :

Malgré les différentes positions occupées par les fidèles dans la mosquée, la majorité des réponses 60% estiment recevoir le son à l'oreille droite, cela nous pousse à émettre l'hypothèse que l'intensité de l'énergie sonore des hauts parleurs qui diffusent dans cette partie de la mosquée est plus importante. (Planche 3.6.1)



L'évaluation perceptive des trois indices acoustiques cités plus haut le C50, le Tr, et le STI traduisant respectivement, la clarté des paroles, la présence d'écho et la qualité du message sonore ; ont reçus des réponses dénotant globalement un certain confort d'écoute, avec pour la qualité du son 40% la jugeant acceptable. Pour la clarté du message 68% estiment entendre de façon distincte toutes les paroles de l'imam ; 56% ne sont pas gênés par les bruits intérieurs et extérieurs enfin 72% pensent qu'il n'y a pas d'écho dans la mosquée. On remarque néanmoins, des différences d'appréciation en fonction de la position du fidèle par rapport à la source (l'emplacement de l'imam).

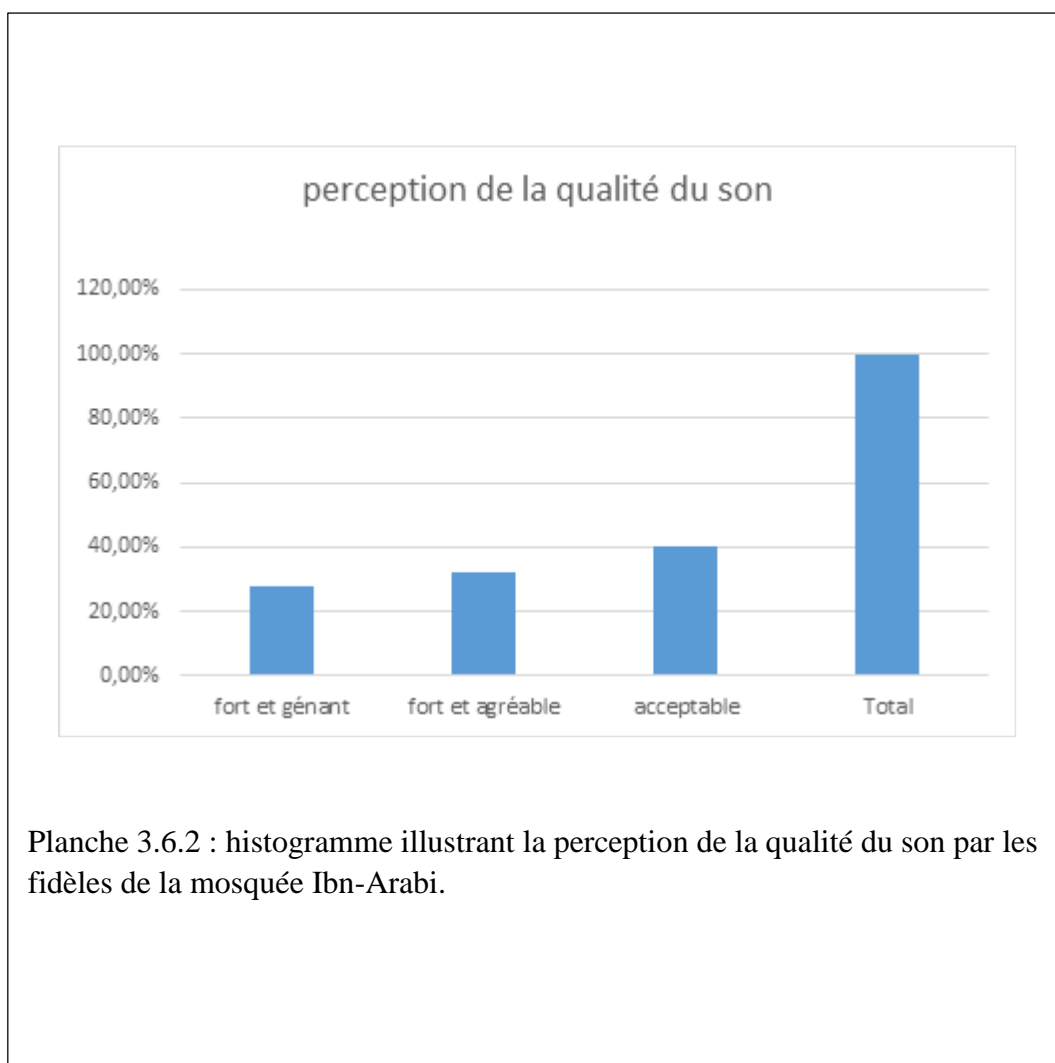


Planche 3.6.2 : histogramme illustrant la perception de la qualité du son par les fidèles de la mosquée Ibn-Arabi.

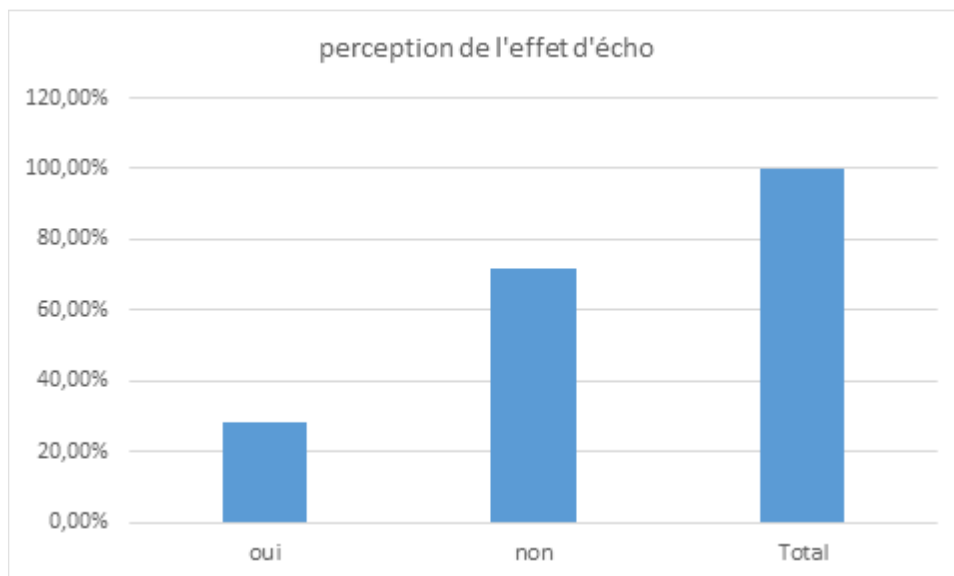
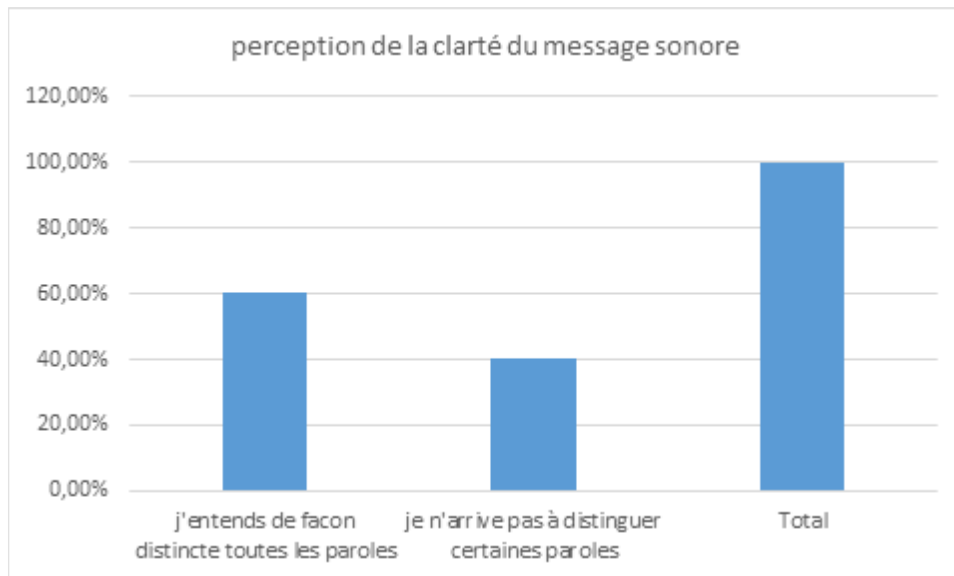


Planche 3.6.3 : histogrammes illustrant la perception par les fidèles de la clarté du message et de l'écho de la mosquée Ibn- Arabi.

En conséquence, en effectuant un tri croisé entre la position des fidèles par rapport à l'imam, et leurs appréciations auditives, nous avons obtenu des résultats très significatifs.

Concernant la qualité du son, sur les 40% qui ont jugés la qualité du son acceptable, 8% se positionnent dans les premières rangées et 12% dans les dernières rangées. Sur les 28% qui jugent que le son est fort et gênant, 12% sont dans les premières rangées et seulement 2% dans les dernières rangées.

Concernant la présence de l'écho, sur les 28% des répondants 10% font partie des premières rangées et seulement 4 % sont dans les dernières rangées. Cet écho est jugés présent durant toutes les activités : les prières journalières, la prière et le prêche du vendredi et les prières du mois de ramadhan.

Enfin l'évaluation perceptive de la clarté du message parlé, révèle pour ceux « qui entendent de façon distincte toutes les paroles de l'imam » 28% dans les premières rangées et seulement 2% dans les dernières, par contre pour ceux qui estiment qu'ils « n'arrivent pas à distinguer certaines paroles de l'imam » 16% se positionnent dans les dernières rangées et seulement 4% dans les premières.

Les réponses à la dernière série de questions, évaluant la relation entre le confort d'écoute et la nature de la pratique du fidèle ; sont comme suit : 20% des fidèles estiment entendre le message de l'imam avec un écho durant les cinq prières journalières et la prière du vendredi. Le jugement relatif à la nature de l'écho perçu par les fidèles, dénote un grand nombre de non réponse 50% ; ce qui reflète une incompréhension de la question et une incapacité à y apporter une réponse. Les 50% qui ont apporté une réponse à cette question, estiment en majorité 28 %, que cet écho est résonnant mais pas gênant. Enfin 68% jugent le message de l'imam plus clair dans la position debout durant les prières par rapport à la position assise durant le prêche. Ces résultats ne présentent pas des différences notables par rapport au positionnement des fidèles dans les rangées par rapport à l'imam. (planche 3.6.4.)

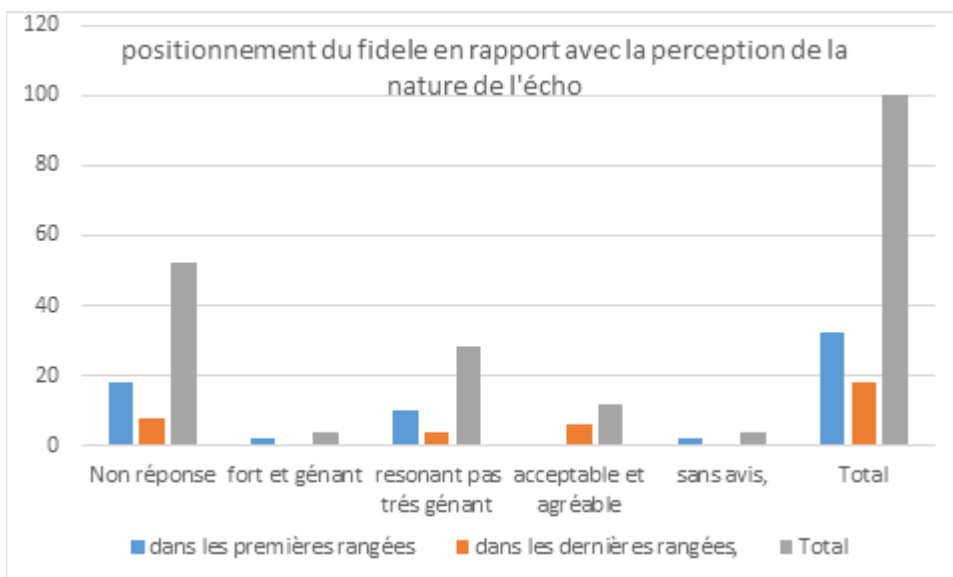
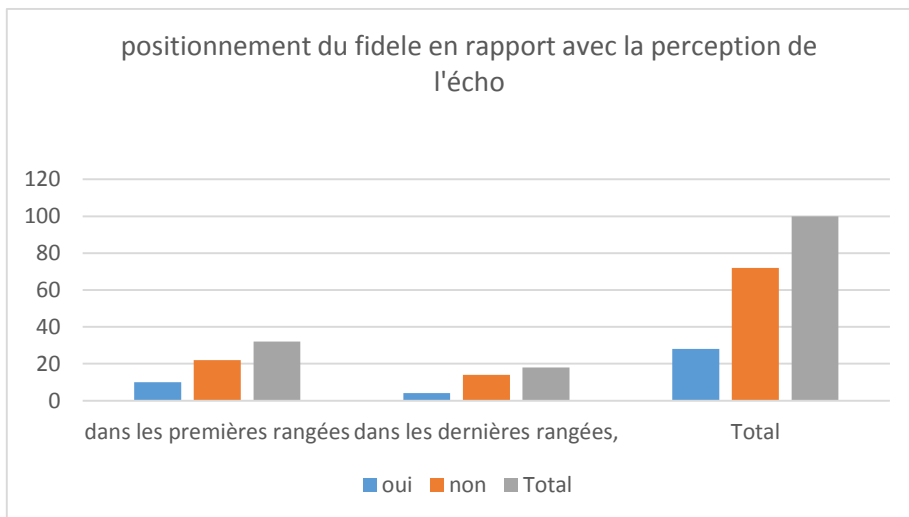
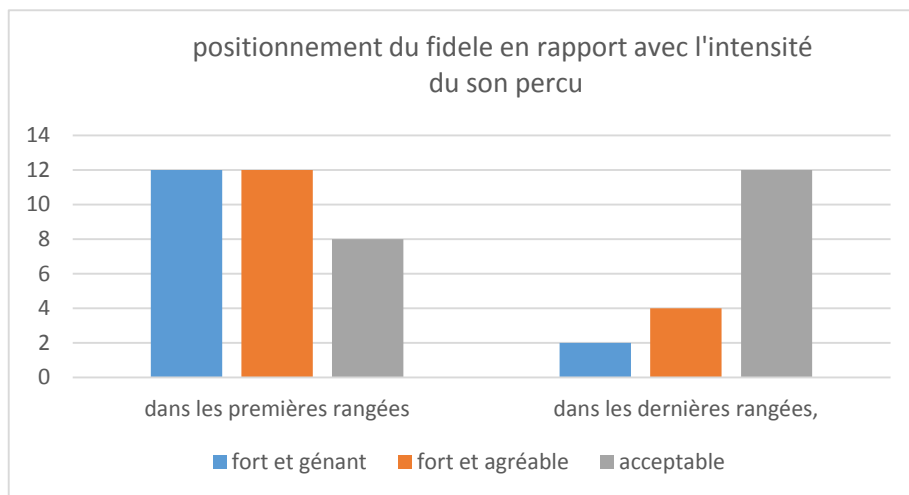
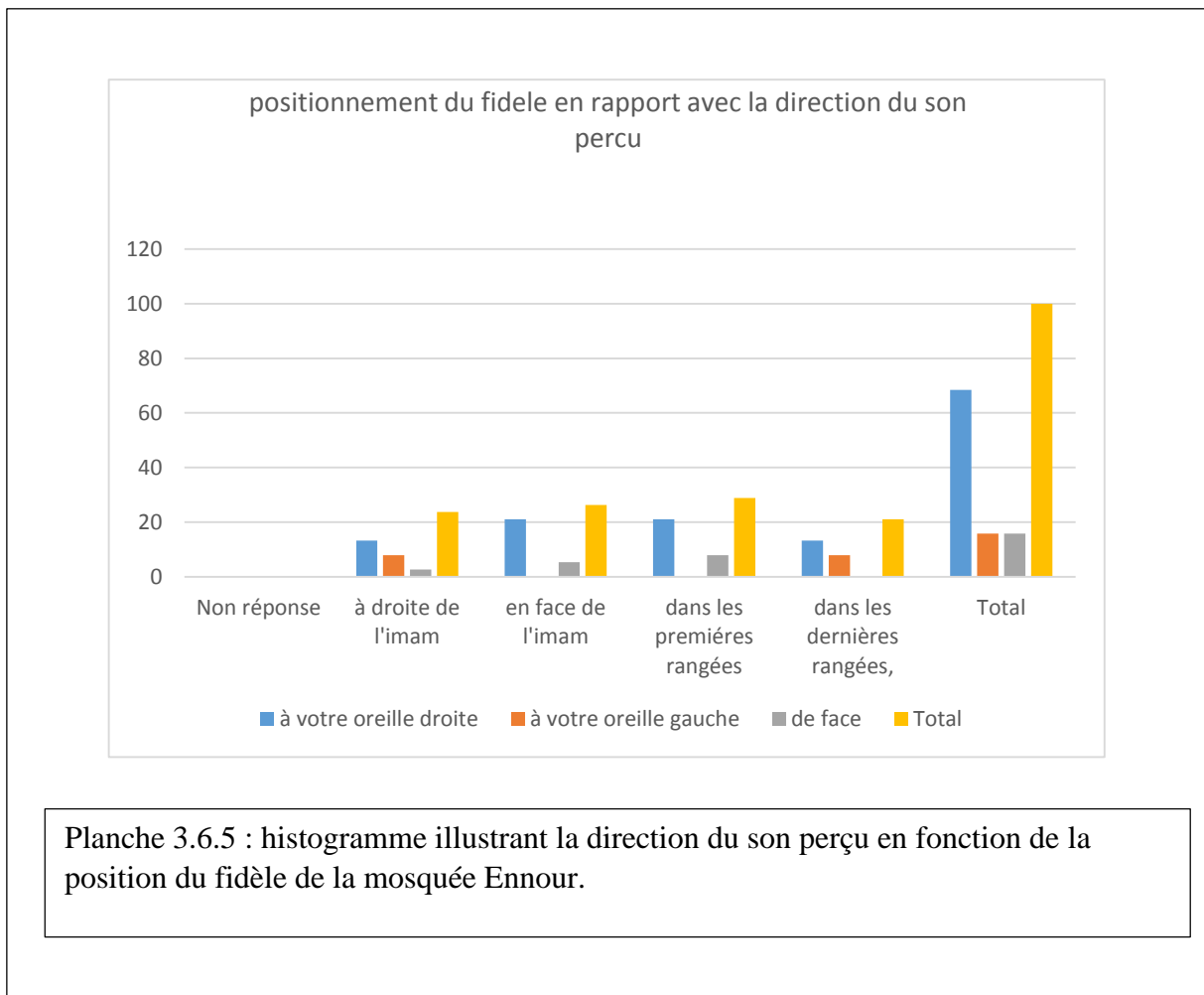


Planche 3.6.4 : histogrammes illustrant la perception auditive des fidèles, en fonction de leurs positions par rapport à la source de la mosquée Ibn Arabi.

### 3.6.4. Résultats de l'enquête de la mosquée Ennour.

La mosquée Ennour possède une surface et un volume moins important que la mosquée Ibn-Arabi. Ce fait se reflète sur les résultats de l'enquête auprès des fidèles, puisque la distance entre les premières et les dernières rangées est moins importante. Ce qui en résulte un rapprochement des appréciations perceptives de la qualité sonore émises par les fidèles.

Le traitement des réponses relatives à l'appréciation auditive de la direction du son reçu par les fidèles, révèle des résultats similaires à la mosquée précédente. En effet indifféremment de la position occupée dans la mosquée, 68% des fidèles estiment recevoir le son à leur oreille droite. Cette similitude des appréciations perceptives fournis par les fidèles, peut supposer diverses explications et hypothèses.



Les réponses relatives à l'évaluation perceptive de la qualité du son, la clarté du message sonore et la présence de l'écho ; dénotent dans l'ensemble toutes positions confondus, une appréciation de la qualité du son fort et agréable à 78%, de l'absence de l'écho à 63%, et enfin d'une mauvaise intelligibilité du message parlé puisque 63% des fidèles estiment ne pas distinguer quelques mots des paroles perçus. La clarté du message parlé est directement assujettie à la présence d'un bruit de fond qui pollue l'intelligibilité de la parole ; on remarque à cet effet que 68 % des fidèles estiment être gênés par le bruit de fond intérieur. On constate ainsi que la présence du bruit de fond pollue la clarté du message, ce qui en résulte une mauvaise intelligibilité.

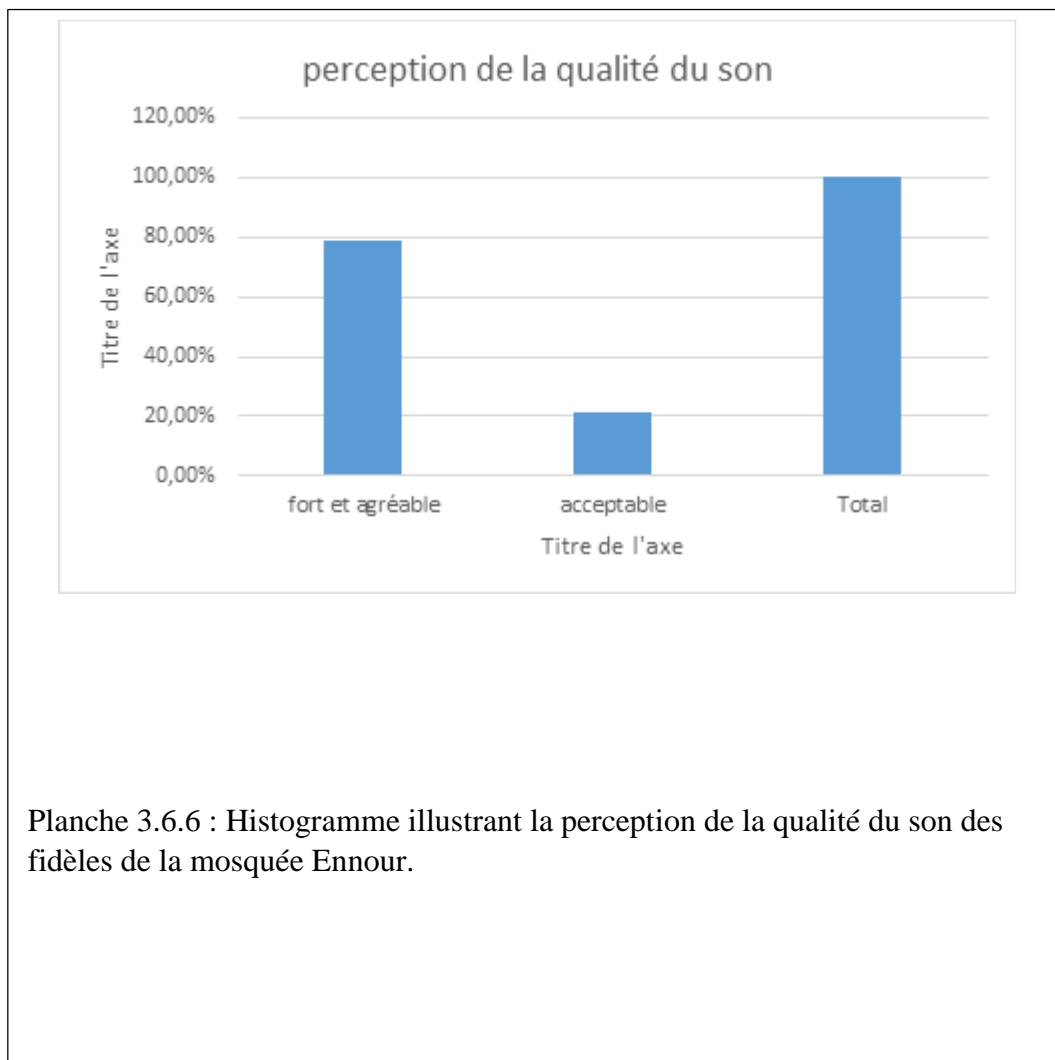


Planche 3.6.6 : Histogramme illustrant la perception de la qualité du son des fidèles de la mosquée Ennour.



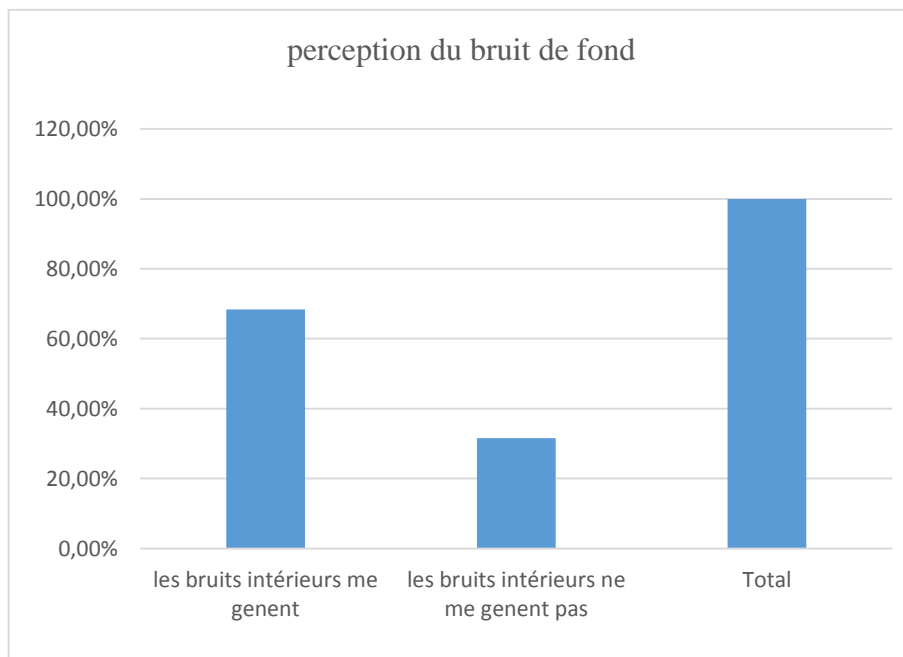
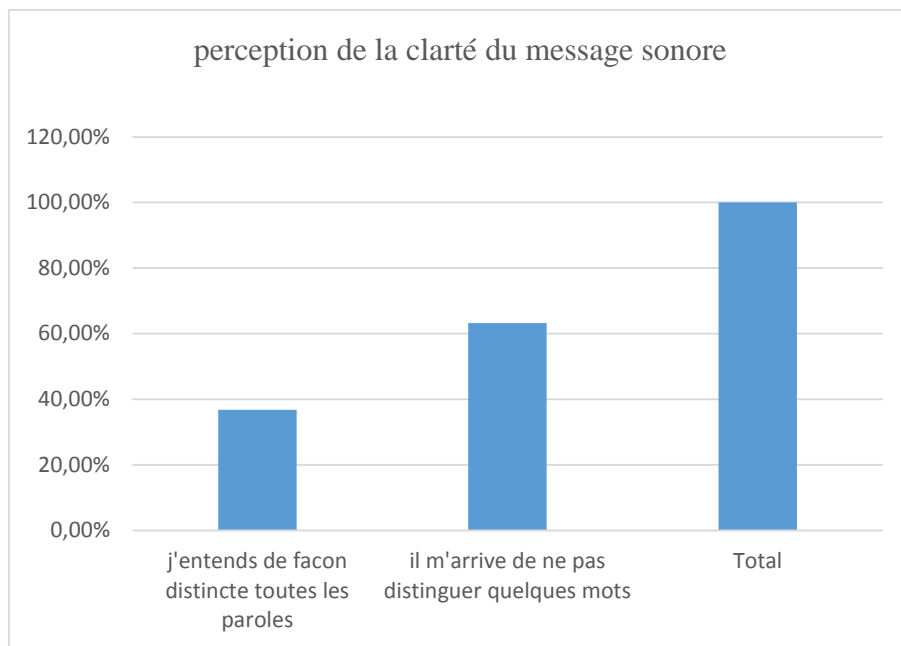


Planche 3.6.7 : histogrammes illustrant la perception de l'intensité du son de la clarté du message et du bruit de fond de la mosquée Ennour.

L'évaluation perceptive des trois indices acoustiques cités plus haut en rapport avec la position des fidèles dans la mosquée, nous fournit des indications très intéressantes sur la qualité sonore en fonction de la distance par rapport à la source. On débute par les résultats concernant l'appréciation de la qualité du son en fonction de la position du fidèle. Le son est perçu comme étant « fort et agréable » à 21% dans les premières rangées, et 18 % dans les dernières. Ainsi on remarque pour cette question un net rapprochement dans les réponses, comparée à la mosquée Ibn-Arabi. Concernant la présence de l'écho, il est perçu dans les premières rangées par 5% contre 13 % dans les dernières rangées. Enfin pour la clarté du message, 18 % dans les dernières rangées estiment ne pas distinguer toutes les paroles de l'imam, contre 13% dans les premières rangées.

Les réponses à la dernière série de questions concernant la qualité de la perception sonore en fonction des différentes activités du fidèle, fait ressortir les désagréments pour les fidèles qui occupent les rangées éloignées de la source, en l'occurrence l'emplacement de l'imam. En fait 7,9 % des fidèles dans les dernières rangées en position assise, sont gênés par l'écho durant le prêche du vendredi contre 5,3 % dans les premières rangées. La question relative à la nature de l'écho perçu, laisse apparaître comme pour la mosquée Ibn-Arabi un pourcentage important de non réponse 47,4% les fidèles qui ont donné une réponse, estiment à 36% que l'écho est résonnant pas très gênant, et 15% pensent qu'il est agréable. Enfin la majorité des fidèles 68% estiment que la qualité sonore perçue est la même dans la position assise durant le prêche, ou debout pendant les différentes prières.

### **3.6.5. Discussion des résultats.**

L'évaluation perceptive des fidèles, quant à la qualité sonore des deux mosquées, dénote une nette différence entre les premières et les dernières rangées des fidèles. Ceci s'explique parfaitement par l'évolution temporelle et spatiale de la propagation du son. En effet la diffusion de l'énergie sonore dans un espace, change dans le temps tout en s'éloignant de la source. En conséquence, les premières rangées proche de la source, perçoivent un son différent en intensité et en clarté, par rapport aux dernières rangées éloignées de la source.

La présence de l'écho est jugée acceptable, donc sans gêne pour le confort de l'audition par l'ensemble des fidèles indifféremment de leurs positions. Ceci s'explique par le fait que dans les mosquées, la récitation du coran utilisent différentes tonalités proches de la musique ; ce qui nécessite la présence d'une certaine réverbération.

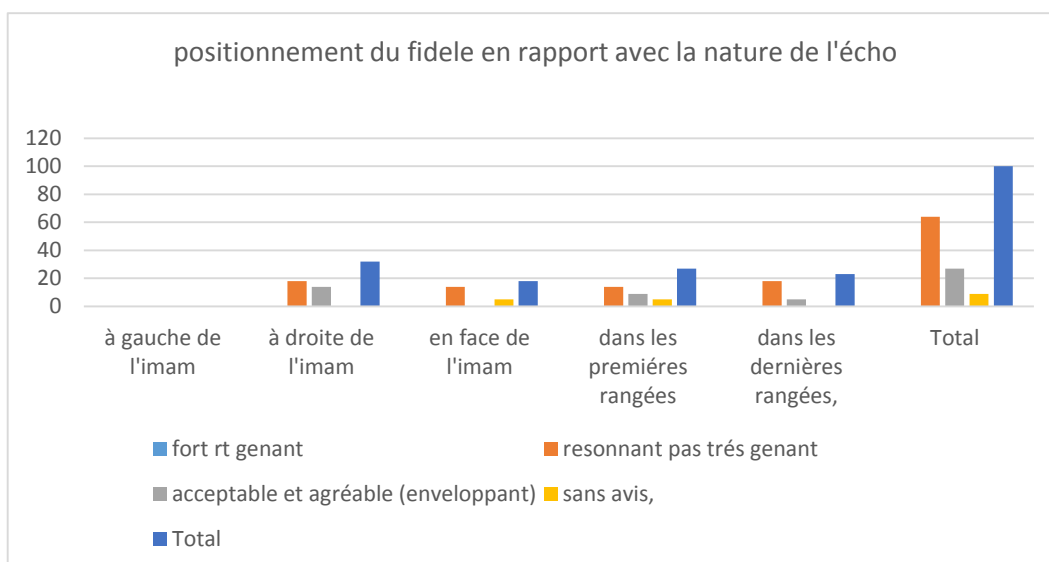
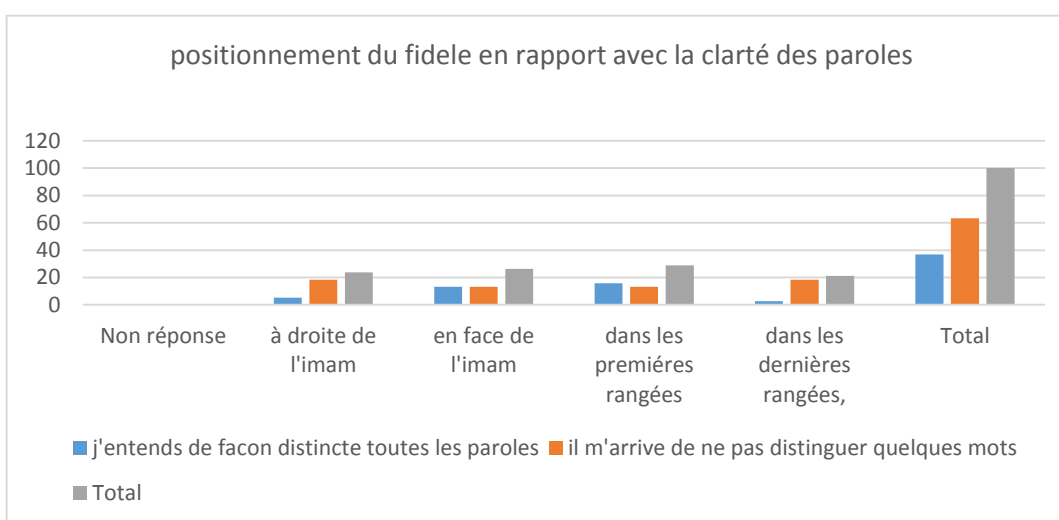
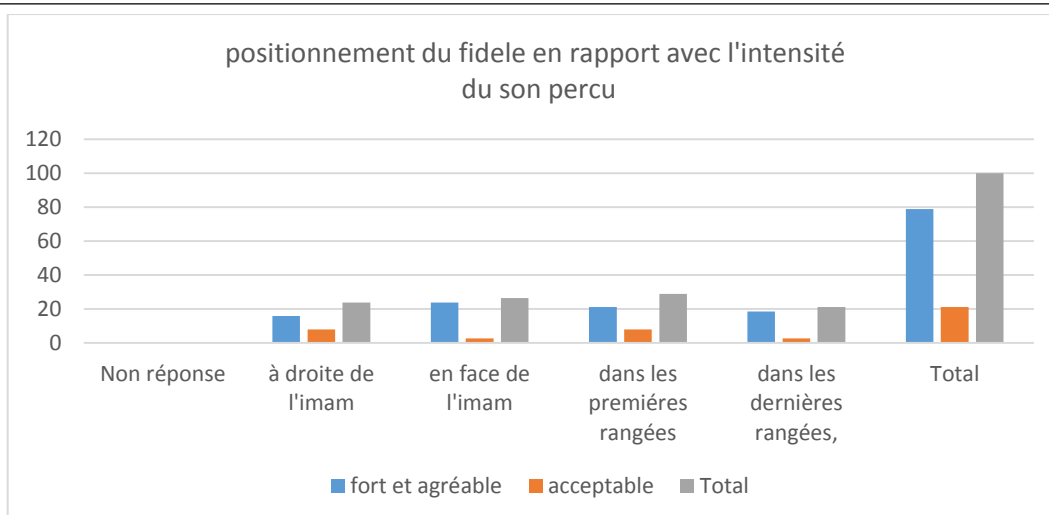


Planche 3.6.8 : histogrammes illustrant la perception auditive des fidèles en fonction de leur position par rapport à la source, de la mosquée Ennour.

### **3.7. Conclusion du chapitre 3.**

Dans ce chapitre, on a tenté d'établir une analyse acoustique détaillée de notre objet d'étude à savoir les mosquées choisies, notre investigation a concerné également, les concepteurs et les usagers de ces édifices. Cette étude a permis d'aborder la question de la qualification acoustique des mosquées par des méthodes expérimentales. On a également mis en évidence le rôle et les attentes des concepteurs de ces espaces, quant aux exigences du confort acoustique des mosquées. Le champ de la qualification subjectif du confort acoustique des mosquées, a été abordé à travers un questionnaire destiné aux usagers de ces espaces.

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

## **Chapitre 4 : les principes des corrections acoustiques et propositions architecturales.**

### **4.1 Introduction**

A partir des résultats de cette deuxième partie, ce chapitre propose des pistes de structuration et de développement de propositions architecturales en vue d'améliorer les conditions d'écoute dans les mosquées. L'objectif de cette partie est de préciser la nature, la structure et le mode de fonctionnement des réponses architecturales proposées. On débutera par une présentation détaillée des principes et outils pour une mise en œuvre d'un environnement acoustique de qualité. La phase suivante concerne les modes d'implémentation informatique, pour évaluer l'impact des solutions préconisées sur nos modèles de mosquées. Enfin en phase finale on apportera nos propositions architecturales, sous différentes formes graphiques et normatives.

### **4.2 Principes fondamentaux pour une bonne acoustique des salles.**

Les résultats de la qualification acoustique de nos modèles de mosquées, ont dévoilé une négligence totale des aspects acoustiques de ces espaces, destinés principalement à la communication orale. Comment pallier à une mauvaise acoustique par des aménagements et des principes de conception simples ? Quelles sont les spécifications acoustiques permettant une communication claire et précise ? Pour répondre à ces questionnements, certains aspects propres à l'ensemble des espaces d'écoutes seront abordés, tout en précisant par la suite les aménagements spécifiques qu'on préconise pour les mosquées.

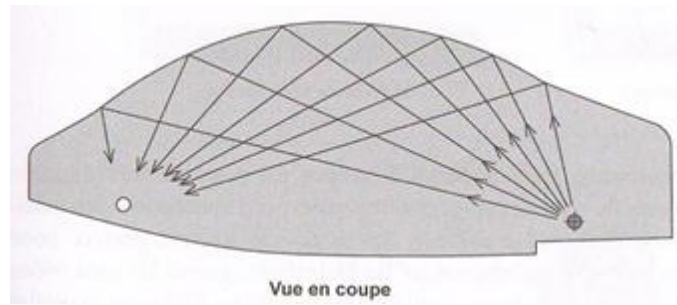
#### **4.2.1. Les paramètres géométriques.**

Les paramètres géométriques de l'espace destiné à la communication, pouvant contribuer à assurer une bonne acoustique se résument dans trois aspects qui sont : la forme de l'espace, ses proportions géométriques et son volume acoustique.

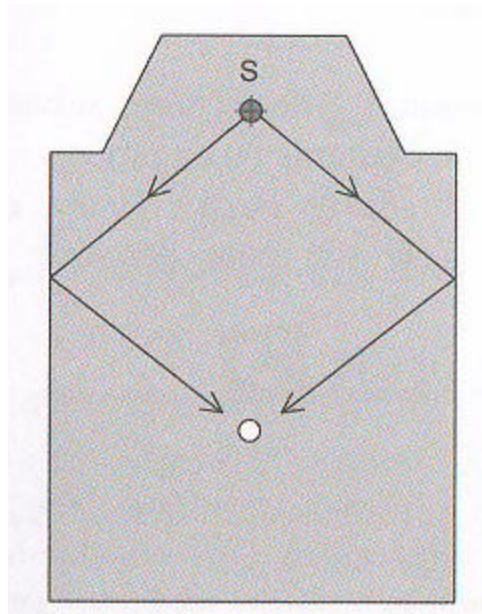
## **A. La forme de l'espace.**

Il n'existe pas de forme précise que l'on peut préconiser pour un espace dédié à la communication, une grande liberté est laissée aux concepteurs. Il existe cependant des formes trop problématiques que les spécialistes conseillent d'éviter. (Planche 4.1)

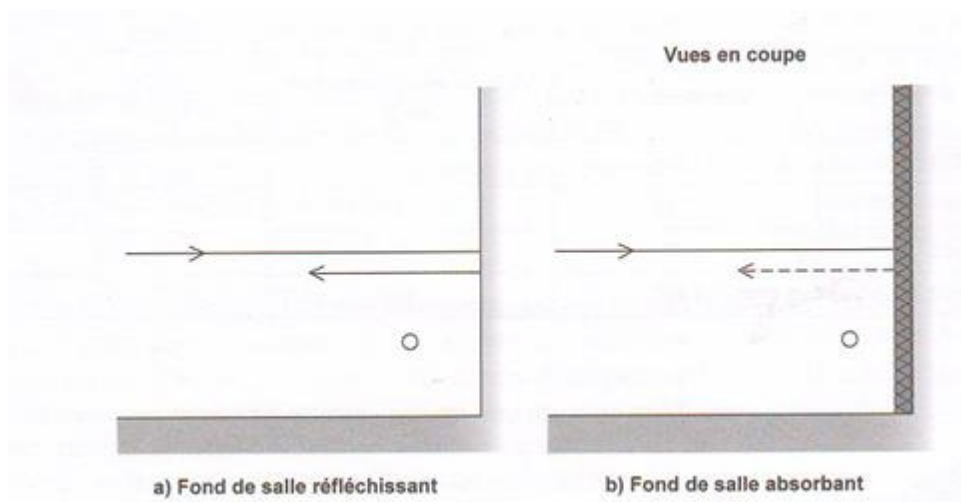
- Les formes concaves que ce soit en fond de salle ou en plafond car on sait que les formes concaves génèrent le phénomène de focalisation qui a pour effet d'accroître le temps de réverbération.
- Les grandes surfaces réfléchissantes parallèles : deux parois parallèles dans un grand espace, créent l'effet de focalisation si elles sont réfléchissantes
- Les grandes surfaces plates réfléchissantes trop éloignées : les parois situées au fond de l'espace faisant face à la source, doivent être recouvertes par des matériaux absorbants ou diffusants.
- Les zones d'ombre acoustiques : ce sont des espaces qui empêchent l'arrivée du son dans une ou des parties de l'espace, comme les poteaux dans les mosquées ou les balcons dans les théâtres.



Risque de focalisation lié aux formes concaves.



Risque de focalisation lié aux formes parallèles réfléchissantes



Risque d'écho lié au fond de salle réfléchissant.

Planche 4.1 : schématisons de problèmes acoustiques liés à certaines conceptions de formes d'espaces (Hamayon, L., 2014)

## B. Le volume acoustique.

Le volume acoustique est une donnée qui permet d'évaluer pour chaque espace, le volume de chaque occupant, il est lié à la durée de réverbération préconisée pour cet espace. Si on considère par exemple une grande salle de concert de 2230 places et chaque spectateur occupant une surface de  $0.85\text{m}^2$ . Le temps de réverbération optimale étant égal à 2,1 secondes. On pourra définir le volume acoustique minimal par personne à partir de la formule de Sabine.  $Tr = 0.16 \frac{V}{A}$  (Tr étant le temps de réverbération, V, le volume par occupant, A, la surface occupée par une personne)

Cette formule peut s'écrire  $V = \frac{A \cdot Tr}{0.16}$  donc  $V = \frac{0.85 \times 2.1}{0.16} = 11,15 \text{ m}^3$ .

En vue d'un confort acoustique et en respectant ce temps de réverbération, il faut prévoir pour la salle de concert, un volume acoustique égal à  $11,15\text{m}^3$  par spectateur. Le volume acoustique total de cette salle de concert sera alors de  $24864.5\text{m}^3$ .

Concernant les mosquées, la surface équivalente d'un fidèle est égale à  $0.5 \text{ m}^2$ . On pourra calculer ainsi pour chaque mosquée suivant sa durée de réverbération préconisée et le nombre des fidèles devant occuper la mosquée, le volume acoustique minimal à respecter.

## C. Les proportions géométriques de l'espace.

Les rapports proportionnels des trois dimensions d'un espace, ont une influence sur la qualité acoustique de cet espace. Le phénomène de résonances liées à la forme apparaît généralement aux basses fréquences. Ceci tient au fait que chaque volume vibre selon des modes propres. Ainsi dans le but de réguler les modes propres à chaque volume, il est primordial d'adopter les rapports dimensionnels les plus favorables<sup>29</sup>. Il est par conséquent important de bien choisir les rapports entre hauteur/longueur/largeur. Donc pour une hauteur H choisit, on affecte un coefficient à la largeur x et la longueur y comme spécifié dans le tableau.

### 4.2.2. Les matériaux de finitions.

La qualité acoustique des espaces est liée aux caractéristiques des matériaux qu'il faut choisir avec soin, du fait que Certains matériaux sont plus absorbants que d'autre, et réagissent différemment aux différentes fréquences. Les matériaux mis en œuvre dans le traitement acoustique des espaces, sont classés en trois catégories. (Planche 4.2)

---

<sup>29</sup> Voir tableau de la planche 4.27 sous-chapitre 4.6.2.



### **A. Les matériaux poreux et fibreux.**

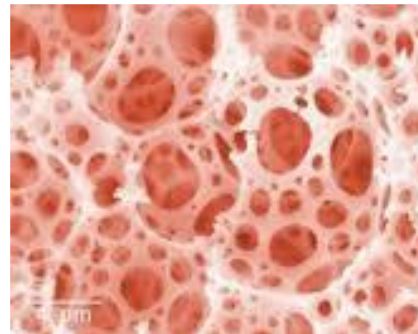
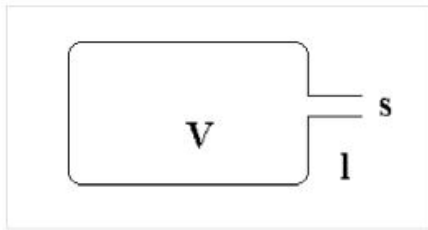
Ce sont des matériaux à porosité ouverte les ondes sonores perdent de l'énergie par frottement dans les interstices du matériau, et l'énergie acoustique est transformée en chaleur. L'absorption de ce type de matériaux est beaucoup plus importante aux fréquences élevées (2000 à 4000 Hz). Il suffit d'augmenter l'épaisseur du matériau, pour augmenter l'absorption aux fréquences basses. Ces matériaux représentent les différents types de mousses et de laines, les tapis, moquettes et tentures.

### **B. Les matériaux qui absorbent par effet de résonateur.**

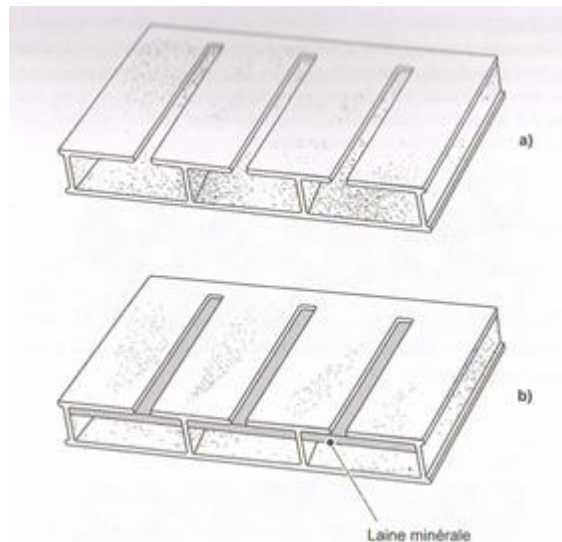
On retrouve dans cette catégorie les résonateurs et les matériaux perforé du commerce, dont l'absorption se situe aux fréquences mediums (500 à 2000 Hz). Un résonateur est un récipient communiquant avec l'extérieur par un tube étroit. Ces dispositifs acoustiques sont employés depuis fort longtemps, sous forme de jarre en terre cuite ou en verre, dans les théâtres romains, les églises et certaines mosquées. Actuellement les résonateurs sont conçus sous forme de plaques perforées en plâtre, en bois ou en aluminium, ainsi que les éléments en bois ou en béton comportant des fentes et sont appelés résonateurs groupés. Quand ils sont associés à des matériaux fibreux, leur absorption est moins efficace à la fréquence de résonance, mais elle est plus étalée. (Planche 4.2)

## Différents schémas de résonateurs

Schéma du résonateur de Helmholtz



Matelas fibreux à structure poreuse. (<http://www.isolation-phonique.com>)



Matériau absorbant constitué d'éléments en bois ou en blocs de béton comportant des fentes (Hamayon, L., 2014)

Planche 4.2 : les matériaux utilisés pour le traitement acoustique des espaces

### **C. Les matériaux qui absorbent par effet de membrane.**

Ces matériaux appelés « diaphragme » ou « panneaux fléchissant » agissent par transformation de l'énergie sonore en énergie mécanique. Ils se composent de panneaux montés sur un cadre placés à quelques centimètres d'un mur avec une lame d'air. L'absorption la plus importante des membranes se situe aux fréquences basses (125 à 500 Hz). Il est possible d'augmenter la plage d'absorption de la membrane, si on ajoute un matériau fibreux ou poreux dans la lame d'air.

#### **4.2.3. Le critère du bruit de fond.**

Le bruit de fond dans un espace est généré par les bruits aériens, les bruits d'impact, ainsi que les bruits d'équipements. La valeur du bruit de fond est prise en compte dans le calcul de certains paramètres acoustiques comme les indices d'intelligibilité « STI, RASTI » un niveau important du bruit de fond peut nuire à l'intelligibilité d'un message parlé. Des valeurs maximales du bruit de fond sont préconisées pour différents types d'édifices. Pour les édifices tels que les auditoriums et les lieux de culte, cette valeur varie entre 30 dB et 40 dB.

### **4.3 Processus de correction acoustique des mosquées étudiées.**

La caractérisation de la qualité acoustique (par la mesure et la simulation) des mosquées investiguées a fourni un nombre considérable d'indications pour amorcer le processus de correction, et élaborer par la suite les propositions techniques et architecturales. En nous basant sur les cinq points qu'on a relaté dans la conclusion du chapitre précédent, on développera dans ce chapitre les stratégies de correction relative aux points cités.

#### **4.3.1. Optimiser le temps de réverbération.**

Dans le but de réduire la durée de réverbération, il convient d'agir sur deux paramètres architecturaux, le volume et les matériaux qui recouvrent les différentes parois de l'espace.

##### **A. Le volume.**

On devra vérifier que le volume des deux mosquées, s'accommode avec les proportions géométriques afin d'éviter les phénomènes de résonance liés à la forme et favoriser une bonne acoustique.

##### **B. Le volume acoustique.**

Vérifier que le volume acoustique par occupant est conforme aux valeurs préconisées pour ce type d'usage.

##### **C. La nature et la disposition des matériaux**

L'état de la surface et de la composition des parois (murs, plafond, planché) détermine en grande partie ses caractéristiques acoustiques, et en particulier la durée de réverbération. Notre objectif est de diminuer la durée de réverbération en installant des matériaux absorbants. Cette opération doit néanmoins être élaborée, en fonction des trois plages de fréquences.

- La plage des fréquences moyennes (entre 500 et 2000 Hz) est la plus importante pour le discours, les matériaux absorbant ces fréquences sont les résonateurs. Ces dispositifs doivent être installés aux endroits où l'on a obtenu les valeurs les plus importantes du  $T_r$ , c'est à dire au niveau de la coupole et à l'arrière de la salle.
- Les valeurs du  $T_r$  aux fréquences basses, affecte moins l'intelligibilité de la parole, puisque la voix à ces fréquences ne contient que peu d'énergie sonore. Il est néanmoins souhaitable que la durée de reverbération à ces fréquences ne soit pas trop longue. Les membranes offrent une grande absorption pour ces fréquences

- Les temps de réverbération aux fréquences hautes sont généralement plus courts qu'aux fréquences moyennes, puisque l'absorption par l'air de ces fréquences est plus grande, la diminution de la durée de réverbération est réalisée naturellement.

La disposition des matériaux absorbants et diffusants, se fera au niveau de la coupole et des différentes parois verticales. On optera aussi pour un réaménagement du sol des mosquées (plancher et moquette) puisqu'ils constituent une surface importante pratique et peu onéreuse à réaménager.

#### **4.3.2. Assurer une bonne diffusion du son dans la salle.**

Les résultats de la clarté et de l'intelligibilité des deux mosquées, nous ont renseignés sur l'état du champ sonore direct par rapport au champ diffus des réflexions précoce et tardives. Donc pour favoriser l'énergie du son direct et des premières réflexions, les spécialistes (Hamayon ,L ., 2013), préconisent de placer des matériaux diffusants dans l'espace proche de la source ; pour le cas des mosquées sur le mur de la qibla. La diffusion favorise une repartitions plus ou moins homogène des ondes sonores. Les diffuseurs doivent comporter des moulures de forme et de dimensions diverses afin d'offrir une diffusion sur l'ensemble des plages de fréquences, basses, mediums et hautes, car plus les tailles des irrégularités que présente la paroi sont variées, plus le nombre de fréquences diffusées est élevé.

La longueur d'onde dans la plage des fréquences audibles (20 à 20000 Hz) peut varier entre 17 m et 17 mm (Hamayon ,L ., 2013), à partir des fréquences basses « 17m » vers les fréquences mediums « 17cm », en allant vers les fréquences hautes « 17 mm ». On procédera donc à la composition d'une surface diffusante avec des moulures en plâtre ou en bois, en respectant les dimensions des longueurs d'ondes des fréquences mediums (propre à la parole) et les fréquences hautes, les fréquences basses étant naturellement absorbées par l'air.

#### **4.3.3. Maitriser les échos et les focalisations du son**

L'analyse des durées de réverbérations des deux mosquées, a fait apparaitre les points critiques dans l'espace, avec une réduction de l'énergie des premières réflexions en favorisant le champ réverbéré. Ces endroits sont situés au niveau des coupoles, avec l'effet de focalisation du son. On remarque également un temps de réverbération élevé à l'arrière des mosquées, dont on peut déduire la présence d'échos. Ainsi pour réduire l'énergie du champ réverbéré et favoriser l'énergie des premières réflexions, on procédera à un traitement de la coupole et du mur arrière par des matériaux absorbants.

Le matériau choisit, est composé d'un panneau perforé (type résonateur) et d'un matelas fibreux, avec une lame d'air. Ce matériau a été expérimenté dans la grande mosquée d'Aman (Orfali, W. ,2000). Son choix repose sur plusieurs critères : il offre une grande capacité d'absorption aux fréquences medium et aigues, il présente un poids léger et peut-être incurvé pour s'adapter à la forme des coupoles. Il est constitué d'un panneau en plaque de bois avec 20% de perforation, fixé à la coupole sur un matelas de laine minérale de 50mm d'épaisseur, avec 50 mm de lame d'air. Sur les parois verticales, on pourra remplacer la plaque en bois perforé par une plaque en bois décorée qu'on placera à 2 m, au-dessus de la partie revêtue par le marbre ou les carreaux de faïences. (Planche 4.3)

Enfin il est également conseillé pour les mosquées, afin de réduire la durée de réverbération, de procéder à un choix judicieux du tapis ou moquette qui va recouvrir le sol. Le traitement du sol par des matériaux absorbants garantit de meilleurs résultats avec moins de dépenses et d'efforts. Le tapis sélectionné se compose d'une moquette avec une sous face en caoutchouc. (Planche 4.3)

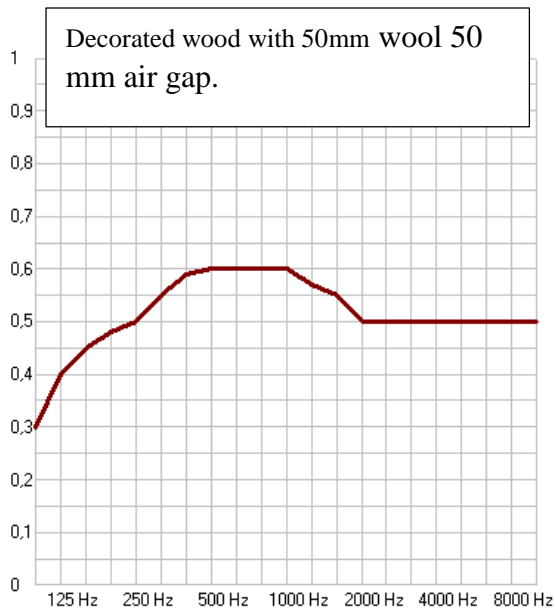
#### 4.3.4. Assurer une protection contre les bruits extérieurs.

Afin d'assurer une protection contre les bruits extérieurs, la construction des mosquées doit se conformer aux normes en vigueur relative à l'isolation acoustique des édifices. Ainsi pour ne pas perturber l'acoustique interne des espaces, des valeurs maximales sont préconisées sous forme d'indice NR (Noise Rating) correspondant à une valeur en décibel. Un bruit exprimé en décibel est supérieur d'environ 5 à 8 à l'indice NR correspondant. On donne dans le tableau ci-dessous les valeurs préconisées pour certains espaces.

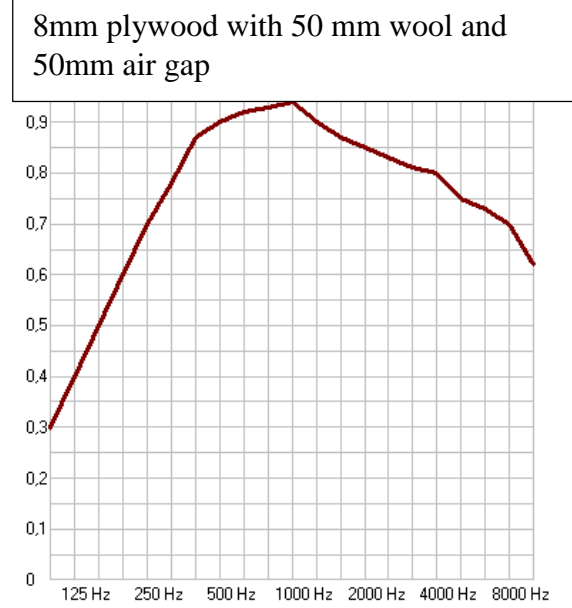
Tableau 3 : les valeurs du bruit de fond préconisées pour certains espaces.

Type de local	Indice NR	Valeurs maximales préconisées en dB(A)
Salle de réunion non sonorisée	25-30	30-40
Salle de théâtre	20-25	25
auditorium	25	30
Eglise, chapelle	30-35	35-40

(Hamayon,L., 2013.).



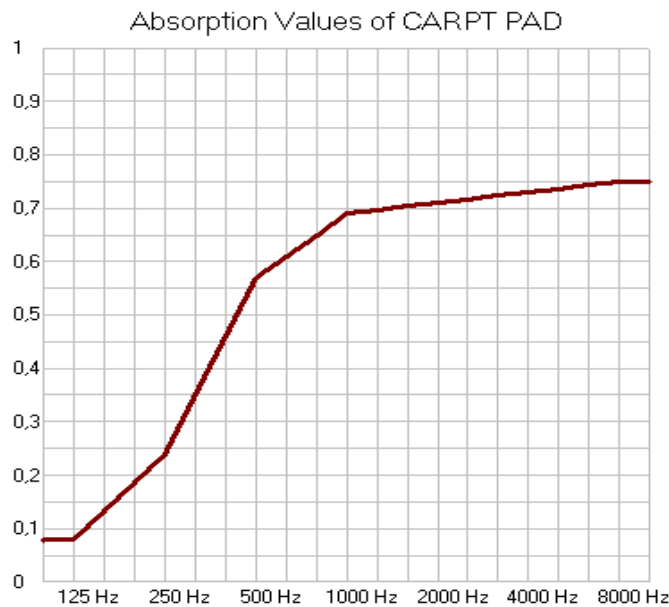
(c) EASE 4.4 / EASE Hall / 16/05/2016 13:54:59 / Universite Constantine 3 Fa



(c) EASE 4.4 / EASE Hall / 19/05/2016 10:54:52 / Universite Constantine 3 Fa

Graph représentant les valeurs des coefficients d'absorption du panneau en bois décoré avec 50 mm de laine minérale et 50 mm de lame d'air.

Graph représentant les valeurs des coefficients d'absorption du panneau en MDF perforé avec 50 mm de laine minérale et 50 mm de lame d'air.



(c) EASE 4.4 / EASE Hall / 18/05/2016 16:55:19 / Universite Constantine 3 Fa

Figure représentant les valeurs des coefficients d'absorption de la moquette additionnée d'une sous face en latex. Dans les fréquences medium et hautes les valeurs des coefficients d'absorption sont importantes, entre 0.4 et 0.7.

Planche 4. 3 : valeurs des coefficients d'absorption alpha Sabine des matériaux utilisés pour la correction des mosquées



## **4.4 Démarche de la correction acoustique par simulation et propositions architecturales.**

### **Introduction.**

Afin d'optimiser et réduire la durée de réverbération, (et de fait les autres paramètres acoustiques) pour la rapprocher des valeurs recommandées, qui est de 0,9 s, on a procédé à des réaménagements pour les deux mosquées, conformément à la stratégie définie au sous chapitre précédent. On sait que la durée de réverbération dépend du volume de l'espace et de l'absorption des parois, on devra donc agir sur ces deux paramètres pour obtenir les résultats escomptés. Le volume étant une donnée que l'on ne peut modifier (la mosquée étant construite) on procèdera à des réaménagements liés aux qualités d'absorption des matériaux.

Notre démarche de correction se déroulera en plusieurs phases de simulations ; les résultats de chaque critère simulé seront analysés, afin de déceler les zones de l'espace qui présentent encore des problèmes acoustiques. Au terme de cette première étape de diagnostic, on présentera de nouvelles propositions correctives, qu'on pourra analyser après la simulation

Ainsi l'étude corrective des deux mosquées se fera en deux phases. La première phase de correction concerne les parties de l'espace les plus problématiques et les plus aptes à apporter des améliorations significatives, en l'occurrence la coupole pour réduire l'effet de focalisation et le mur de la qibla pour améliorer l'énergie du champ direct et des premières réflexions ; et enfin le tapis réduire le champ réverbéré sur l'ensemble de l'espace. Au terme de cette première phase de correction, on pourra entamer une deuxième phase de correction si les résultats des critères acoustiques simulés ne sont pas satisfaisants.

#### **4.4.1. Première phase de correction de la Mosquée Ennour.**

La première phase de correction de la mosquée Ennour, concerne les composants architecturaux suivants : la coupole, le mur de la qibla et le tapis qui recouvre le sol. On a donc procédé à recouvrir l'ensemble de la coupole par un matériau absorbant couramment utilisé pour les corrections acoustiques, constitué de panneau en MDF perforé monté sur un matelas de laine minérale. Le mur de la qibla sera recouvert en partie haute, d'un matériau plus esthétique constitué de panneaux en bois décoré avec matelas de laine minérale. On a également remplacé le tapis qui recouvre le sol de la mosquée par une moquette épaisse avec une sous face en latex. Ce type de moquette, possède une absorption importante dans la plage des fréquences hautes et des médiums. La lecture des graphes représentant les coefficients d'absorption des trois

matériaux, illustre bien leurs capacités élevées d'absorption dans la plage des fréquences mediums propre à la parole. (Planche 4.3)

### A. Résultat de critère le Tr 60

Le temps de réverbération Tr 60 de Sabine, est le premier critère qui nous renseigne sur la qualité acoustique de l'espace après la correction. Le graphe avec tableau des valeurs du Tr sur l'ensemble des fréquences de la (planche 4.4), indique une amélioration importante du Tr aux fréquences mediums. Le Tr nominal avant correction étant égal à 1.65 s, après correction le Tr nominal est de 0,98s, donc tout à fait égal au Tr recommandé. (Planche 4.5)

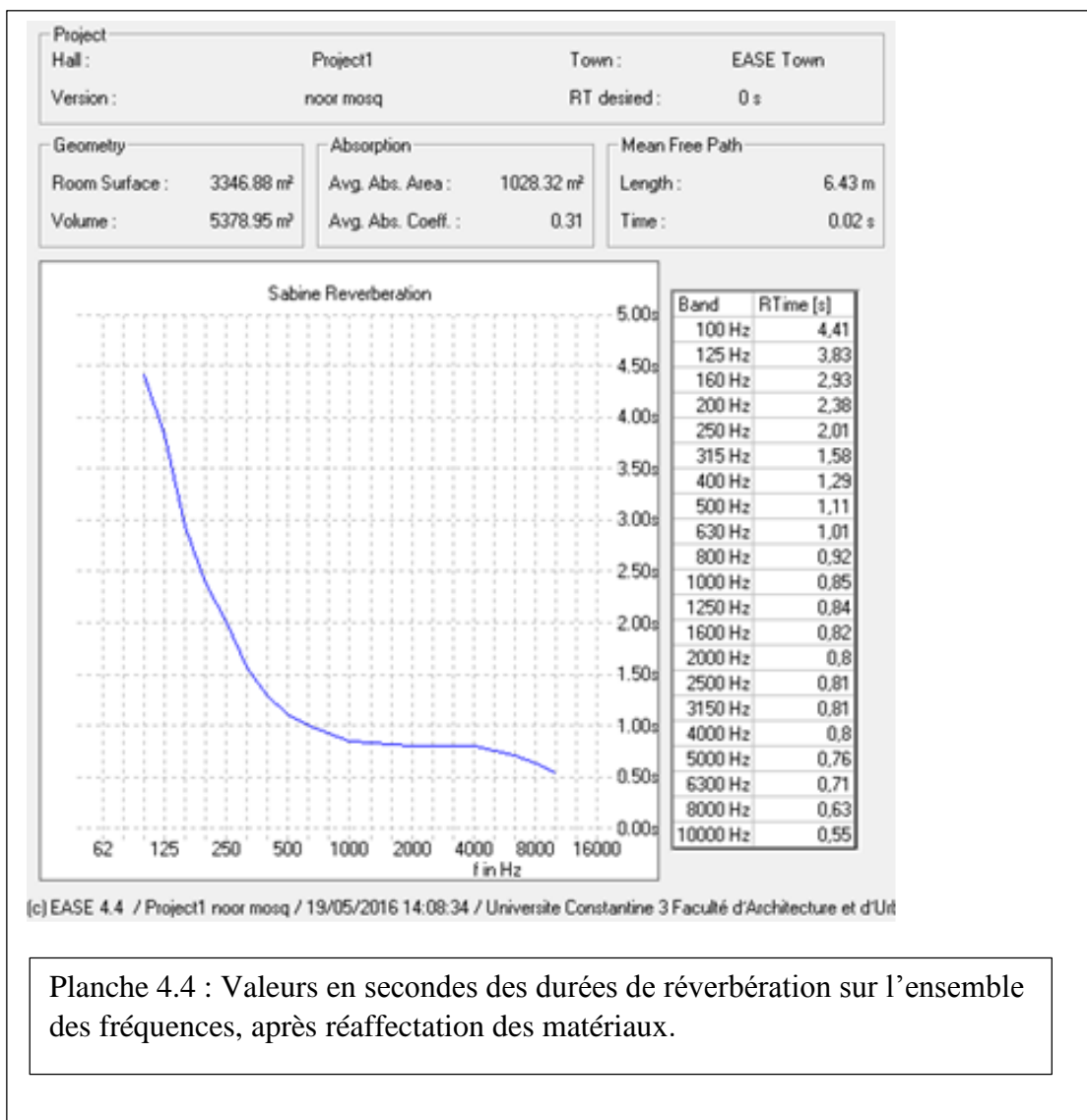
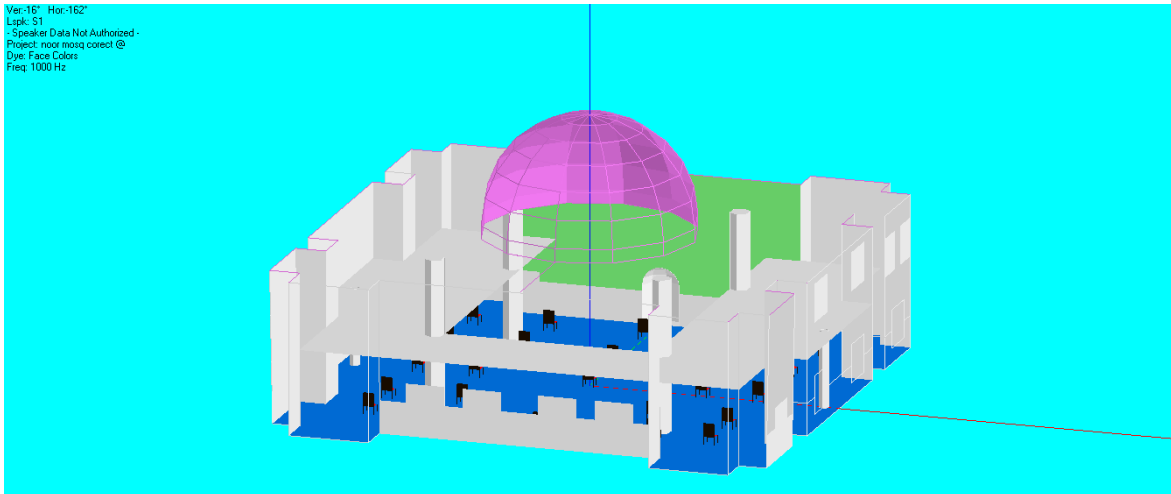
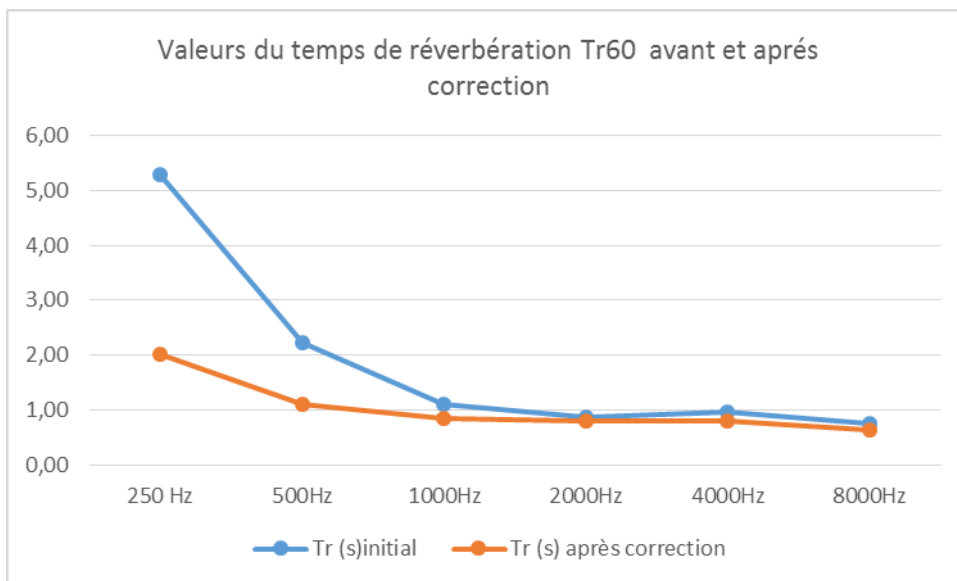


Planche 4.4 : Valeurs en secondes des durées de réverbération sur l'ensemble des fréquences, après réaffectation des matériaux.



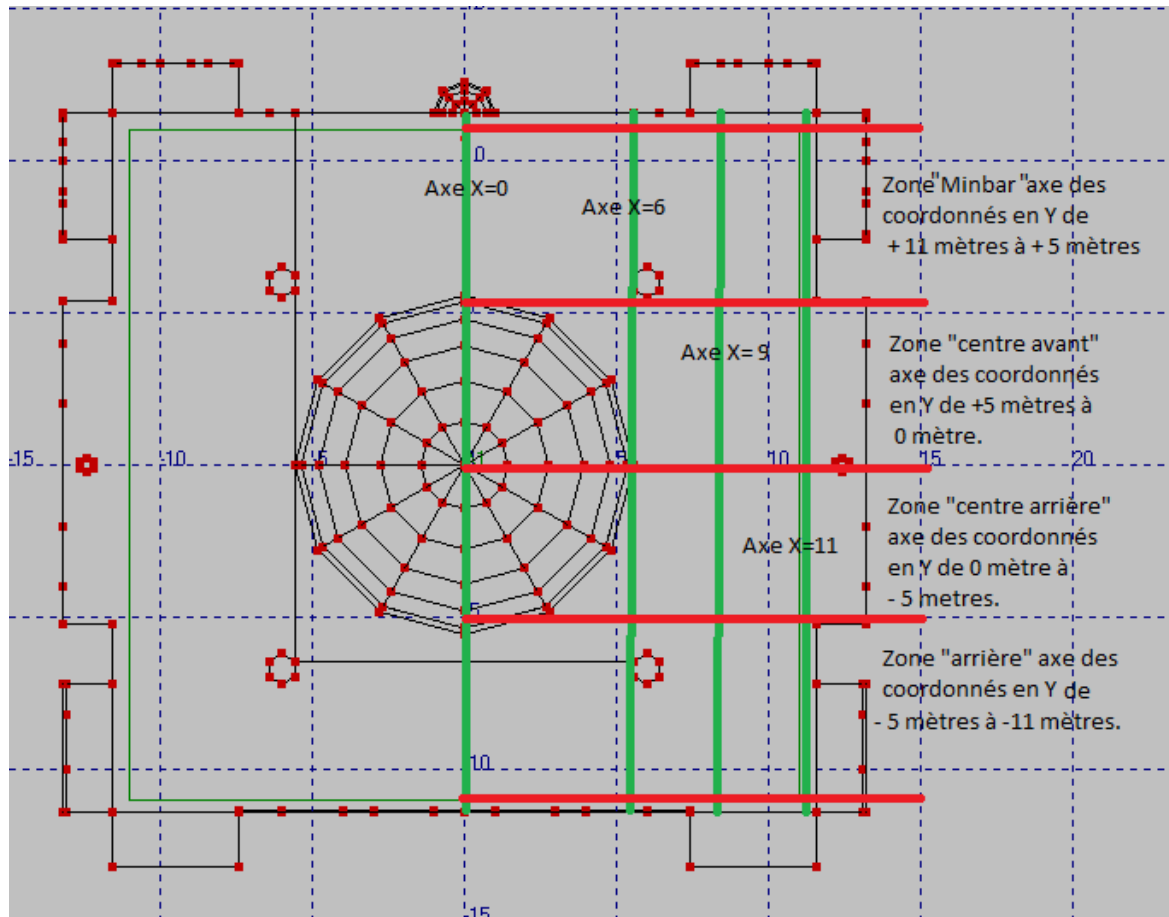
(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 19/05/2016 13:55:47 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Vue axonométrique de la mosquée avec représentation en couleurs de la coupole, le mur de la qibla et le sol en moquette. Ces trois parties de l'espace ont été réaménagés par des matériaux plus absorbants.



Valeurs du temps de réverbération  $Tr_{60}$  selon Sabine par bandes d'octave de 250 à 8000 Hz, initial et après l'affectation des matériaux absorbants.

Planche 4.5 : illustration des parties de l'espace réaménagées et les valeurs de la durée de réverbération avant et après correction, de la mosquée Ennour.



Vue en plan de la mosquée Ennour avec illustration des quatre axes positionnés respectivement en l'abscisse 0m, 6m, 9m et 11m.

Le calcul du  $Tr_{30}$  et de l'EDT, a été simulé sur ces quatre axes sur 23 positions repartis sur l'axe des coordonnées (de +11m à -11m) sur quatre zones : la zone Minbar, la zone centre avant, la zone centre arrière et la zone arrière.

Planche 4.6 : illustration sur le plan de la mosquée, la disposition des axes de réceptions pour le calcul du  $Tr_{30}$  et de l'EDT.

## **B. Le Tr 30 et l'EDT.**

Les valeurs du Tr 30 et de l'EDT après correction, vont nous donner des indications sur la qualité de l'écoute dans les différents emplacements des récepteurs repartis dans l'espace. Dans le but de recueillir le maximum d'information sur l'impact de nos choix de dispositions des matériaux absorbants dans l'espace, on a opté vers une répartition des récepteurs en fonction des variations du volume. On a ainsi entrepris une division de l'espace selon les deux axes X et Y. Ces divisions sont illustrées sur la vue en plan de la planche 4.6. Sur l'axe horizontal des X, on a respectivement quatre positions, du centre vers le côté droit, avec X égal à 0 m, 6m, 9m et 11m. Sur l'axe vertical des Y on a recueillis les valeurs des deux critères sur 23 positions, du mur du Minbar à l'avant jusqu'au mur à l'arrière. (Planche 4.6)

Ainsi sur chaque axe des X on a pu obtenir 23 valeurs, ce qui nous donne en tout 92 valeurs résultantes pour chaque critère à la fréquence médiane 1000 Hz. Afin de faciliter la lecture et l'interprétation des résultats, on les a regroupés en quatre zones affecté de leurs valeurs moyennes respectives, qu'on a nommées, Minbar, centre avant, centre arrière et arrière. Le tableau ci-dessous, spécifie les caractéristiques architecturales et volumétriques de chaque zone. (Planche 4.7)

	X= 0 m	X= 6 m	X= 9 m	X = 11m
Minbar	Zone proche du mur de la qibla, hauteur de 8 m.	Zone proche du mur de la qibla, la hauteur varie entre 4 m et 8 m.	Zone proche du mur de la qibla et du mur latéral droit, hauteur de 4 m.	Zone proche du mur de la qibla et contigüe au mur latéral droit, hauteur de 4 m.
Centre avant	Zone loin des murs, hauteur sous coupole de 15 m.	Zone loin des murs, hauteur varie entre 15 m et 4 m.	Zone loin des murs, hauteur de 4 m	Zone contigüe au mur latéral droit, hauteur 4 m.
Centre arrière	Zone loin des murs, hauteur sous coupole de 15 m.	Zone loin des murs, hauteur varie entre 15 m et 4 m.	Zone loin des murs, hauteur de 4 m	Zone contigüe au mur latéral droit, hauteur 4 m.
arrière	Zone proche du mur arrière la hauteur varie entre 15 m et 4 m.	Zone proche du mur arrière hauteur sous plafond 4 m.	Zone proche du mur arrière hauteur sous plafond 4 m.	Zone proche du mur arrière et contigüe au mur latéral, hauteur sous plafond 4 m.

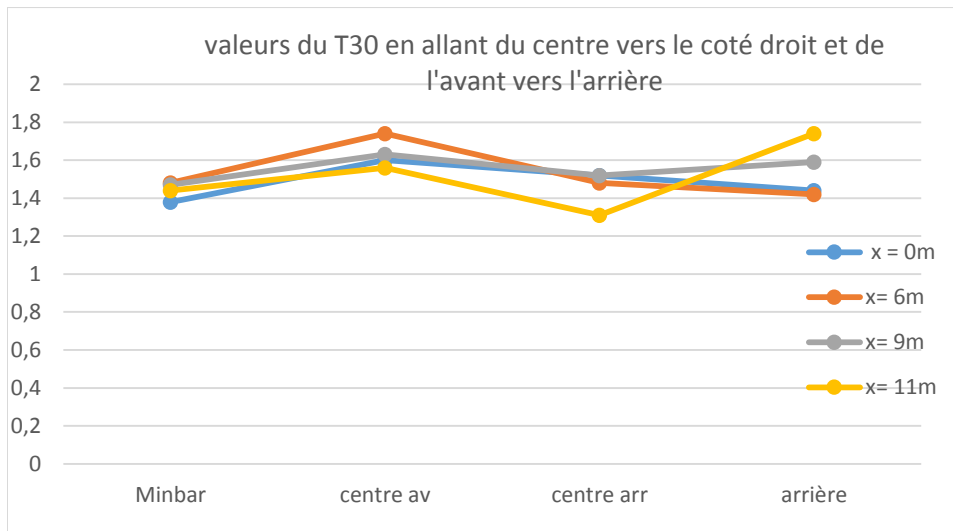
Planche 4.7 : Tableau désignant les caractéristiques architecturales et volumétriques des différentes zones de l'espace de la mosquée Ennour.

Le graphe illustrant les valeurs du Tr 30 et de l'EDT (pour la fréquence médiane propre à la parole 1000 Hz) de la (planche 4.8) nous fournit plusieurs indications sur l'état des premières réflexions suite à la correction effectuée. En comparant les valeurs du Tr 30 et de l'EDT sur les graphes, on peut conclure ce qui suit :

On remarque une variation similaire pour les quatre positions sur l'axe des X de 0m à 11m, c'est-à-dire en allant du centre vers le mur latéral droit, les valeurs augmentent dans les deux zones au centre sous la coupole et à l'arrière, et diminuent à l'avant près du minbar et au centre arrière à la limite de la mezzanine.

Les variations des valeurs du Tr30 entre les positions de l'axe des X entre 0m à 11m sont minimales, par contre leurs variations sur l'axe allant du Minbar à l'arrière sont très significatives.

Les valeurs les plus importantes du Tr30 se situent dans les zones suivantes : sur l'axe X= 6m au centre avant, et sur l'axe X= 11m à l'arrière, avec un Tr30 de 1,8 s. pour la première zone elle subit l'influence négative d'être située à la lisière de deux hauteurs différentes, 15 m (sous la coupole) et 4m (sous la mezzanine). Pour la deuxième zone, elle se situe entre deux murs perpendiculaires, le mur arrière et le mur latéral.



Variation des valeurs du Tr 30 le long de l'axe horizontal en (X) et vertical en (Y). Le Tr30 le plus important concerne les positions de l'axe x= 6m au « centre avant », et la position de l'axe x= 11m à « l'arrière ».

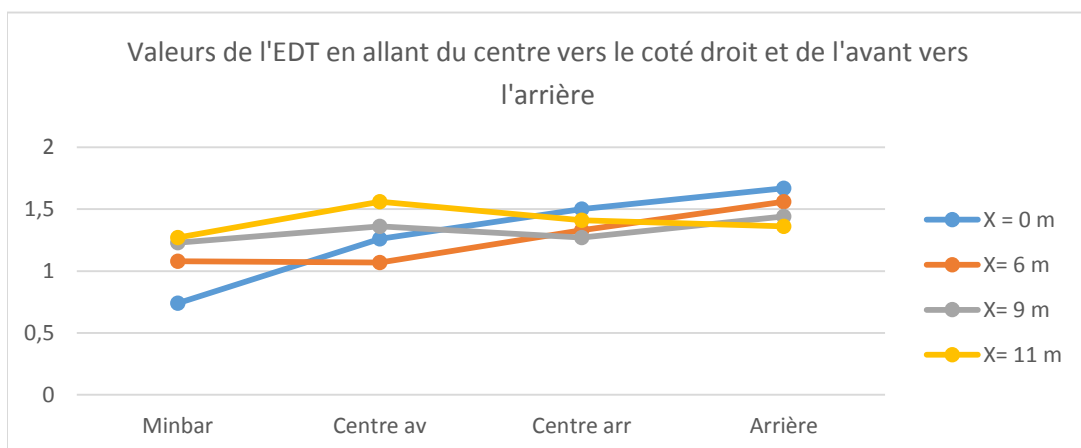
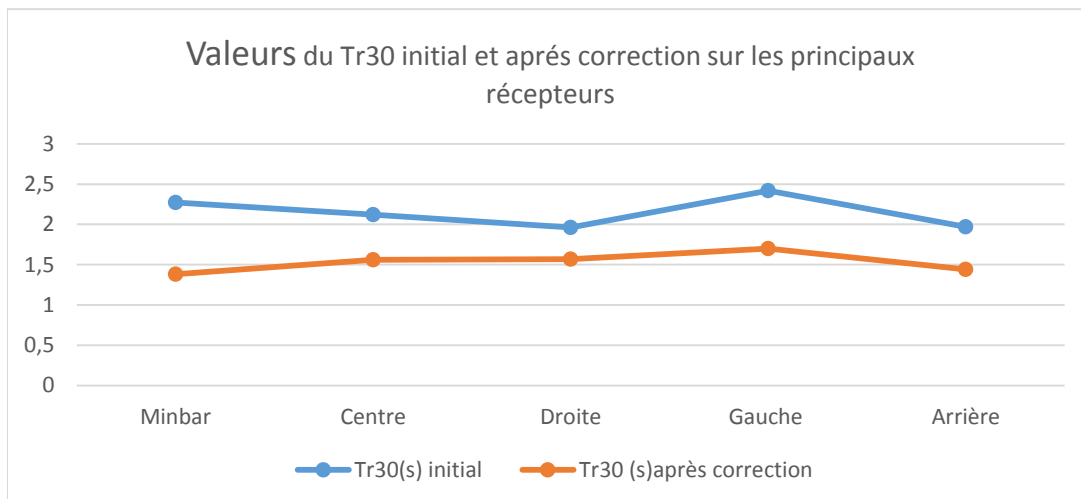


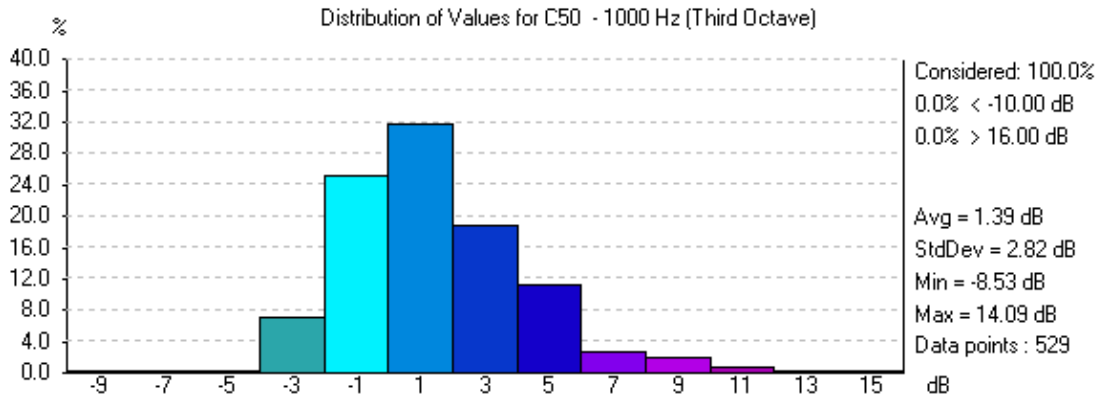
Planche 4.8 : les Valeurs du Tr30 et de l'EDT après correction. Comparaison entre le Tr30 initial et le Tr30 après correction sur les principaux récepteurs



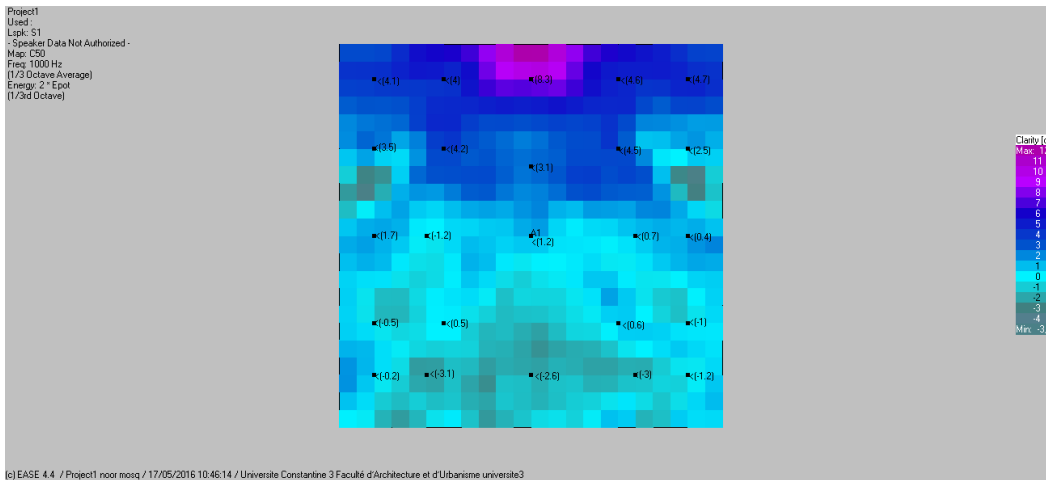
### **C. La clarté C50 et l'intelligibilité STI.**

Les valeurs du C50 et du STI après correction sont illustrées sur les planches 4.9 et 4.10. Le graphe de la (planche 4.9) représentant la comparaison des valeurs du C50 initial et après correction, nous indique une petite amélioration sur les principaux récepteurs, néanmoins 10 dB de différence sépare le récepteur près du Minbar du récepteur à l'arrière, ce qui est considérable. L'amélioration de ce critère apparait dans la distribution du C50 sur l'aire d'audience, on peut relever sur la cartographie une réduction des zones caractérisées par des valeurs négatives, en effet la moyenne de la distribution du C50 est passée de 0.74 dB initial à 1.39 dB après correction.

Les résultats du STI après correction est plus remarquable notamment sur le graphe de la (planche 4.10), illustrant la comparaison des valeurs du STI initial et du STI après correction dont les valeurs pour tous les récepteurs sont supérieures à 0.5, qui est considérée comme valeur d'une intelligibilité moyenne. Cette amélioration est également visible sur la cartographie du STI après correction sur la planche 4.10, où sur l'ensemble de l'aire d'audience les valeurs sont toutes supérieures à 0.5.



(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 17/05/2016 10:39:08 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme univ



(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 17/05/2016 10:46:14 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

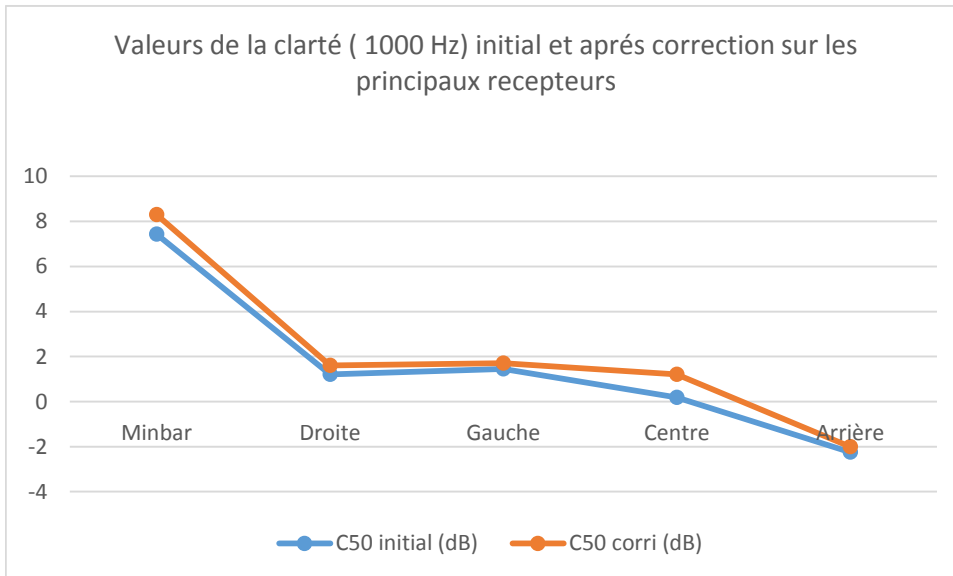


Planche 4.9 : les Valeurs du C50 à 1000 Hz sur l'aire d'audience après correction. Comparaison entre les valeurs du C50 initial et après correction sur les principaux récepteurs.

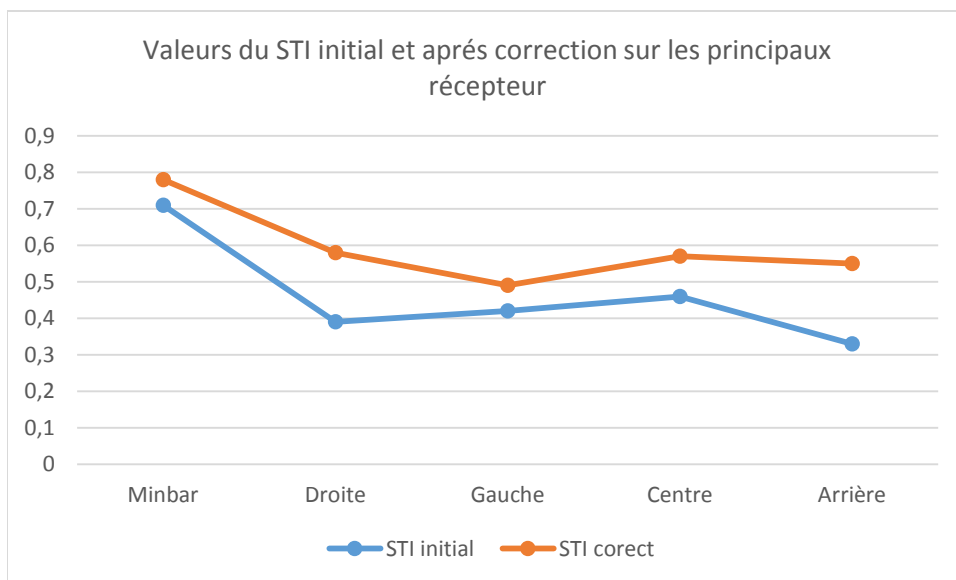
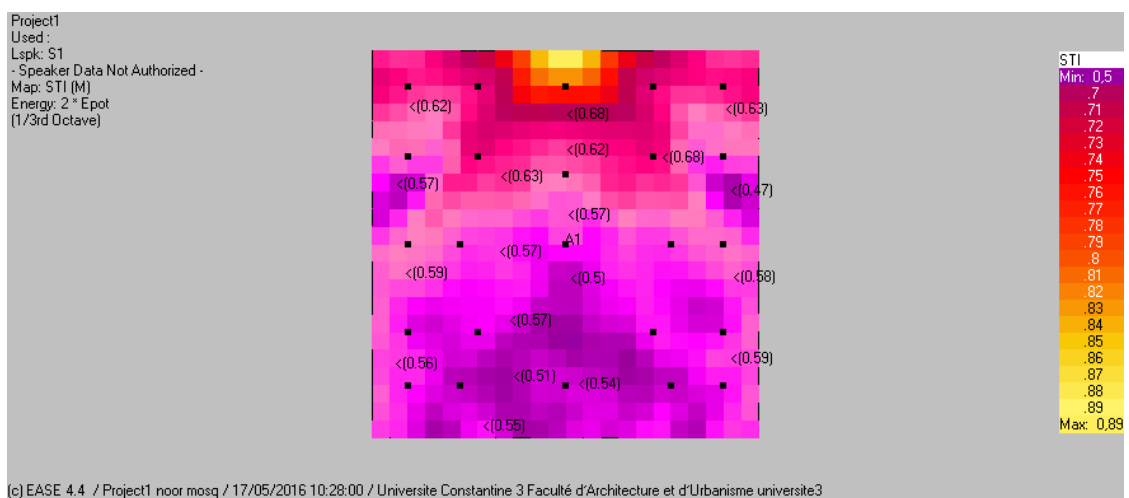
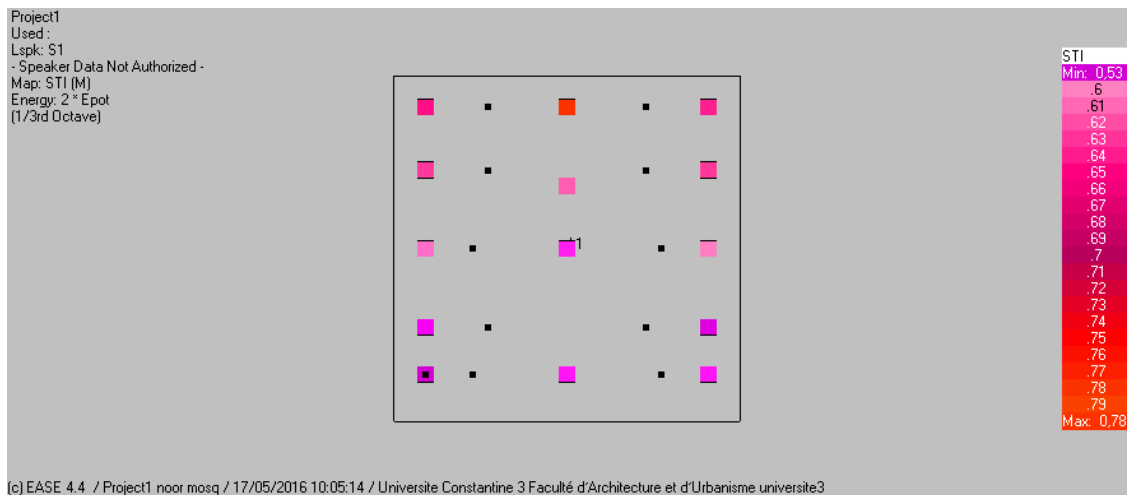


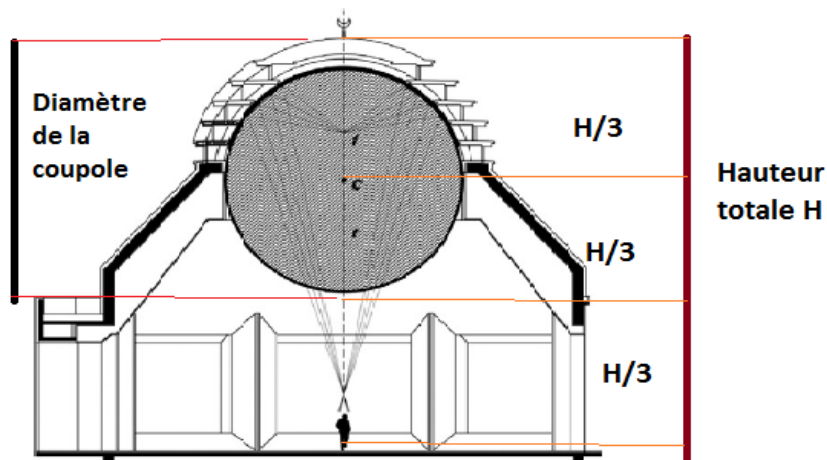
Planche 4.10 : les valeurs du STI sur l'aire d'audience après correction. Comparaison entre les valeurs du STI initial et après correction sur les principaux récepteurs.

#### **4.4.2. Deuxième phase de correction de la Mosquée Ennour.**

Faisant suite à l'ensemble des propositions de réaménagements entrepris durant la première phase de correction, on peut conclure suite aux résultats des critères acoustiques simulés, que les zones qui nécessitent encore un réaménagement architectural se situent au centre sous la coupole, au niveau du mur arrière et des murs latéraux. On a effectué une première correction du mur arrière en le recouvrant par le même matériau absorbant qu'on a utilisé pour le mur de la qibla.

Concernant la coupole, durant la première phase de correction on lui a affecté un matériau absorbant sur toute sa surface. On tentera donc durant cette phase de modifier ses rapports géométriques afin de minimiser l'effet de focalisation qu'elle engendre avec sa disposition et ses rapports géométriques actuels. Les proportions géométriques recommandées sont expliquées dans le dessin schématique de la (planche 4.11). Il est en effet conseillé de positionner le centre de la coupole au-dessus des deux tiers de la distance, séparant le sol du point de crête de la coupole. En suivant ces dispositions géométriques, le point focal se formera au-dessus du centre de la coupole loin de l'espace de réception situé au-dessous. (Zuhre ,S.G,et al., 2013).

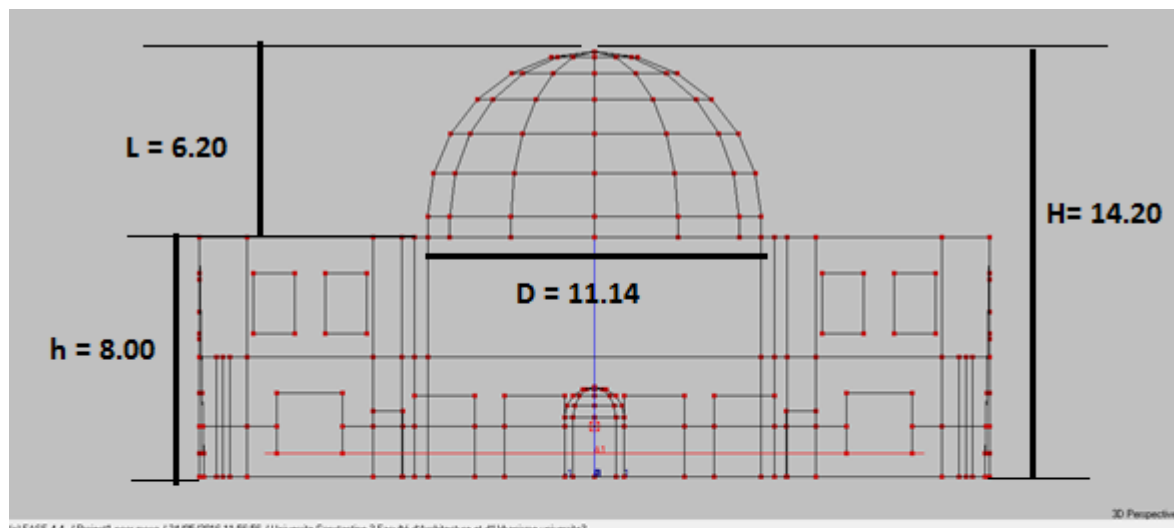
Des modifications seront effectuées sur le modèle de la coupole de la mosquée Ennour, en conservant la hauteur totale, ainsi que la position de la coupole. Sur la (planche 4.12) on a illustré sur la vue de face de la mosquée les schématisations relatives aux nouvelles proportions géométriques de la coupole. Le centre de la coupole C a été surélevé de 2.2 mètres avec un nouveau rayon de 4 m. le rayon initial était égal à 6.2 m. Au terme de cette deuxième correction qui a concerné le mur arrière et la coupole, on a effectué une première simulation des critères acoustiques afin d'examiner l'impact de ces transformations sur la qualité acoustique de la mosquée.



composition des rapports géométriques de la coupole par rapport à la surface de réception se trouvant au dessous.

Dessin en coupe de la coupole tiré de la référence « 78 ».

Nous avons schématisé les différents rapports géométriques selon les recommandations, afin de les appliquer à notre modèle de la mosquée Ennour.



(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 24/05/2016 11:56:56 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme université3

3D Perspective

Ensemble des dimensions de la mosquée Ennour avant les modifications.

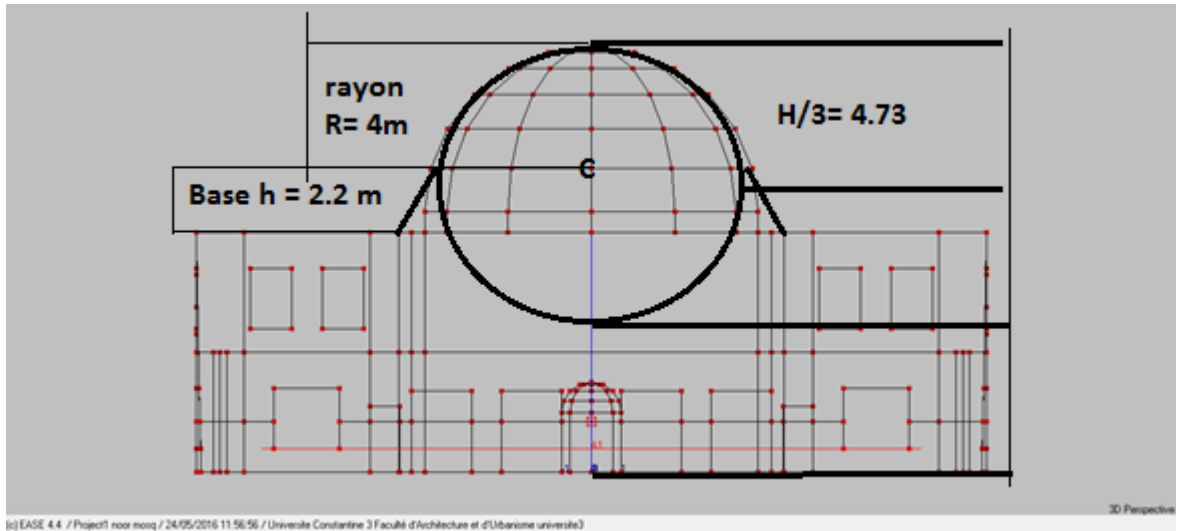
Hauteur totale  $H = 14.20$  m

Hauteur sous plafond  $h = 8.00$  m

Diamètre de la coupole  $D = 11.40$  m

Hauteur de la coupole  $L = 6.20$  m

Planche 4.11 : illustration des recommandations relatives aux proportions géométriques idéales pour la conception de la coupole, et dimensions initiales de la mosquée Ennour.



Vue de face de la mosquée Ennour avant les modifications.

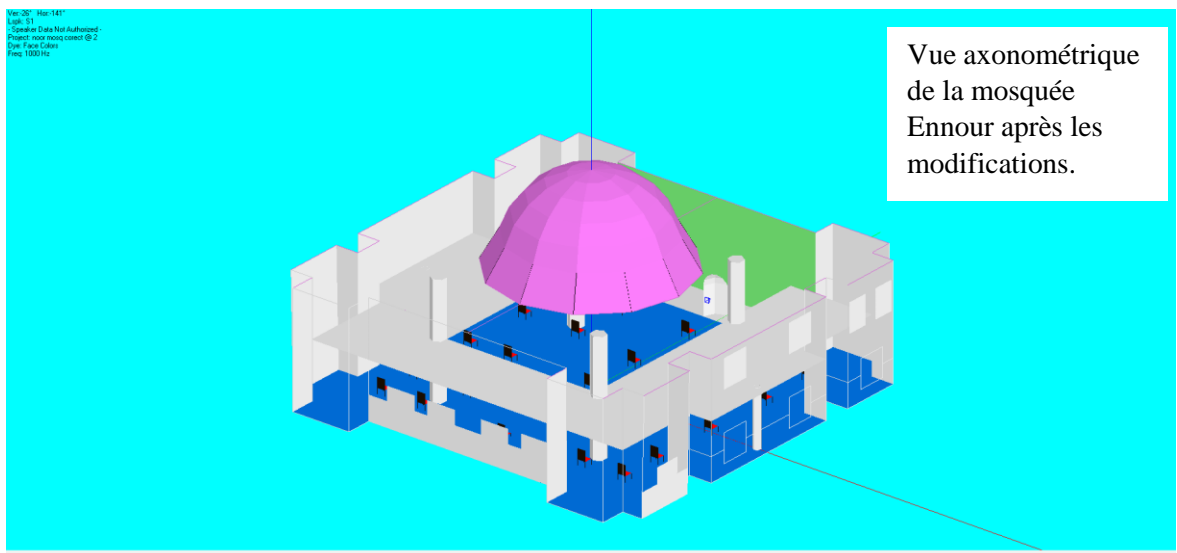
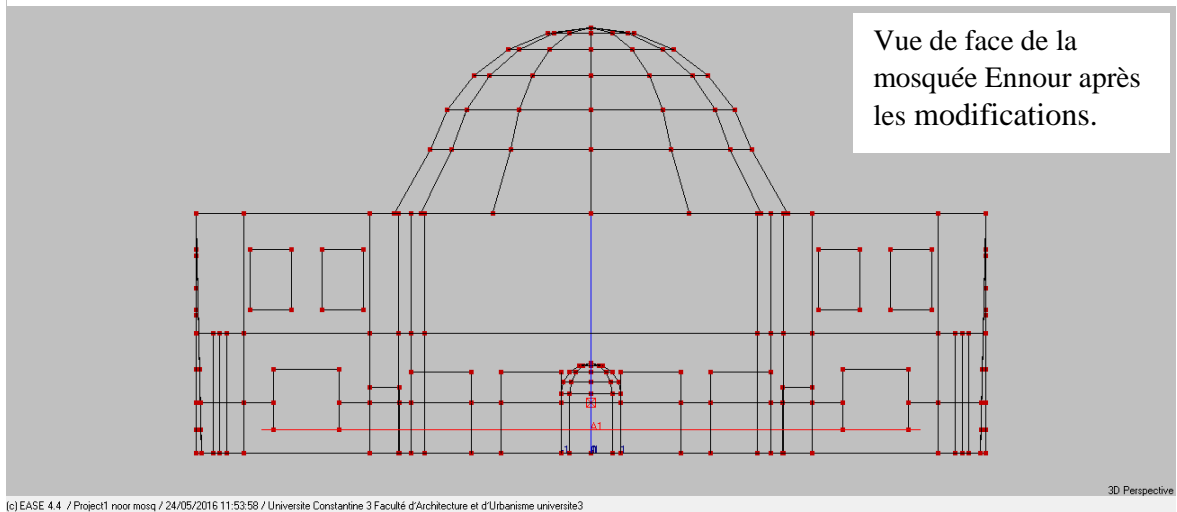
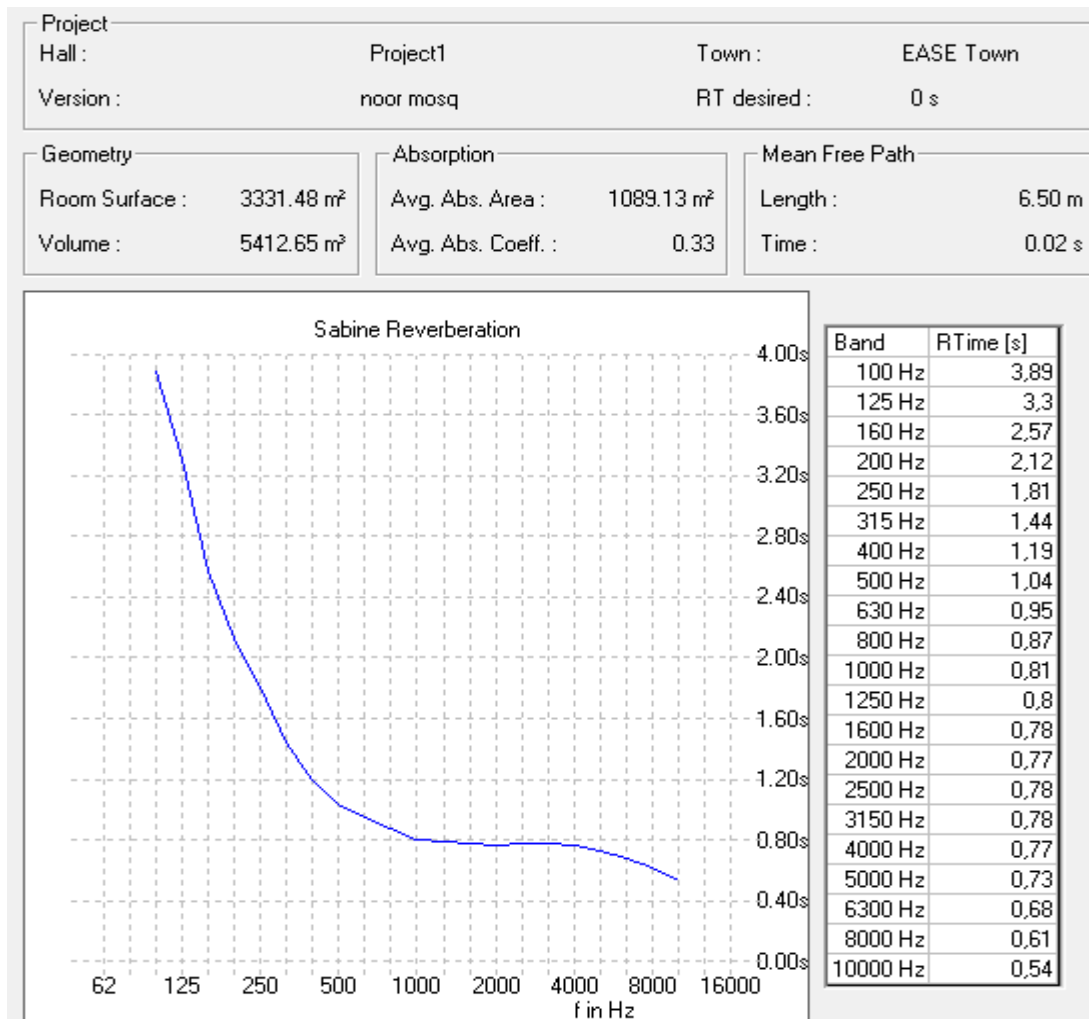


Planche 4.12 : Les vues de face et l'axonométrie, avant et après les modifications de la mosquée Ennour.

#### **4.4.3. Résultats des critères acoustiques suite aux modifications sur la coupole.**

Les résultats de la durée de réverbération  $Tr_{60}$  de la clarté C50 et de l'intelligibilité STI, étaient très satisfaisants. Sur la (planche 4.13) les valeurs du  $Tr_{60}$  nominal est de 0.92 s donc parfaitement compatible à la valeur préconisée de 0.98 s. Sur la (planche 4.14) les valeurs du C50 illustrées sur l'histogramme de la distribution et la cartographie sont supérieures à zéro donc très acceptable. Enfin la (planche 4.15) regroupe les représentations des valeurs du STI, qui n'est pas très significative, puisque durant la première correction le STI est passé sur l'ensemble de l'aire d'audience aux valeurs moyennes.

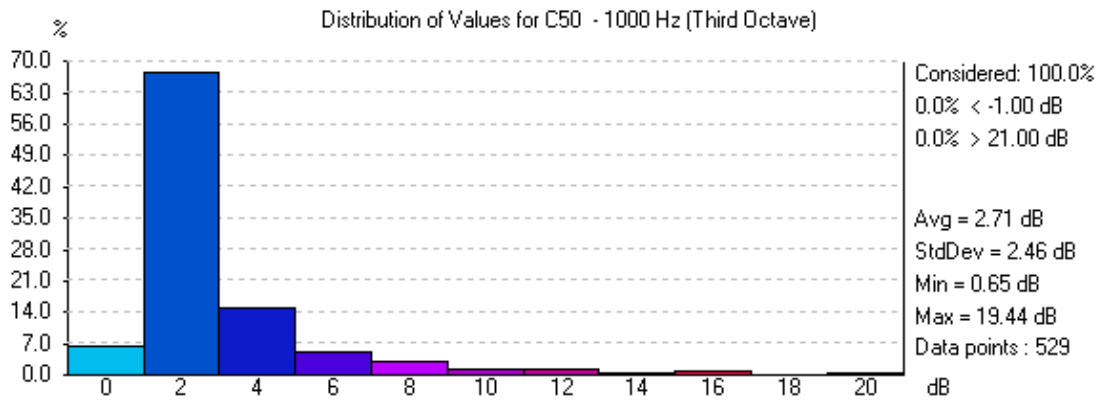
Dans l'ensemble les résultats des différents critères acoustiques sont très satisfaisants, on peut conclure que notre stratégie de correction a donné de bons résultats. On remarque ainsi que la correction a suscité une amélioration significative et cela sans l'apport d'une assistance électroacoustique. Cette investigation corrective, servira de base à l'élaboration des propositions sous forme de guide que l'on développera dans le dernier chapitre.



(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 24/05/2016 14:56:32 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urt

Planche 4.13 : les valeurs de la durée de réverbération suite à la deuxième phase de correction de la mosquée Ennour

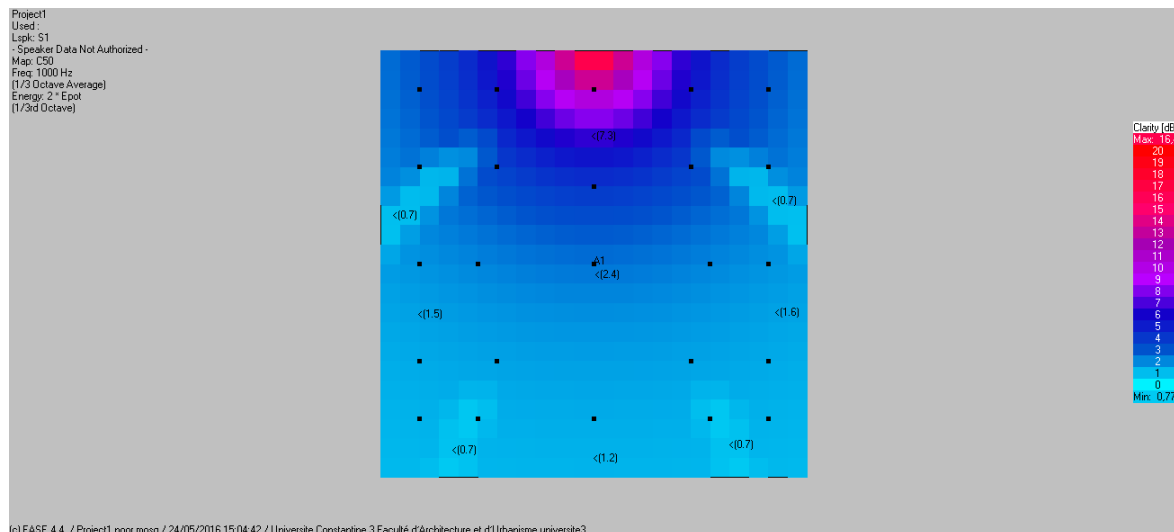




(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 24/05/2016 15:05:22 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme univ

Distribution des valeurs du C50	Première correction	Deuxième correction
Moyenne du C50	1.39 dB	2.71 dB
Valeur minimale du C50	-8.53 dB	0.65 dB
Valeur maximale du C50	14.09 dB	19.44 dB

Tableau comparatif de la distribution sur l'aire d'audience du C50 durant les deux phases de corrections.

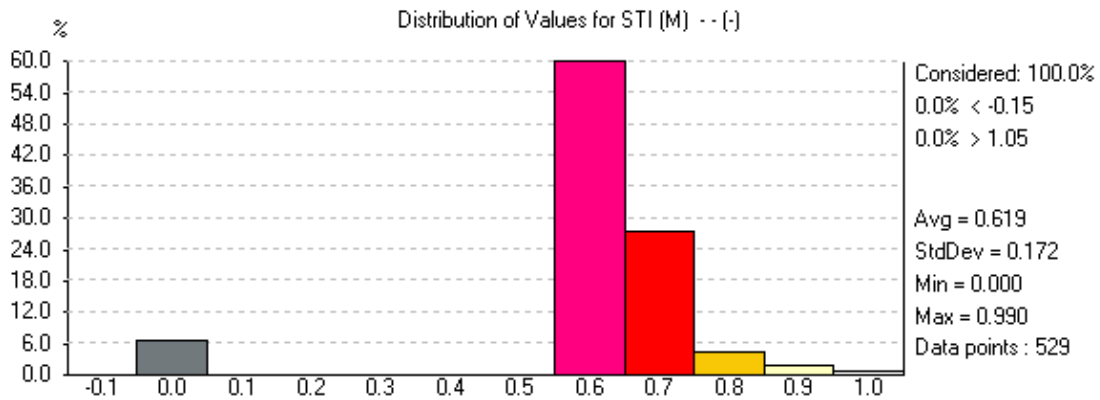


(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 24/05/2016 15:04:42 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Valeurs du C50	Récepteur minbar	Récepteur Centre	Récepteur droite	Récepteur gauche	Récepteur arrière	Derrière les poteaux
Première correction	6.8	1.8	1.3	1.3	-2.6	-3
Deuxième correction	7.3	2.4	1.6	1.6	1.2	0.7

Tableau comparatif des valeurs du C50 sur les récepteurs durant les deux phases de corrections

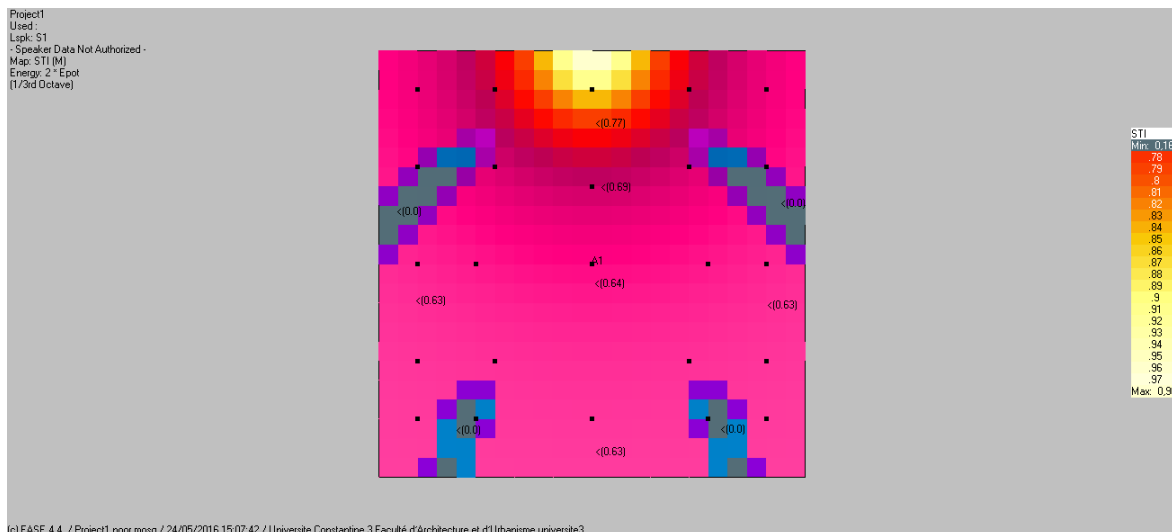
Planche 4.14 : Résultats des valeurs du C50, suite à la deuxième correction de la mosquée Ennour.



(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 24/05/2016 15:06:28 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme univ

Distribution des valeurs du STI	Première correction	Deuxième correction
Moyenne du STI	0.6	0.61
Valeur minimale du STI	0	0
Valeur maximale du STI	0.9	0.99

Tableau comparatif de la distribution sur l'aire d'audience du STI durant les deux phases de corrections.



(c) EASE 4.4 / Project1 noor mosq / 24/05/2016 15:07:42 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Valeurs du STI	Récepteur minbar	Récepteur Centre	Récepteur droite	Récepteur gauche	Récepteur arrière	Derrière les poteaux
Première correction	0.68	0.57	0.58	0.59	0.53	0.1
Deuxième correction	0.7	0.64	0.63	0.63	0.63	0.1

Tableau comparatif des valeurs du STI sur les récepteurs durant les deux phases de corrections.

Planche 4.15 : Résultats des valeurs du STI, suite à la deuxième correction de la mosquée Ennour.

#### **4.4.3. Première phase de correction de la Mosquée Ibn arabi.**

Au terme de la phase de simulation présentée au chapitre précédent, on a indiqué dans la conclusion, les emplacements dans la mosquée qui nécessitent un réaménagement. Cette opération vise à améliorer la capacité absorbante des matériaux afin de réduire l'énergie du champ diffus et donc la réverbération.

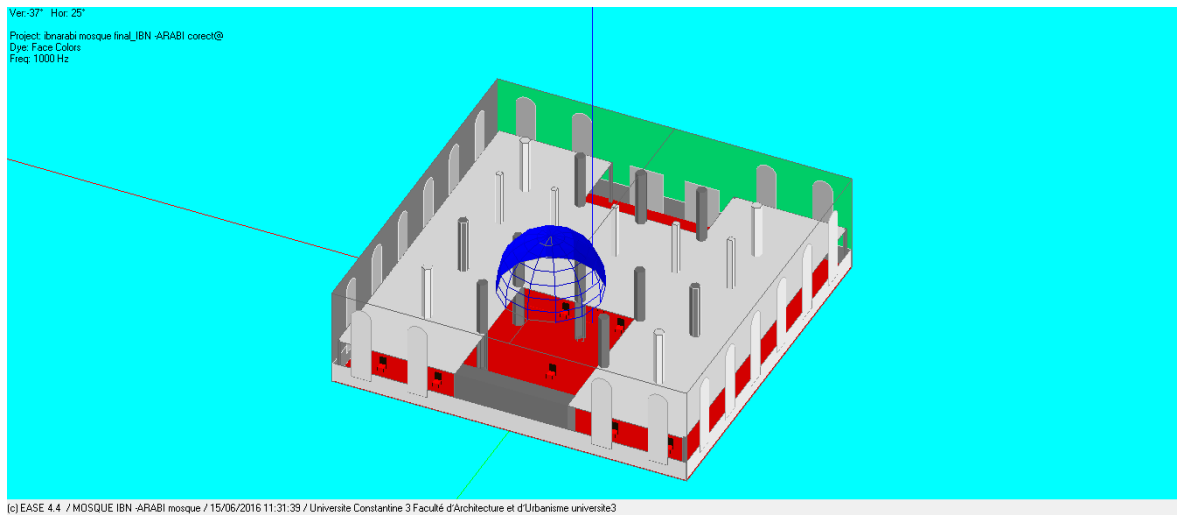
Les zones sélectionnées sont la coupole, le mur arrière ainsi que le tapis. Au terme de cette première phase de correction et au vu des résultats obtenus, on pourra décider d'entamer une deuxième correction qui touchera les proportions géométriques de la coupole ainsi que les murs latéraux.

L'objectif de cette première correction est de réduire de focalisation induite par la coupole, de réduire l'énergie du champ réverbéré en augmentant l'absorption de la moquette et du mur arrière. On a donc procédé comme pour la mosquée Ennour, à recouvrir l'ensemble de la coupole par un matériau absorbant (panneau de Placoplatre perforé) qu'on a décrit précédemment ; ainsi que le mur arrière qu'on a recouvert par des panneaux en bois décoré, ce type de panneaux sera bien intégré au mur qui comprend trois grandes portes en bois. Enfin le sol sera recouvert d'une moquette qui possède une absorption importante dans la plage des fréquences hautes et des médiums. Les coefficients d'absorption de ces matériaux sont illustrés dans la planche 4.3.

#### **Résultats des paramètres acoustiques.**

##### **A. Résultat du critère Le Tr 60**

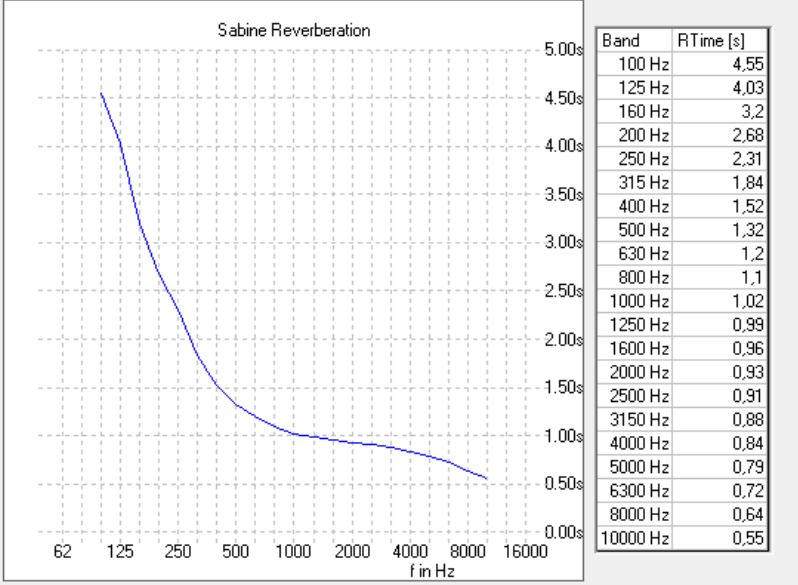
Le temps de réverbération  $Tr_{60}$  de Sabine, est le premier critère qui nous renseigne sur la qualité acoustique de l'espace après la correction. Le graphe avec tableau des valeurs du  $Tr$  sur l'ensemble des fréquences de la (planche 4.16), indique une amélioration importante du  $Tr$  aux fréquences médiums. Le  $Tr$  nominal avant correction étant égal à 1.9 s, après correction le  $Tr$  nominal est de 1.17s, donc plus proche du  $Tr$  recommandé de 0.98 s.



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 15/06/2016 11:31:39 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Vue axonométrique de la mosquée Ibn-Arabi, avec représentation en couleurs de la coupole, du mur arrière et le sol en moquette. Ces trois parties de l'espace ont été réaménagés par des matériaux absorbants.

Project	MOSQUE		Town :	EASE Town	
Hall :	MOSQUE		RT desired :	0 s	
Version :	IBN -ARABI mosque				
Geometry		Absorption		Mean Free Path	
Room Surface :	6674.43 m <sup>2</sup>	Avg. Abs. Area :	1512.45 m <sup>2</sup>	Length :	5.63 m
Volume :	9486.95 m <sup>3</sup>	Avg. Abs. Coeff. :	0.23	Time :	0.02 s



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 31/05/2016 14:34:46 / Université Constantine 3 Faculté d'Architec

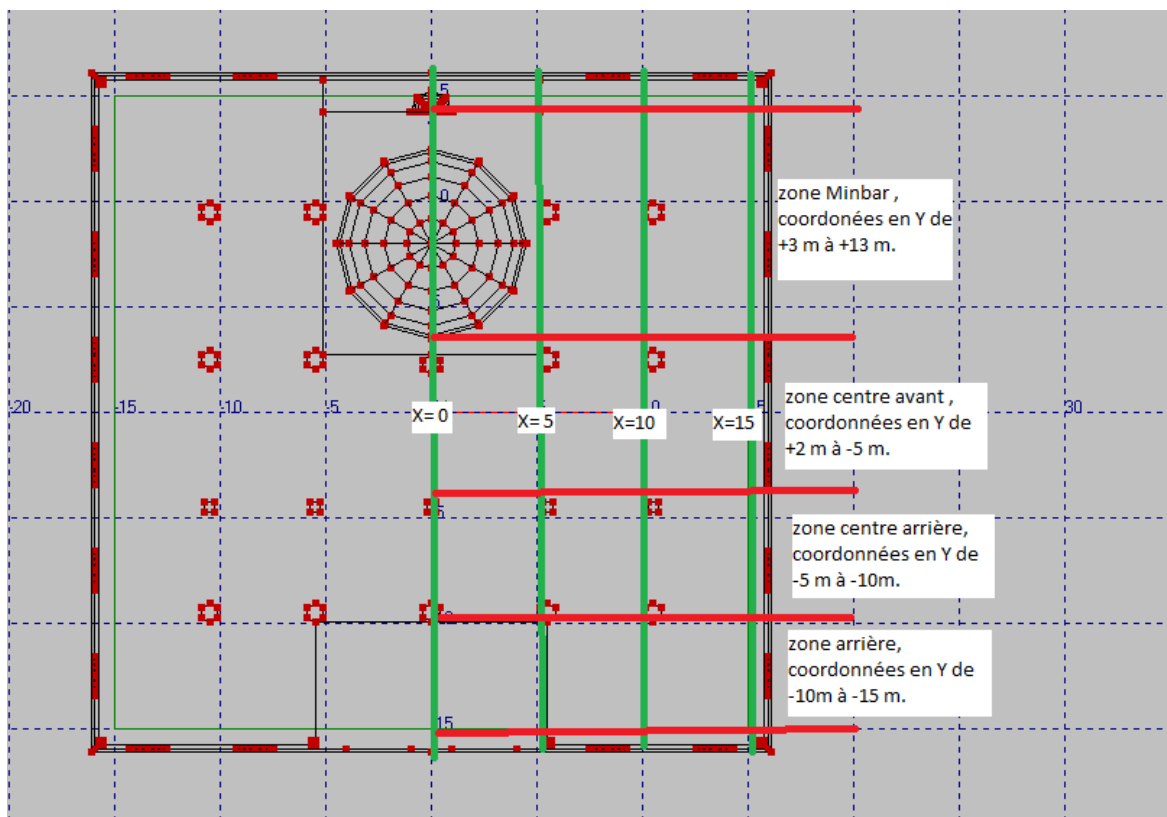
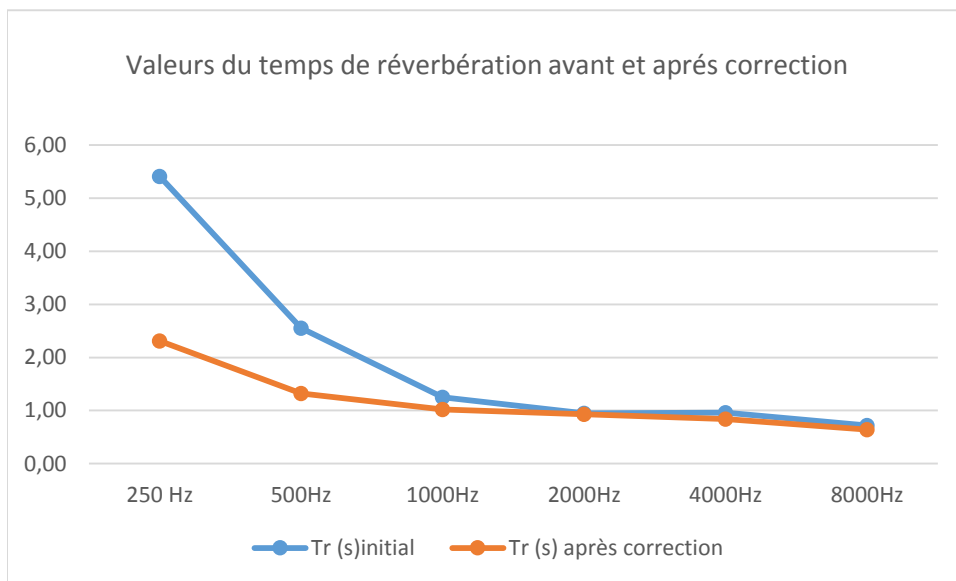
Valeurs en secondes des durées de réverbération sur l'ensemble des fréquences, après réaffectation des matériaux.

Planche 4.16 : illustration des parties de l'espace réaménagées et les valeurs de la durée de réverbération après correction, de la mosquée Ibn-Arabi.

## **B. Le Tr 30 et l'EDT.**

Dans le but de recueillir le maximum d'information sur l'impact de nos choix de dispositions des matériaux absorbants dans l'espace, on a opté vers une répartition des récepteurs en fonction des variations du volume. Comme pour la mosquée Ennour on a ainsi entrepris une division de l'espace selon les deux axes X et Y. Ces divisions sont illustrées sur la vue en plan de la (planche 4.17) 2. Sur l'axe horizontal des X, on a respectivement quatre positions, du centre vers le côté droit, avec X égal à 0 m, 5m, 10m et 115m. Sur l'axe vertical des Y on a recueillis les valeurs des deux critères sur 30 positions, (du mur du Minbar à l'avant jusqu'au mur à l'arrière) puisque l'espace a été divisé selon une trame de 1mètre de côté.

Ainsi sur chaque axe des X on a pu obtenir 30 valeurs ce qui nous donne en tout 120 valeurs de chaque critère pour une seule fréquence, les valeurs retenus concernent le Tr nominal (moyenne du 500 Hz et 1000 Hz). Afin de faciliter la lecture et l'interprétation des résultats, on les a regroupés en quatre zones affecté de leurs valeurs moyennes respectives, qu'on a nommées, Minbar, centre avant, centre arrière et arrière. Le tableau de la (planche 4.18), spécifie les caractéristiques architecturales et volumétriques de chaque zone.



université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Vue en plan de la mosquée Ibn-Arabi avec illustration des quatre axes positionnés respectivement en X à 0m, 5m, 10m et 15m, et en Y en quatre zones « Minbar, centre avant, centre arrière et arrière ».

Planche 4.17 : valeurs du Tr 60 Sabine initial et après correction, position des axes de réceptions pour le calcul du Tr 30 et de l'EDT, de la mosquée Ibn-Arabi.

Nomination des zones	X= 0 m	X= 5 m	X= 10 m	X = 15m
Minbar	Zone allant du mur de la qibla à la limite de la coupole hauteur de 8 à 15 m.	Zone proche du mur de la qibla, à la limite de la coupole, hauteur 4 m.	Zone proche du mur de la qibla, hauteur de 4 m.	Zone proche du mur de la qibla et contigüe au mur latéral droit, hauteur de 4 m.
Centre avant	Zone au centre située sous la mezzanine hauteur de 4 m.	Zone au centre à la limite de la coupole hauteur 4 m.	Zone loin des murs, hauteur de 4 m	Zone contigüe au mur latéral droit, hauteur 4 m.
Centre arrière	Zone au centre située sous la mezzanine hauteur de 4 m.	Zone au centre, à la limite de la coupole hauteur 4 m.	Zone loin des murs, hauteur de 4 m	Zone contigüe au mur latéral droit, hauteur 4 m.
arrière	Zone proche du mur arrière sous l'ouverture de la mezzanine hauteur 9 m	Zone proche du mur arrière à la limite de l'ouverture de la mezzanine hauteur 4 m.	Zone proche du mur arrière hauteur sous plafond 4 m.	Zone proche du mur arrière et contigüe au mur latéral, hauteur sous plafond 4 m.

Planche 4.18 : Tableau portant la définition des caractéristiques architecturales et volumétriques des zones délimitées en tant que récepteurs de la mosquée Ibn-Arabi.

Le graphe illustrant les valeurs du Tr 30 nominal de la (planche 4.19) nous fournit plusieurs indications sur l'état des premières réflexions suite à la correction effectuée. En comparant les valeurs du Tr 30 pour les différentes positions on peut conclure ce qui suit :

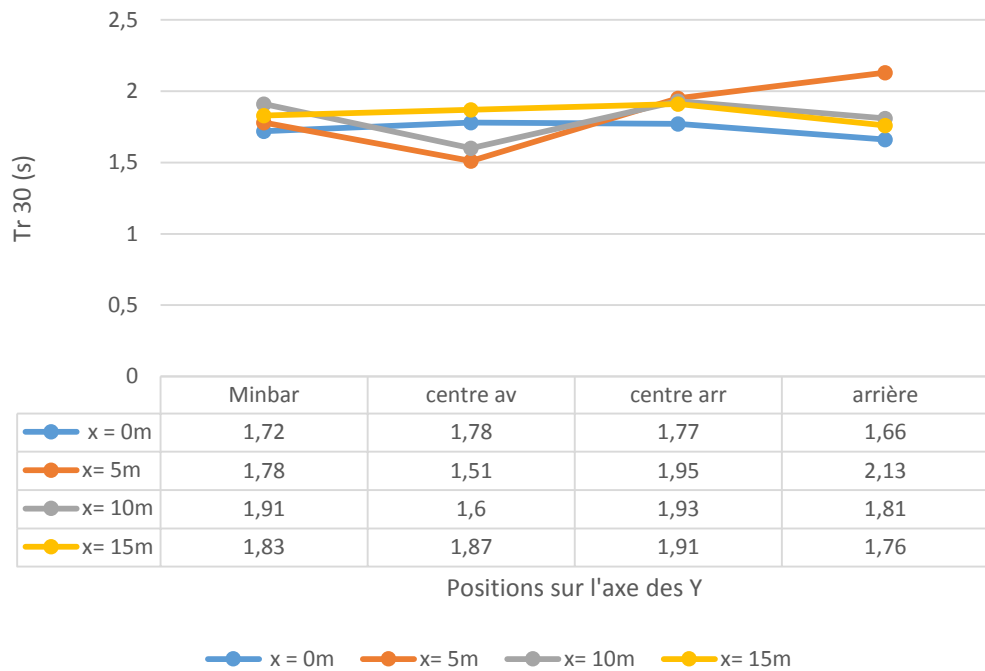
Sur l'axe central ( $X=0$ ) le plus critique, avec des variations de volumes, où se situe la coupole et l'ouverture de la mezzanine à l'arrière ; les valeurs du Tr 30 sont presque uniformes sur l'ensemble des positions, entre 1.6 s et 1.7 s, de l'avant vers l'arrière. Ces résultats sont très satisfaisants et nous indiquent que l'augmentation de la capacité absorbante de la coupole a réduit son effet de focalisation. (Planche 4.19)

Les variations des valeurs du Tr30, sur les autres axes subissent aussi peu de variations, compris entre 1.5s et 1.9 s, le seul point critique concerne l'axe  $X=5m$  à l'arrière le Tr30 étant égal à 2.13s. En fait cet axe est contigu à l'axe  $X=0$  où se situe l'ouverture de la mezzanine à l'arrière.

Sur le deuxième graphe de la (planche 4.19), les variations du Tr30 sur les différentes positions, avant et après la correction illustre très clairement l'amélioration au niveau du centre proche de la coupole, le Tr 30 est passé de 2.62 s à 1.77 s. dans la zone arrière l'amélioration est également significative, le Tr30 est passé de 2.4s à 1.66s. En conclusion cette correction a pu réduire la réverbération excessive qui se situait sous et autour de la coupole, néanmoins les valeurs du Tr30 reste élevées sur l'ensemble des récepteurs dont la majorité se situent sous la mezzanine.



### Valeurs du Tr 30 en allant du Minbar vers l'arrière et du centre vers le mur lateral



Variation des valeurs du Tr 30 le long de l'axe horizontal en (X) et vertical en (Y). Le Tr30 le plus important concerne l'emplacement de l'axe x= 5m à la position « arrière ».

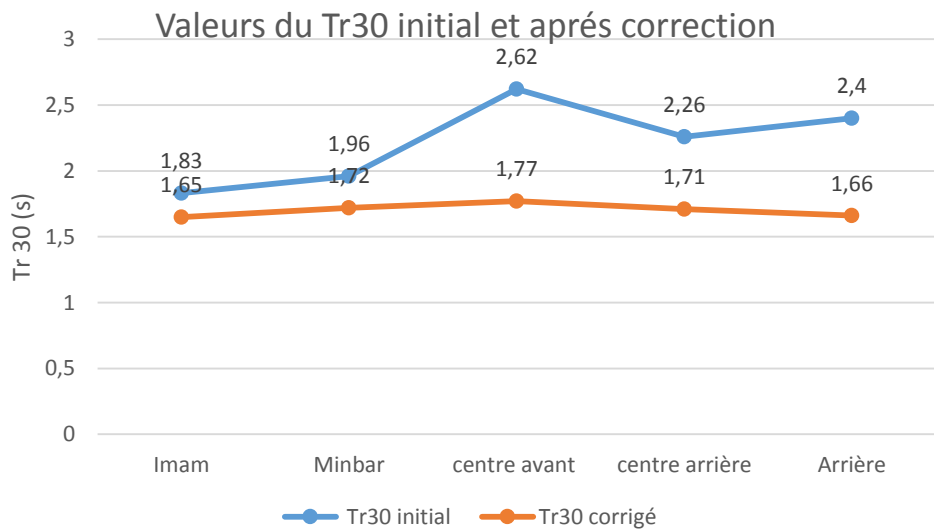


Planche 4.19 : les valeurs du Tr30 après correction sur les principaux récepteurs, et comparaison avec le Tr30 initial.

Sur le premier graphe de la (planche 4.20) illustrant les valeurs détaillées de l'EDT sur les principaux récepteurs placés sur les quatre axes perpendiculaires à la qibla, on remarque qu'à l'exception du récepteur Minbar sur l'axe  $X=0$  (0.86 s) l'ensemble des récepteurs se trouvant sous la mezzanine ont des valeurs entre 1.19s et 1.96s, ce qui constitue des valeurs supérieures aux valeurs préconisées. Nous remarquons sur le graphe bleu de l'axe  $X=0$  une tendance particulière, que nous allons détailler dans le graphe suivant.

Sur ce graphe, détaillant les valeurs de l'EDT calculées sur l'axe centrale (l'axe de la source) à partir du Minbar jusqu'à sous la mezzanine, nous avons représenté les valeurs moyennes de l'EDT sur les fréquences 500 et 1000 Hz sur l'axe centrale à partir du minbar jusqu'à la mezzanine. Ce graphe nous a fournis des indications sur l'état du champ direct. On peut ainsi distinguer sur ce graphe la distance qui sépare le champ direct et le début du champ réverbéré qui débute à environ 6 mètres de la source, puisque la zone Minbar et le début de la zone sous la coupole sont exempt de champ réverbéré. Sur cette distance l'EDT passe de 0.03s à 1.14s.

Dans la zone sous la coupole la réverbération atteint le pic de 2.05s ou la hauteur du volume est de 15 m, et se réduit progressivement en passant sous la mezzanine avec une hauteur de 4m.

Sur le dernier graphe de la (planche 4.20), donnant les valeurs moyenne (500 et 1000 Hz) de l'EDT initial et après correction, on peut noter pour les deux zones traitées, le Minbar et l'arrière une amélioration des valeurs de l'EDT qui sont passées pour la zone Minbar de 2.46s à 0.86s et pour l'arrière de 2.26 s à 1.69s, pour le reste des récepteurs se trouvant sous la mezzanines les valeurs n'ont pas changé.

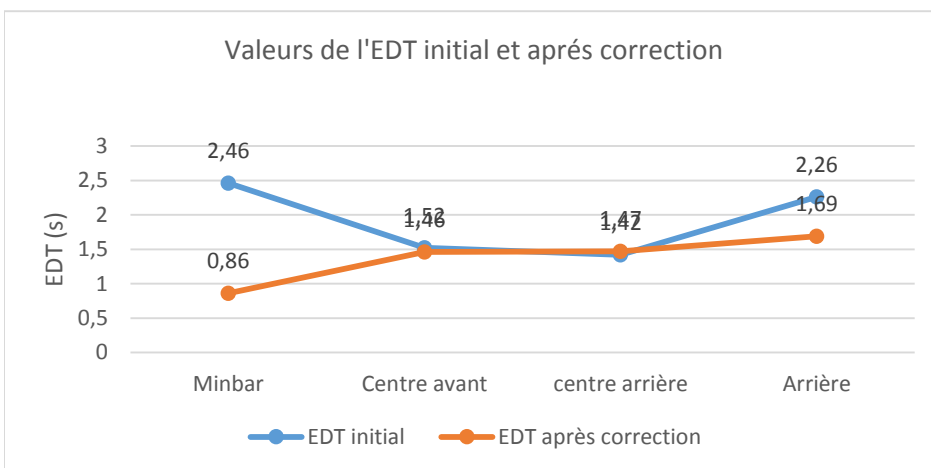
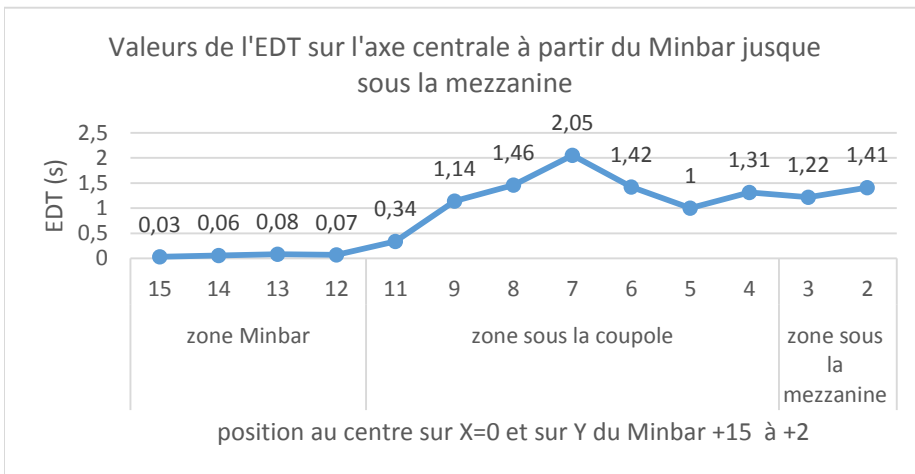
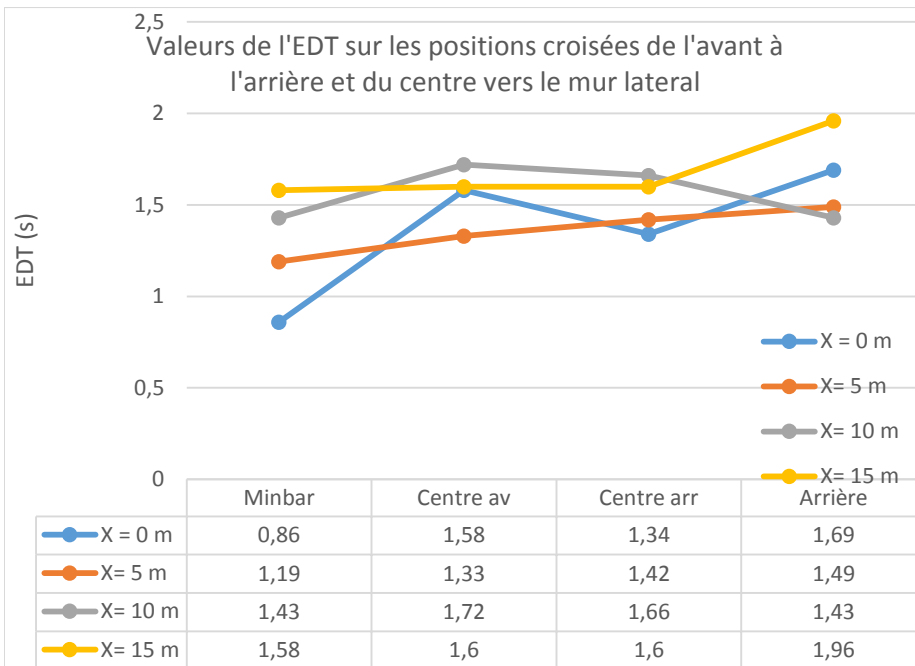
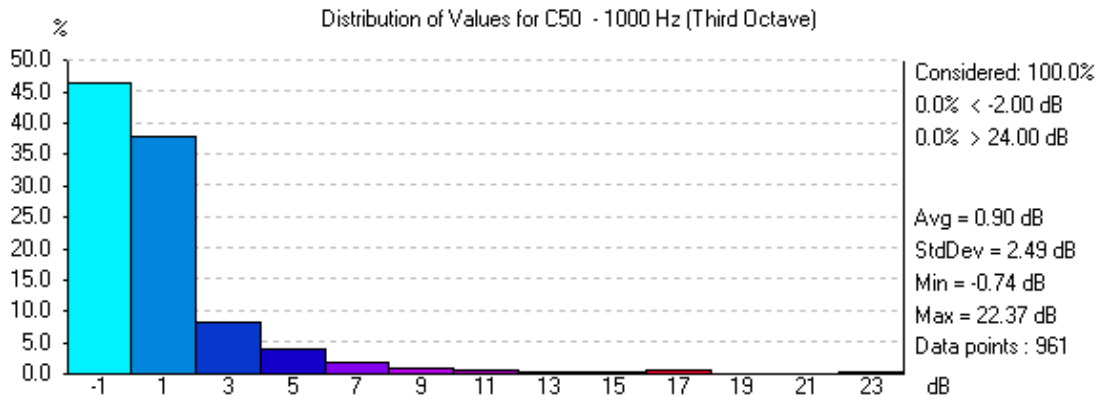


Planche 4.20 : les valeurs de l'EDT sur les principaux récepteurs, et comparaison entre l'EDT initial et après correction.

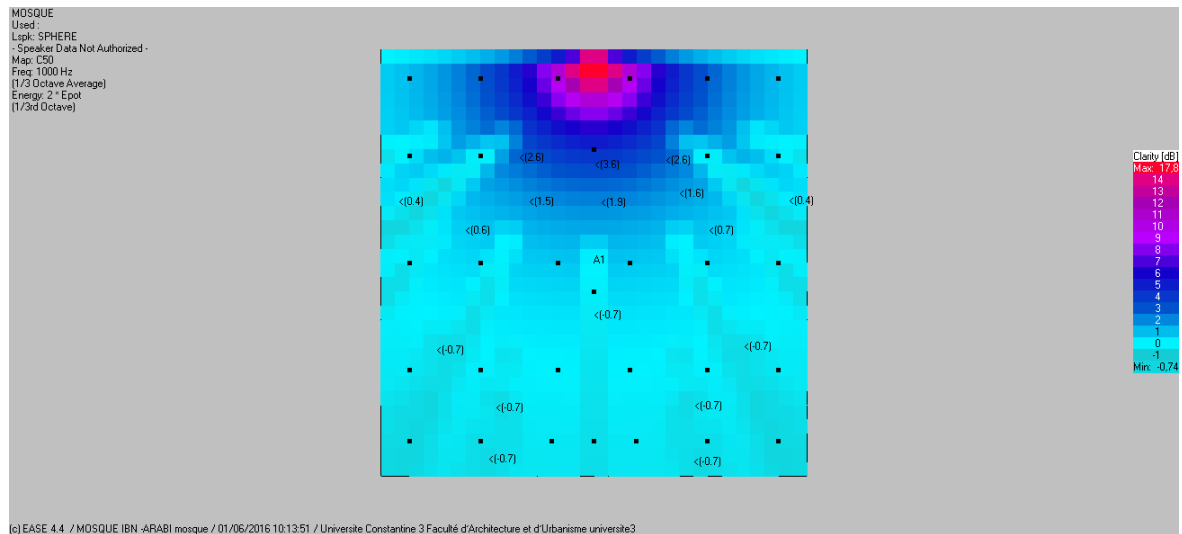
### **C. La clarté C50 et l'intelligibilité STI.**

Les valeurs du C50 et du STI après correction sont illustrées sur les (planches 4.21 et 4.22). Le graphe de la (planche 4.21) représentant la comparaison des valeurs du C50 initial et après correction, nous indique une petite amélioration sur les principaux récepteurs. Sur chaque récepteur on a un gain de 1.5 dB. L'amélioration de ce critère apparait dans la distribution du C50 sur l'aire d'audience, on peut relever sur la cartographie une réduction des zones caractérisées par des valeurs négatives, en effet la moyenne de la distribution du C50 est passée de 0.38 dB initial à 0.9 dB après correction.

Les résultats du STI après correction sont illustrés sur le graphe de la (planche 4.22), avec la comparaison des valeurs du STI initial et du STI après correction dont les valeurs pour tous les récepteurs sont égales ou supérieures à 0.6, ce qui constitue un résultat satisfaisant puisque une intelligibilité moyenne doit être égale ou supérieure 0.5.. Cette amélioration est également visible sur la cartographie du STI après correction sur la planche 4.22, où sur l'ensemble de l'aire d'audience les valeurs sont toutes supérieures à 0.5. .



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 01/06/2016 10:08:46 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 01/06/2016 10:13:51 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

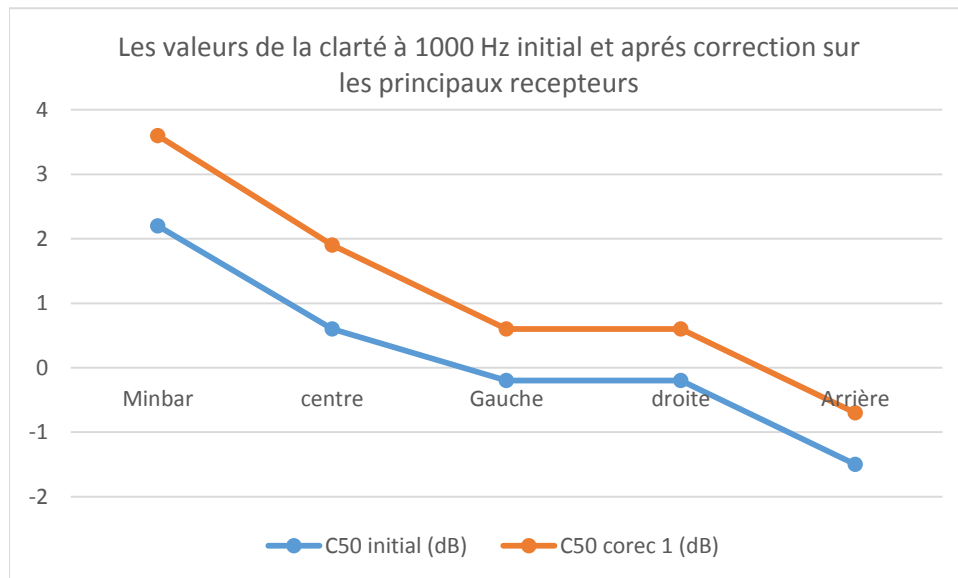
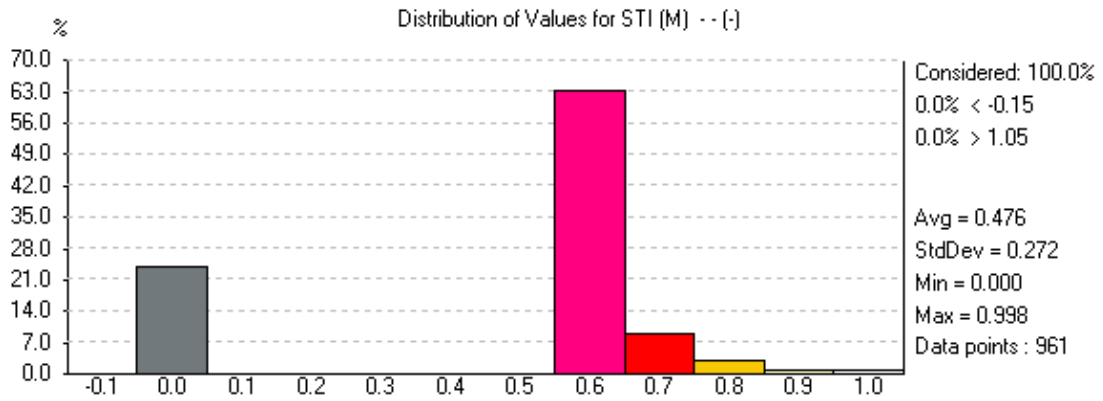
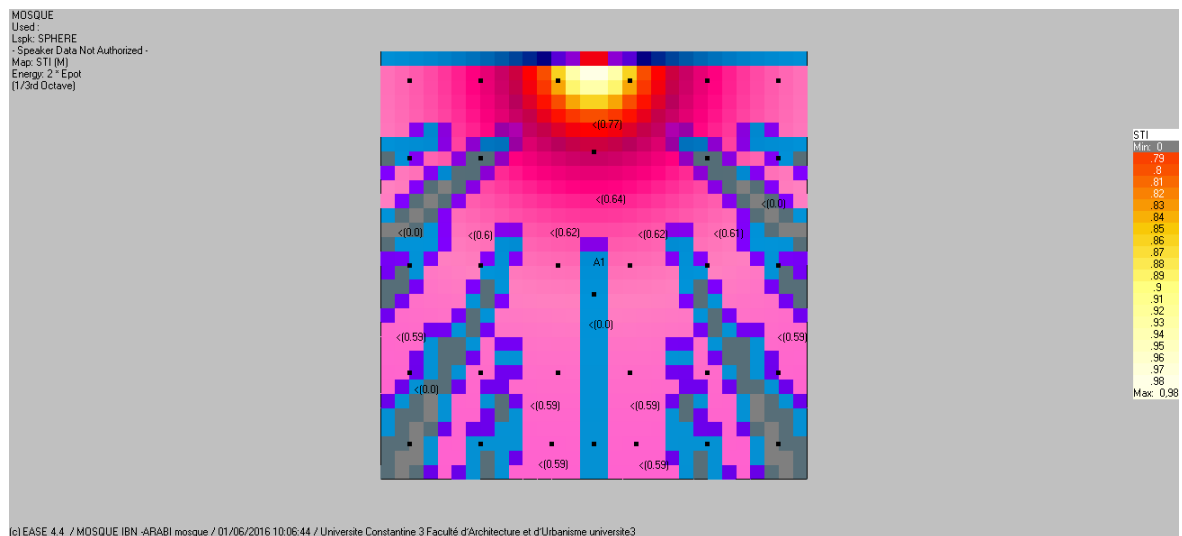


Planche 4.21 : les Valeurs du C50 à 1000 Hz sur l'aire d'audience après correction. Comparaison entre les valeurs du C50 initial et après correction sur les principaux récepteurs.



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 01/06/2016 10:02:42 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 01/06/2016 10:06:44 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Les valeurs du STI initial et après correction sur les principaux récepteurs

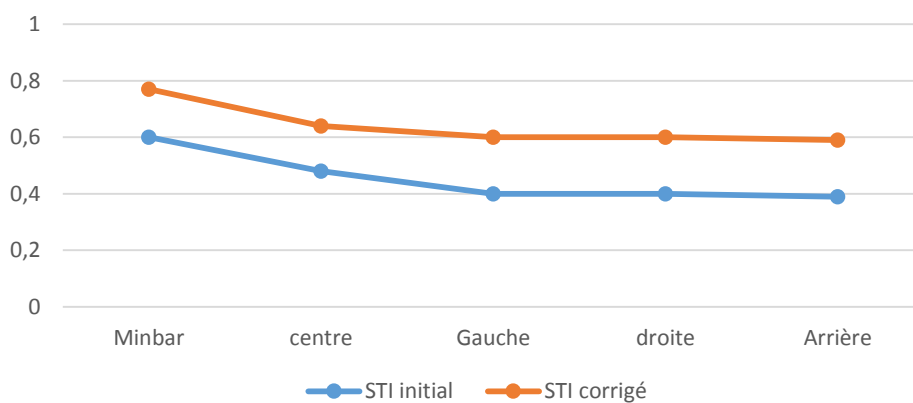


Planche 4.22 : les valeurs du STI sur l'aire d'audience après correction. Comparaison entre les valeurs du STI initial et après correction sur les principaux récepteurs.

#### **4.4.4. Deuxième phase de correction de la Mosquée Ibn-Arabi.**

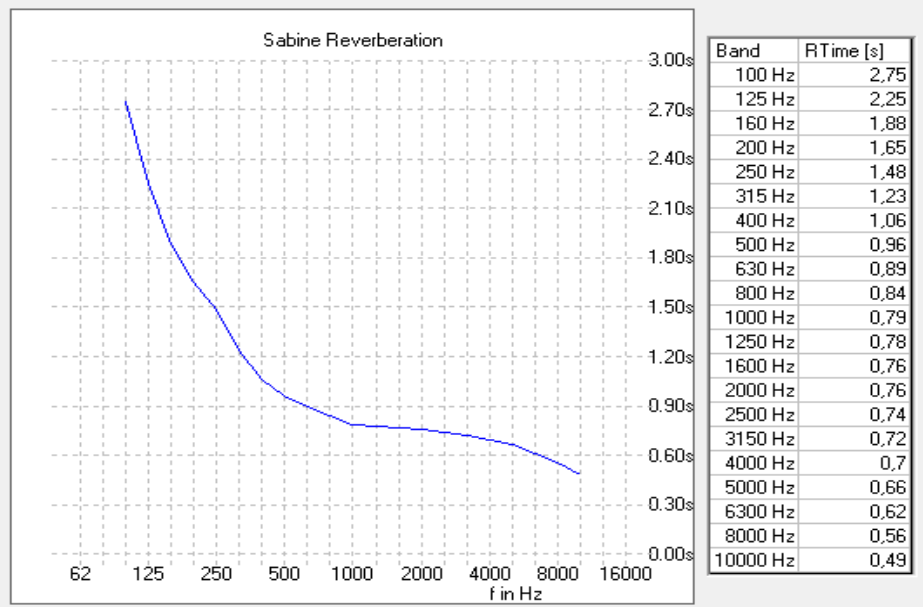
Suite à l'ensemble des propositions de réaménagements qu'on a entrepris durant la première phase de correction, on a pu constater des améliorations significatives sur l'ensemble des critères simulés, pour les récepteurs situés dans les zones traitées c'est-à-dire proche de la coupole et à l'arrière. Concernant les récepteurs se trouvant sous la mezzanine l'amélioration est très minime. En comparaison avec la mosquée Ennour dont environ la moitié de l'espace est recouvert par la coupole, la mosquée Ibn-Arabi à 50% de son espace recouvert par la mezzanine. Donc pour cette mosquée, le traitement du plafond de la mezzanine contribuera plus à l'amélioration de la durée de réverbération et des autres critères acoustiques.

Nous proposons donc pour cette deuxième phase de correction de procéder à un traitement du plafond de la mezzanine avec le même matériau absorbant qu'on a utilisé pour le traitement du mur arrière. Les résultats de la simulation de la durée de réverbération, après le traitement avec le matériau absorbant sont illustrés sur la (planche 4.23). Les valeurs du Tr Sabine sur l'ensemble des fréquences représentées sur le tableau de la (planche 4.23), répondent parfaitement aux valeurs préconisées avec un Tr 500 égal à 0.96 s. Le deuxième graphe de la planche 4.23 illustre une comparaison des valeurs du Tr initial et après les deux phases de corrections, on remarque une amélioration très significative du Tr pour les fréquences médiums (propre à la parole) ce résultat répond parfaitement à nos attentes et confirme notre bon choix des matériaux.

Project		Town :	
Hall :	MOSQUE	EASE Town	
Version :		RT desired :	
IBN -ARABI mosque		0 s	

Geometry		Absorption		Mean Free Path	
Room Surface :	6674.43 m <sup>2</sup>	Avg. Abs. Area :	1949.26 m <sup>2</sup>	Length :	5.69 m
Volume :	9486.95 m <sup>3</sup>	Avg. Abs. Coeff. :	0.29	Time :	0.02 s



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 19/06/2016 13:31:25 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architect

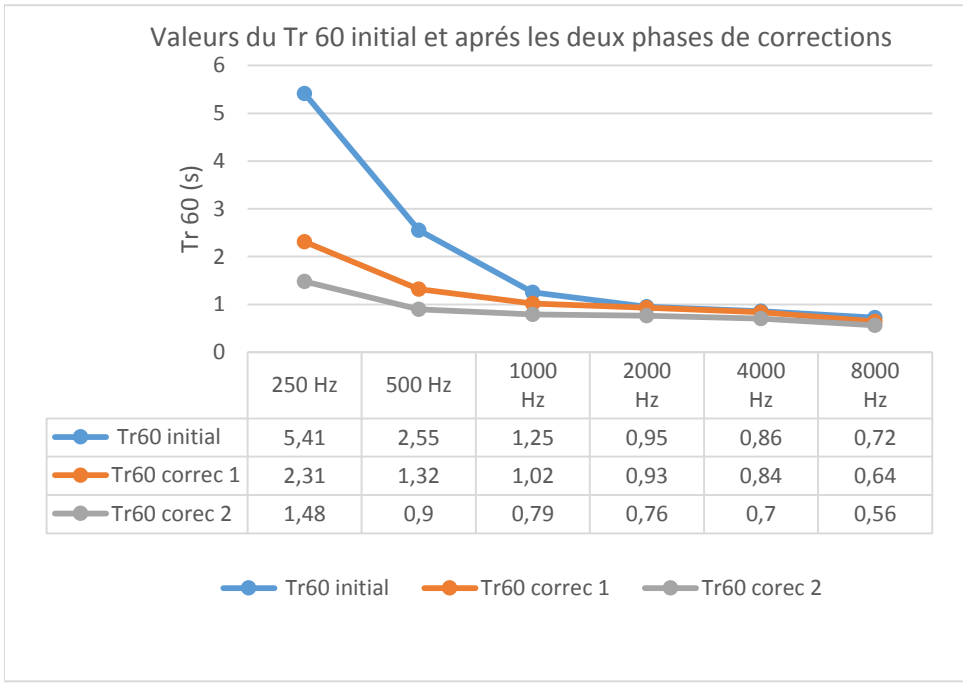


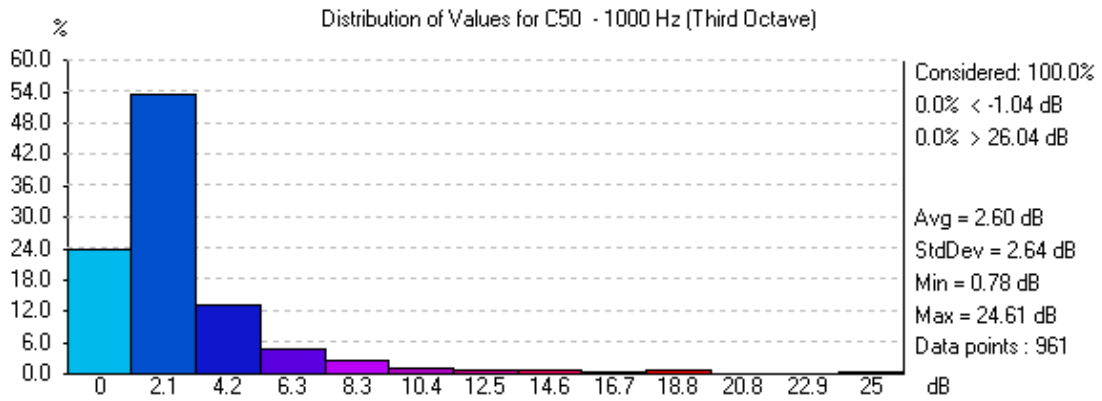
Planche 4.23 : Les valeurs du Tr 60 après la deuxième correction et graphe illustrant les valeurs du Tr 60 initial et après les corrections de la mosquée Ibn-Arabi.



Les améliorations de la qualité acoustique de la mosquée apparaissent à travers les deux autres critères. Sur la (planche 4.24) les valeurs de la clarté C50 après corrections, sont visibles sur l'histogramme de la distribution ainsi que sur la cartographie où les valeurs des différents récepteurs apparaissent sur l'aire d'audience. On remarque que pour tous les récepteurs même se trouvant à l'arrière le C50 est supérieur à 1, il varie sur l'ensemble de l'aire d'audience entre 1 et 6.5 estimées comme étant des valeurs moyennes à très bonnes.

La (planche 4.25) comprend les représentations graphiques du STI ; sur l'histogramme de la distribution des valeurs du STI, la valeur moyenne sur l'ensemble de l'aire d'audience est égale à 0.5 et sur l'ensemble des récepteurs les valeurs varient entre 0.7 et 0.6 estimées comme étant des valeurs moyennes à très bonnes.

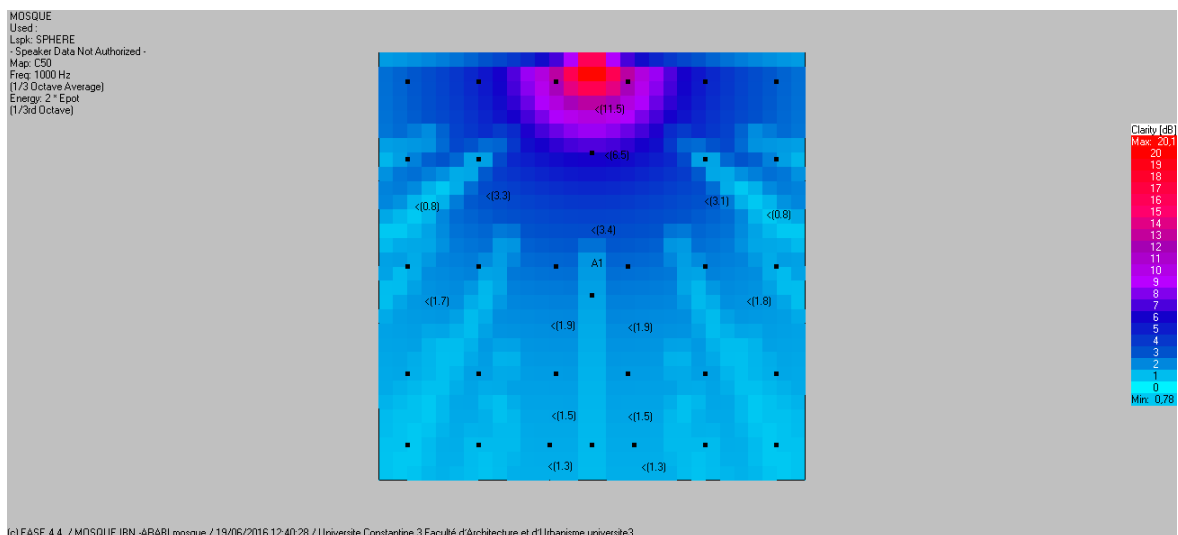
On a rassemblé sur la (planche 4.26) deux graphes pour comparer les valeurs initiales du C50 et du STI avec ceux des deux corrections. Le premier graphe représentant le C50 nous indique une amélioration importante pour tous les récepteurs, en particulier ceux de l'arrière. Le deuxième graphe représentant le STI initial et après correction, indique une amélioration importante du fait de la première correction et une amélioration moins importante suite à la deuxième correction. Néanmoins sur l'ensemble des récepteurs même ceux à l'arrière les valeurs sont considérées comme moyennes à bonnes.



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 19/06/2016 12:37:55 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme

Distribution des valeurs du C50	Première correction	Deuxième correction
Moyenne du C50	0.9dB	2.60 dB
Valeur minimale du C50	0.74 dB	0.78 dB
Valeur maximale du C50	22.37 dB	24.61 dB

Tableau comparatif de la distribution sur l'aire d'audience du C50 durant les deux phases de corrections.

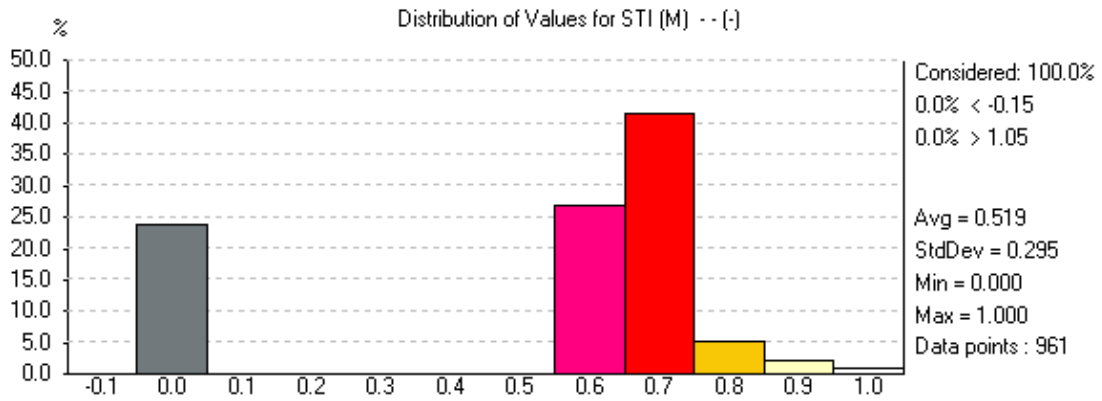


(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 19/06/2016 12:40:28 / Universite Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Valeurs du C50 (dB)	Récepteur minbar	Récepteur Centre	Récepteur droite	Récepteur gauche	Récepteur arrière	Derrière les poteaux
Première correction	3.6	1.9	1.3	0.6	0.6	-0.7
Deuxième correction	6.5	3.4	1.8	1.7	1.3	0.8

Tableau comparatif des valeurs du C50 sur les récepteurs durant les deux phases de corrections.

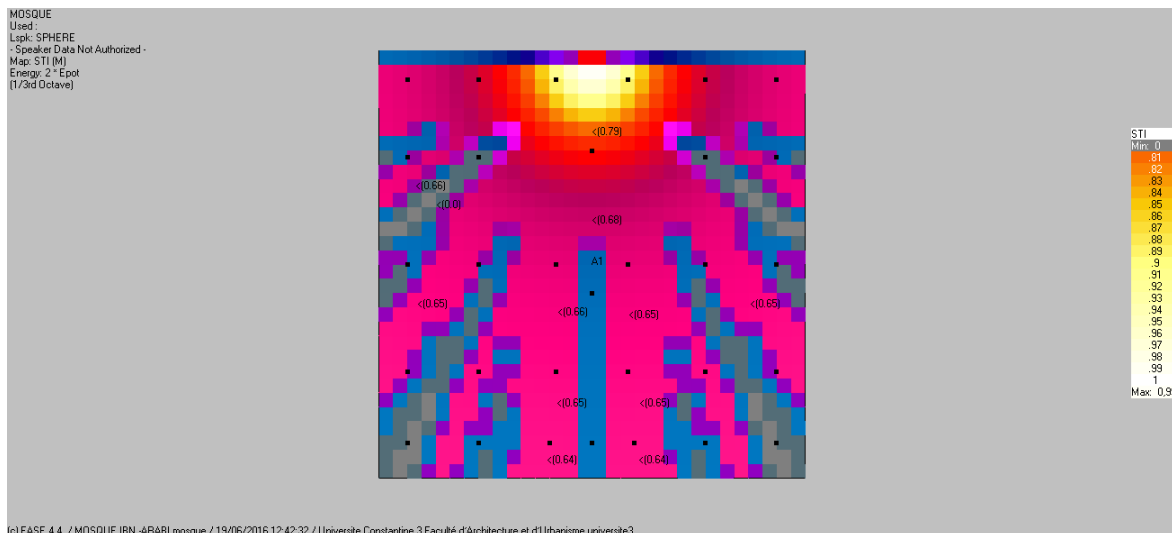
Planche 4.24 : Résultats des valeurs du C50, suite à la deuxième correction de la mosquée Ibn-Arabi.



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 19/06/2016 12:43:29 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme

Distribution des valeurs du STI	Première correction	Deuxième correction
Moyenne du STI	0.47	0.51
Valeur minimale du STI	0	0
Valeur maximale du STI	0.9	1

Tableau comparatif de la distribution sur l'aire d'audience du STI durant les deux phases de corrections.



(c) EASE 4.4 / MOSQUE IBN -ARABI mosque / 19/06/2016 12:42:32 / Université Constantine 3 Faculté d'Architecture et d'Urbanisme universite3

Valeurs du STI	Récepteur minbar	Récepteur Centre	Récepteur droite	Récepteur gauche	Récepteur arrière	Derrière les poteaux
Première correction	0.77	0.64	0.60	0.60	0.59	0
Deuxième correction	0.79	0.68	0.65	0.65	0.64	0

Tableau comparatif des valeurs du STI sur les récepteurs durant les deux phases de corrections.

Planche 4.25 : Résultats des valeurs du STI, suite à la deuxième correction de la mosquée Ibn-Arabi.

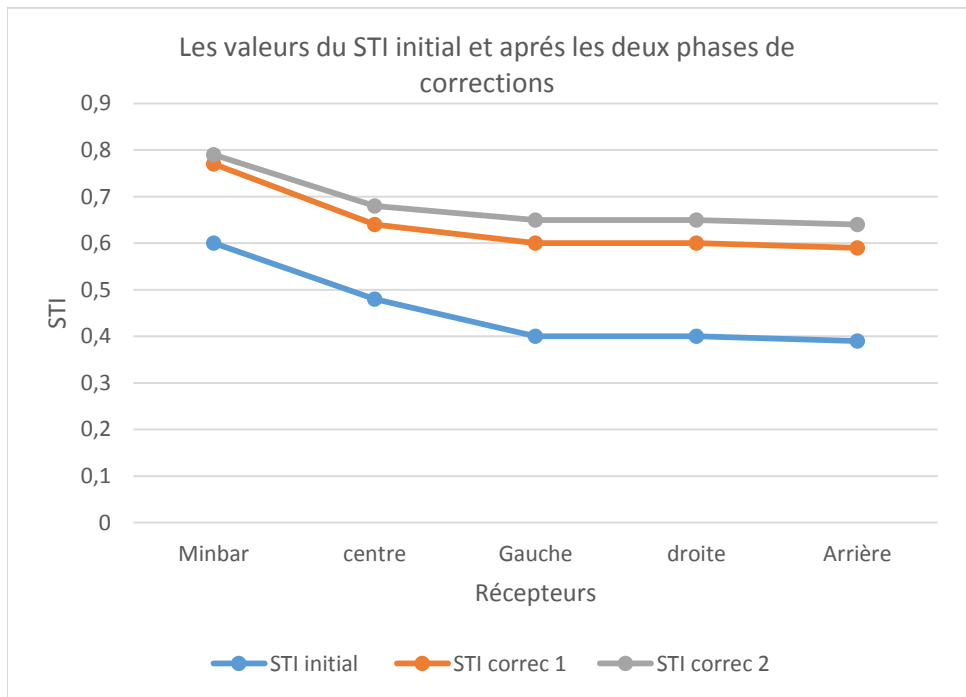
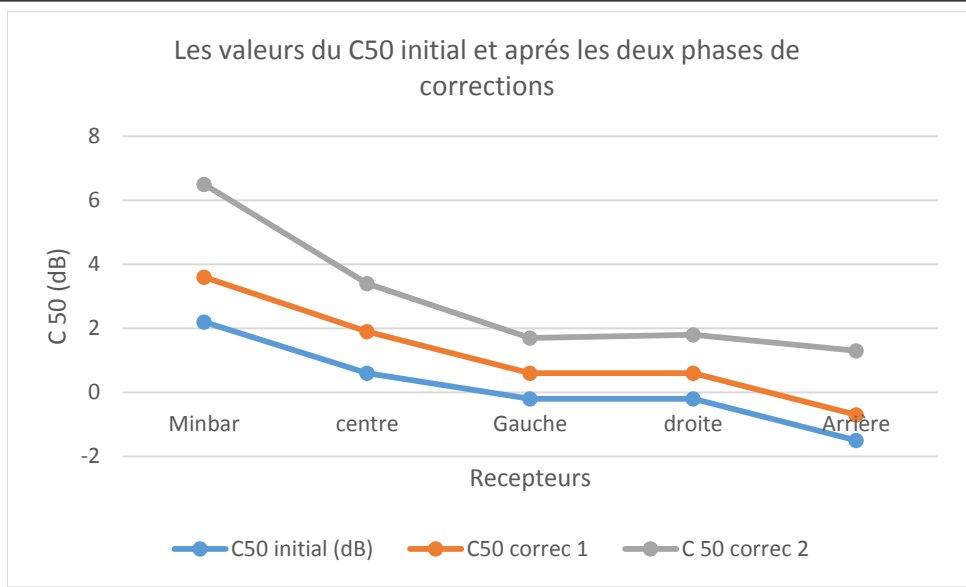


Planche 4.26 : Graphes comparants les valeurs initiales et après les corrections de la clarté C50 et de l'intelligibilité de la mosquée Ibn-Arabi.

## 4.5 Conclusion.

Pour conclure sur cette étude corrective en vue d'améliorer la qualité acoustique des mosquées, nous voudrions préciser plusieurs points de méthodes relatifs à cette investigation.

Tout d'abord, on a opté pour une stratégie de correction spécifique à chaque mosquée, en fonction des caractéristiques architecturales propres à chacune d'elle. Les particularités propres à chaque mosquée concernent les aspects liés au volume intérieur, à la disposition de la mezzanine, au nombre de poteaux ainsi qu'à la taille et la position de la coupole dans l'espace. L'importance de ces éléments quant à la qualité acoustique de l'espace, ont été détaillé au début de ce chapitre et donc leur variation nous a incité à adopter des stratégies de corrections différentes.

Le deuxième aspect concerne directement les résultats de simulation des critères acoustiques de chaque mosquée. L'interprétation de ces résultats a orienté notre démarche de correction spécifique pour chaque mosquée, puisque les variations architecturales liées à la conception de l'espace intérieur ont induit des variations dans les résultats des principaux critères simulés.

Concernant l'aspect architectonique, on remarque que les deux mosquées possèdent des surfaces intérieures recouvertes par les mêmes types de matériaux, on a ainsi procédé à un choix de matériaux de corrections similaires pour les deux mosquées.

Notre démarche de correction s'est déroulée en deux phases dans le but d'évaluer de façon précise l'impact de nos choix correctifs et d'analyser le degré d'amélioration apporté à la qualité acoustique de l'espace. Durant la première phase de correction, les éléments architecturaux les plus problématiques ont été traités, comme la coupole pour les deux mosquées, le mur de la qibla pour la petite mosquée et le mur arrière pour la grande mosquée. La présence de la moquette dans les mosquées, offrait l'avantage d'un matériau de grande dimension facile à traiter.

La stratégie de la deuxième phase de correction, a été élaborée suite à l'analyse des résultats des critères acoustiques en fonction des positions des récepteurs. Ainsi pour la petite mosquée avec une grande coupole couvrant la majorité de l'espace, un deuxième traitement de la coupole par une reconstruction de ses proportions géométriques a permis d'apporter des améliorations acoustiques. Pour la grande mosquée par contre, où la coupole n'était pas dominante, on a

procédé au traitement du plafond de la mezzanine, qui couvrait la majorité de l'espace et qui posait problème.

Les résultats obtenus suite aux deux phases de corrections pour les deux mosquées, ont donné des résultats satisfaisants pour tous les critères acoustiques. En fonction des récepteurs les résultats sont très bon pour les positions proches de la source et moyens pour les récepteurs éloignés de la source. Les seules positions dont les résultats sont faibles pour les critères de la clarté et de l'intelligibilité sont situées derrière les poteaux. Pour la petite mosquée les valeurs du C50 et du STI représentent une moyenne de 6.5% de l'aire d'audience et pour la grande mosquée la valeur moyenne est de 24% de l'aire d'audience. Ainsi pour la petite mosquée les conditions d'un confort d'écoute optimale ont été réalisées sans recourir à une assistance électroacoustique. Pour la grande mosquée par contre il est recommandé d'installer des appareils de sonorisation au niveau des poteaux pour améliorer la clarté du message

En fait les corrections acoustiques apportées aux mosquées ne constituent pas une fin en soi, puisque notre objectif est d'orienter nos résultats sur la conception d'un espace de mosquée articulé sur des critères sonores de qualités. Suivant nos hypothèses, la qualité sonore de l'espace architectural naît de l'interaction des caractéristiques architecturales et architectoniques de cet espace et des phénomènes physiques de l'acoustique des salles. Tout au long de ce chapitre on a pu constater l'influence de la composition et la conception des éléments architecturaux sur la qualité d'écoute. Ces résultats constituent en l'occurrence une confirmation de nos hypothèses.

## **4.6 Etablissement d'une plateforme d'aide pour les architectes.**

### **Introduction**

A la lumière de la conclusion présentée dans le chapitre précédent, ce dernier chapitre a pour but d'apporter à l'architecte concepteur un ensemble de propositions architecturales et techniques, comme assistance à la conception acoustique des mosquées. Dans le but de déterminer quelle forme doit prendre l'assistance que nous proposons aux architectes, on a étudié les outils qui fondent le déroulement du processus conceptuel puis, on a identifié les dispositions méthodologiques pour la prise en compte de la composante sonore dans le projet architectural. On a entrepris par la suite une enquête auprès des architectes, afin de déterminer les méthodes et les outils d'assistance qu'ils préconisent, pour une adaptation des aménagements acoustiques dans les mosquées. On débutera ce chapitre par exposer les résultats de cette enquête, afin de déterminer, les moyens de transmettre aux architectes (selon leurs attentes), les savoirs relatifs à la qualité acoustique des mosquées.

Notre objectif est de développer des propositions pour les architectes concepteurs, afin de fixer les contraintes à l'intérieur desquelles leur créativité peut se développer librement. Dans un souci de faciliter l'adoption de nos propositions par le plus grand nombre d'architectes (en fonction de leurs compétences et leurs expériences), On a opté pour une méthode de propositions définies selon deux volets distincts : un premier volet spécifiquement acoustique, propose des procédés acoustiques sur la base de calculs et d'épure géométrique. Un deuxième volet basé sur des critères architecturaux, proposant différents aménagements des principaux composants architecturaux de l'espace de la mosquée. Le but pour les mosquées est de créer une acoustique qui combine une grande clarté sonore, donc une bonne définition et une bonne intelligibilité.

#### **4.6.1. Propositions liées à l'enquête auprès des architectes.**

L'enquête que l'on a menée auprès des architectes<sup>30</sup>, a orienté notre démarche méthodologique quant aux « aménagements acoustiques » à mettre en œuvre afin d'aider l'architecte dans sa démarche de conception. Les résultats de cette enquête, ont dévoilé un certain nombre de facteurs à prendre en compte pour l'élaboration de nos propositions :

Les matériaux de finitions : Dans la conception des mosquées, beaucoup de choix conceptuels sont fait en rapport avec les critères d'esthétiques, en particulier pour le choix des matériaux de

---

<sup>30</sup> Voir chapitre 2.9.

finition et la décoration intérieure. Malheureusement la majorité des matériaux utilisés comme le marbre ou la faïence, constituent de grandes surfaces réfléchissantes du son ce qui provoque un accroissement de la réverbération et une baisse de la qualité d'écoute.

La coupole : pour la majorité des architectes, le choix de la taille et l'emplacement de la coupole répondent à des critères d'équilibre proportionnel du volume. Pour contribuer à un confort acoustique, l'adoption de certains rapports géométriques de la coupole, est un facteur déterminant de la qualité acoustique des mosquées

Le Mihrab : est considéré comme un composant conçu pour indiquer le sens de la qibla, il peut néanmoins avoir une fonction acoustique s'il est aménagé avec des dimensions et des matériaux spécifiques.

Le tapis : les architectes ne donnent pas d'importance au choix du tapis, ce dernier constitue par contre un critère de taille qui peut contribuer au confort acoustique de la mosquée.

Les outils d'assistance à la conception : Les architectes sont conscients de l'importance de la prise en compte de la qualité acoustique dans la conception des mosquées, mais le domaine des connaissances en acoustique est assez éloigné des compétences de l'architecte. Pour pallier à ce handicap la majorité des architectes questionnés proposent l'exploitation de références sous formes de documents techniques de normalisation et de réglementation.

#### **4.6.2. Les critères acoustiques liés à la conception.**

Afin de contribuer à créer un confort acoustique intérieur des espaces, la conception acoustique doit assurer une bonne compréhension du message parlé, pour ce faire l'architecte peut contribuer à cela en travaillant sur trois composants architecturaux, la forme de l'espace dans ses trois dimensions, les matériaux de mise en œuvre et enfin la disposition de ces matériaux dans l'espace.

En acoustique des salles, on dispose de trois approches complémentaires pour orienter les choix conceptuels de l'architecte. Sans entrer dans les détails des lois physiques de ces approches, on peut les résumer à ce qui suit :

La loi des dimensions de l'espace, est définie par l'approche modale.

L'approche géométrique permet l'étude de l'épure géométrique de l'espace.

Le choix des matériaux leur disposition et le calcul de la durée de réverbération, se fait selon les lois de l'approche statistique.



$l_x/l_z$	$l_y/l_z$
1.223	1.114
1.223	1.076
1.477	1.201
1.435 (1)	1.202 (1)
1.536	1.402
1.610	1.416
1.670	1.412
1.55	1.110
1.863	1.404 (1)
2.112	1.596
2.291	1.811
2.418	1.287
3.28	1.880

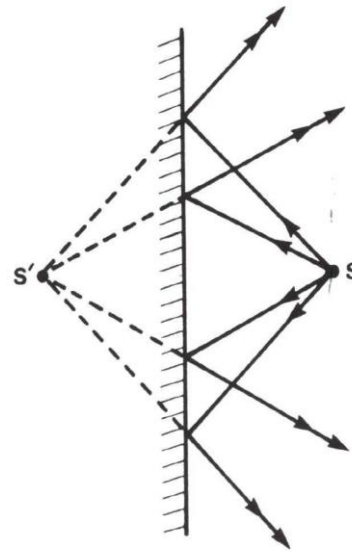
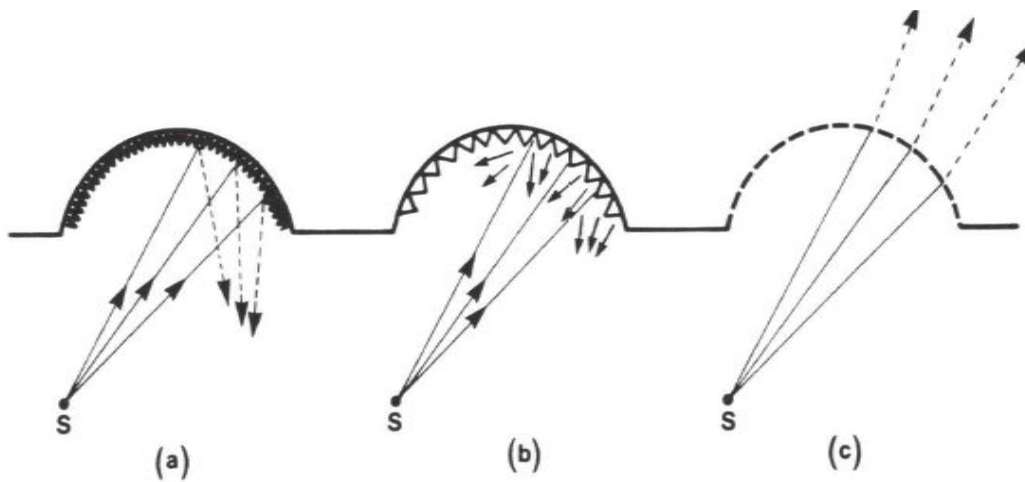


Tableau donnant les dimensions les plus favorables à reproduire dans l'espace. Les rapports suivis du (1) sont considérés comme excellents. (Delétré, J.J. 2003)

Réflexions des ondes sonores sur une surface plane (Jouhaneau, J., 2003)



Traitement local de la surface de la coupole : a) par absorption, b) par diffusion, c) par transmission (Jouhaneau, J., 2003)

Planche 4.27 : tracé du dessin géométrique des réflexions sonores sur une surface plane et concave.

### **A. Définition des dimensions de l'espace.**

L'étude du rapport proportionnel entre les trois dimensions de l'espace, peut contribuer à une qualité acoustique en évitant le phénomène de résonances liées à la forme et qui se produit dans les basses fréquences. Pour cela il faut veiller à ce que les rapports entre les trois dimensions, hauteur, longueur et largeur ne soit pas un multiple ou un sous multiple simple comme  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $4/5$ . Le tableau de la (planche 4.2.7), nous donne les rapports les plus favorables.

### **B. Tracer l'épure géométrique des ondes acoustiques de l'espace.**

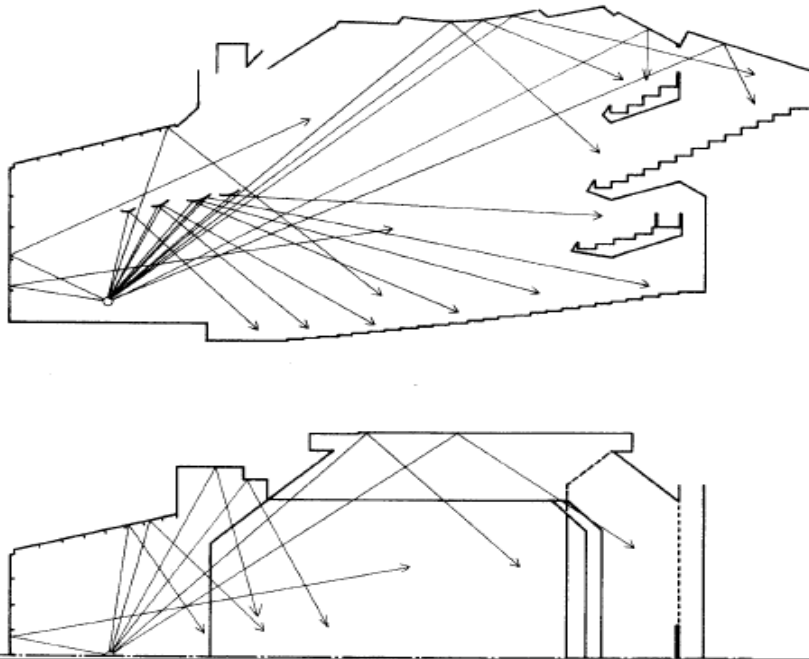
L'acoustique géométrique, offre à l'architecte la possibilité de détecter certains défauts majeurs de la forme de l'espace, grâce au tracé des rayons sonores réfléchis sur les représentations en plan et en élévation de l'espace. Ce tracé est basé sur l'équivalence de la réflexion des ondes sonores et des ondes lumineuses, le rayon sonore réfléchi, va former le même angle par rapport à la normale au plan que le rayon incident (planche 4.27). Cette méthode bien connue des grecs, apparaît sur le schéma de propagation des ondes sonores de deux théâtres (planche 4.28).

Pour ce faire, l'architecte doit dessiner sur une représentation en plan et en coupe de l'espace de la salle de prière, un grand nombre de rayons sonore à partir de la source. Cette schématisation va permettre à l'architecte de visualiser la propagation du son à travers l'ensemble de l'espace et d'observer les zones présentant des problèmes de focalisations d'écho flottant ou d'écho franc.

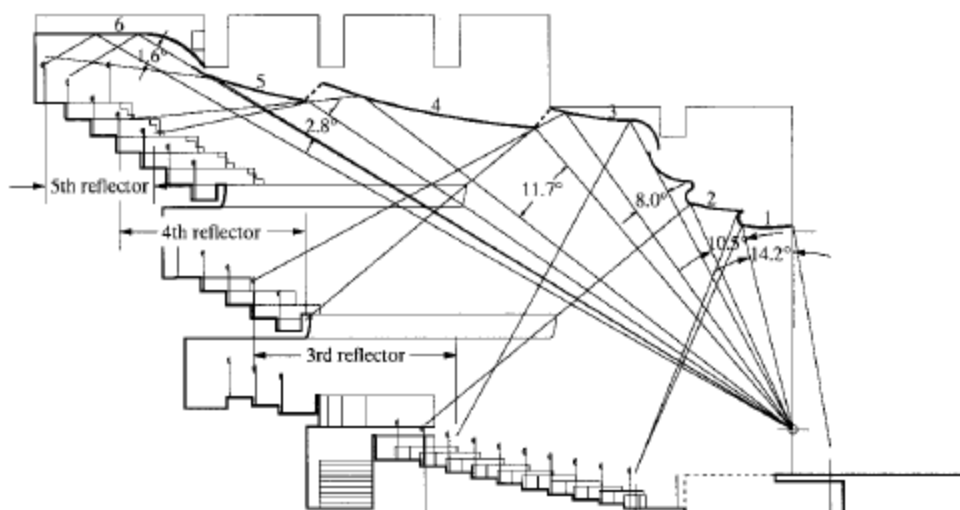
La présence de la coupole dans la mosquée, engendre le phénomène de focalisation, qui produit une concentration de l'énergie sonore en une zone créant des sensations d'écho, « en conséquence toute forme concave doit impérativement être traitée avec des matériaux absorbants ou diffusants » (Hamayon .L. 2013) voir schéma planche 4.27.

L'étude géométrique permet également de déceler la présence de l'écho franc. Ce dernier est lié à une différence temporelle entre le son direct et le son réfléchi, cette différence doit être limité à 35 millisecondes ce qui correspond à une différence de parcours de 12 mètres (Hamayon .L..2013).

Le dessin du tracé géométrique des ondes sonores, sont illustrés sur le profil en coupe de deux théâtres (planche 4.28). On remarque que cette méthode permet de détecter certains défauts liés à la forme du plafond et des murs, ainsi l'architecte a défini l'emplacement des réflecteurs au plafond dans le but de diriger les ondes sonore directement vers les gradins.



Etude de l'acoustique géométrique d'un théâtre, le tracé des premières réflexions sont dessinées sur deux représentations en coupe du théâtre. (Kleiner,M ; et al 2010)



Etude de l'acoustique géométrique du théâtre de Thessaloniki en Grèce, le tracé des premières réflexions ont permis l'installation des réflecteurs au plafond pour optimiser la distributions des ondes sonores sur l'ensemble de l'auditoire . (Kleiner,M ; et al 2010)

Planche4.28 : Etude de l'acoustique géométrique, représentée sur le profil de deux théâtres.

La planche 4.29, comporte une illustration en coupe de la mosquée Ibn-Arabi avec une représentation du tracé des ondes sonores en partant de la position de l'imam vers la salle de prière. On remarque sous la coupole la concentration des rayons sonores donc présence de focalisation. Dans l'espace sous la mezzanine le tracé des ondes sonores dénote la présence d'un écho franc à dix mètres de la source, puisque la différence de parcours entre l'onde acoustique directe et les diverses ondes réfléchies est supérieure à 12 mètres.

Dans le schéma suivant, on procède à une modification de la géométrie du plafond, afin de réduire le parcours des ondes sonores réfléchies, on pourra d'autre part atténuer le champ de ces réflexions en disposant sur le plafond des matériaux absorbants.

### C. Calcul du temps de réverbération.

Le calcul de la durée de réverbération selon Sabine est définis par la formule suivante :

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

Dans un espace constitué de plusieurs surfaces  $S_i$  présentant respectivement des coefficients d'absorption moyens  $\alpha_i$ , l'hypothèse proposée par Sabine conduit à évaluer l'absorption de l'espace à partir de la somme arithmétique des produits  $S_i \cdot \alpha_i$  (Jouhaneau.J.,2003). La formule prendra la forme suivante :  $Tr = 0.16 \frac{V}{\sum S_i \alpha_i}$ . L'architecte pourra effectuer le calcul de la durée de réverbération directement sur des sites internet dédiés à l'acoustique des salles.

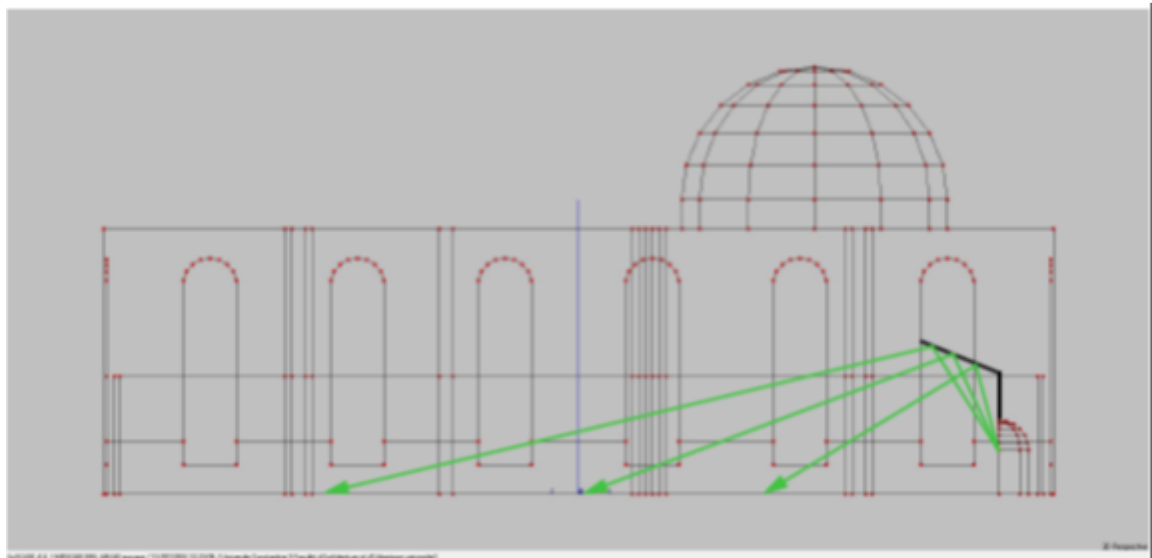
Plusieurs auteurs ont définis une durée de réverbération optimale, elle est fonction de l'activité sonore et du volume de l'espace. L'abaque de la (planche 4.30), permet de définir le Tr en fonction du volume pour les fréquences mediums. On peut également définir le Tr en utilisant la formule approximative  $Tr_{(opt.à 500Hz)} = a \log V$  avec  $a = 0.28$  pour la parole et  $a = 0.35$  pour la musique. Dans le but de définir le Tr aux autres fréquences, on peut adopter le critère suivant (Delétré,J.J.,2003) :

$$Tr \text{ à } 125 \text{ Hz} = Tr \text{ à } 500 \text{ Hz} \text{ diminué de } 10 \text{ à } 20 \%$$

$$Tr \text{ à } 4000 \text{ Hz} = Tr \text{ à } 500 \text{ Hz} \text{ majoré de } 10 \text{ à } 20 \%$$

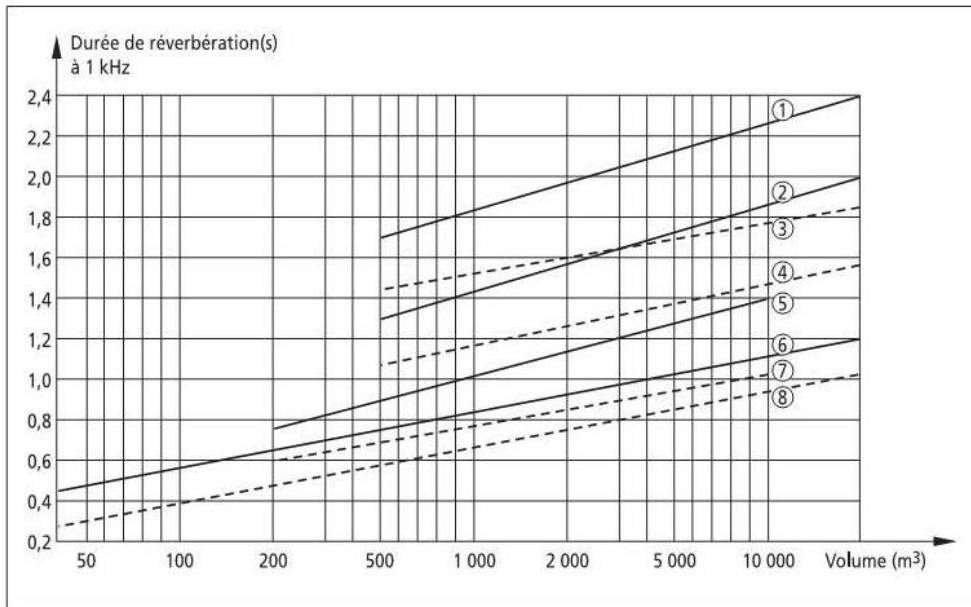


Le tracé des ondes sonores à partir de la source, dénote une concentration des ondes sonores sous la coupole, donc présence de focalisation.



On a procédé sur ce schéma à une modification de la forme du plafond au-dessus de la source pour réduire le parcours des ondes sonores réfléchis et les diriger vers l'audience.

Planche 4.29 : étude géométrique de la mosquée Ibn-Arabi. Avec des modifications correctives. (auteur)



① Orgue, audition directe. Musique symphonique, audition directe. ③ Orgue, enregistrement. ④ Opéra, audition directe. ⑤ Jazz et musique de chambre, audition directe. ⑥ Parole, audition directe. ⑦ Parole, enregistrement. ⑧ Variétés, enregistrement.

Planche 4.30 : Abaque des durées de réverbération préconisées pour les différentes activités, en fonction du volume de l'espace. (Jouhaneau, J., 2014)

#### **D. Calcul du volume acoustique.**

La détermination d'un volume adapté à sa fonction, est nécessaire pour tout projet architectural. Concernant les espaces destinés à la communication, l'architecte doit déterminer pour chaque projet le volume acoustique minimal par auditeur. Le calcul de ce critère important pour répondre aux conditions acoustique et d'hygiènes, repose sur la même formule de Sabine utilisée pour le calcul du Tr.

La formule de Sabine pour le calcul du Tr est :  $Tr=0.16 \frac{V}{A}$ . Cette formule peut s'écrire

$$V=\frac{A.Tr}{0.16} .$$

En appliquant cette formule afin de déterminer le volume acoustique de la mosquée Ennour. On aura : A l'aire d'absorption équivalente d'un auditeur égale à 0.5 m<sup>2</sup> (Hamayon .L., 2013) le Tr optimal de la mosquée était de 0.9 s<sup>31</sup>.

$$\text{Donc } V=\frac{0.5 \cdot 0.9}{0.16} = 2.8 \text{ m}^3$$

La surface au sol de la mosquée étant égale à 15. 15 = 225 m<sup>2</sup>. En divisant cette surface par 0.8 m<sup>2</sup> qui est l'aire occupée par une personne qui prie. On aura 225/ 0.8 = 281, ainsi la mosquée sera occupée par 281 fidèles. Afin de définir le volume acoustique minimale de la mosquée, on multiplie le nombre de fidèle par le volume acoustique minimale pour chaque fidèle on aura, 281. 2.8 = 276.8 m<sup>3</sup>. Ainsi pour cette mosquée le volume minimale à affecter à la salle de prière sera de 276.8 m<sup>3</sup>. L'architecte devra entreprendre le même calcul pour la salle de prière destiné aux femmes, ensuite additionner les valeurs des deux volumes.

#### **4.6.3. Eléments architecturaux fondamentaux dans la mosquée**

En nous basant, sur les résultats de l'étude de simulation acoustique des deux mosquées, ainsi que sur les conclusions des recherches entreprises sur les mosquées, nos recommandations porteront sur différents composants architecturaux. On débutera notre présentation par l'espace de la salle de prière.

##### **A. La salle de prière.**

Il est recommandé de choisir pour la salle de prière, une forme orthogonale proche du carrée En évitant autant que possible les formes concaves et les formes rectangulaire avec deux longs

---

<sup>31</sup> Voir les résultats de la simulation acoustique du chapitre 3.

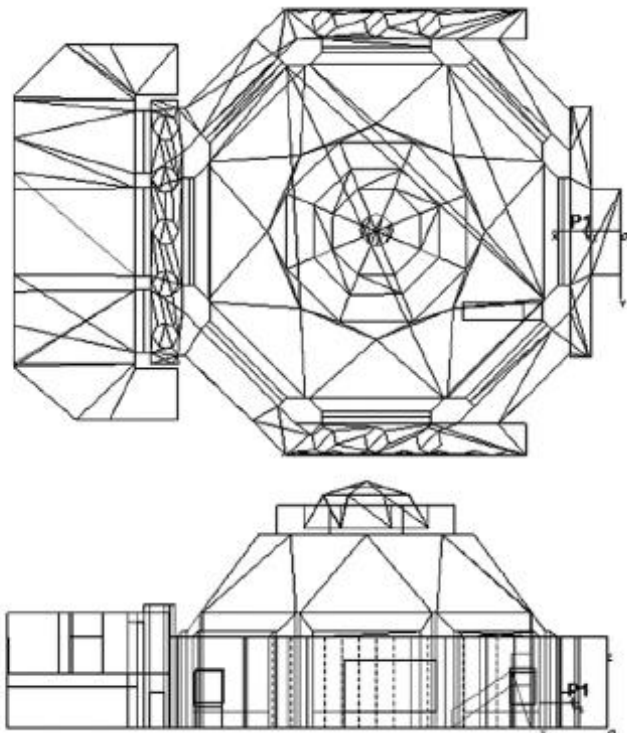
murs parallèles. Les espaces possédant un grand nombre de poteaux sont aussi à proscrire. La composition spatiale de la mosquée Ennour peut mieux répondre aux exigences acoustiques, notamment pour le nombre réduit des poteaux. Cette conception s'inspire de la typologie des mosquées Ottomanes (construites par Sinan). Elle se compose d'une grande salle couverte par une seule grande coupole supportée par quatre poteaux, entourée d'une travée sur deux, trois ou quatre cotés. (Planche 4.31) Cette typologie peut s'adapter aux petites moyennes ou grandes mosquées en modulant la dimension de la travée centrale supportant la coupole ainsi que la dimension des travées entourant la coupole. Nous proposons dans la (planche 4.32), différentes configurations spatiales inspirées de cette typologie.

### **B. Le mur de la qibla.**

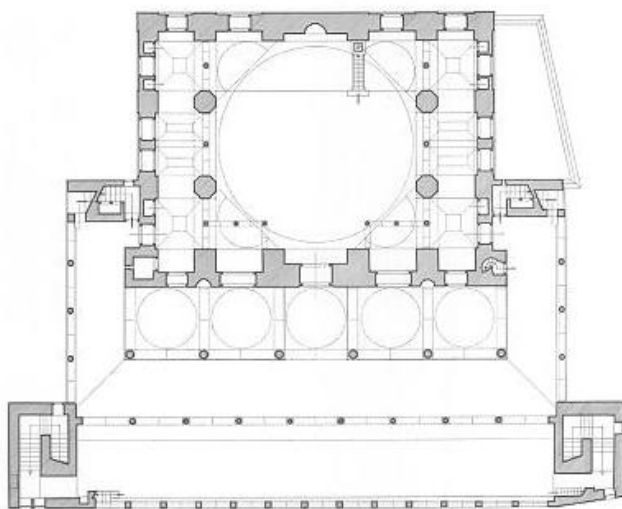
Le mur de la qibla est le mur le plus proche de la source, il doit donc aider à la diffusion et la distribution du son à l'ensemble de l'auditoire. Cette fonction peut se concrétiser en évitant les surfaces lisses comme le marbre ou la faïence. On présente sur la planche 4.33, différents motifs décoratifs de mosquées, travaillés sur du bois ou du plâtre, pouvant servir de diffuseur. La technique de diffusion consiste à recouvrir le mur d'une surface très irrégulière comme illustré sur la (planche 4.33). Ce panneau acoustique diffuseur est constitué de diverses couches ayant chacune pour but de casser les ondes d'une certaine bande de fréquences. Les surfaces étendues (dizaines de mètres), ont un effet sur la diffusion des basses fréquences ; les surfaces plus petites (dizaines de centimètres) ont une influence sur les fréquences moyennes et les surfaces encore plus petites (dizaines de millimètres) agissent sur les hautes fréquences.

Le principe de ces panneaux peut être réalisé dans différentes formes de motifs en bois ou des moulures en plâtre (planche 4.33), adapté à la décoration et au design esthétique de la mosquée. A cet effet il est possible de s'inspirer du patrimoine architectural islamique, qui est très riche dans le domaine de la décoration réalisée sur bois ou sur stuc. On peut notamment citer, les diverses formations géométriques de la décoration connu sous l'appellation de « mouquarnassat », qui peut parfaitement répondre au principe de la diffusion acoustique.

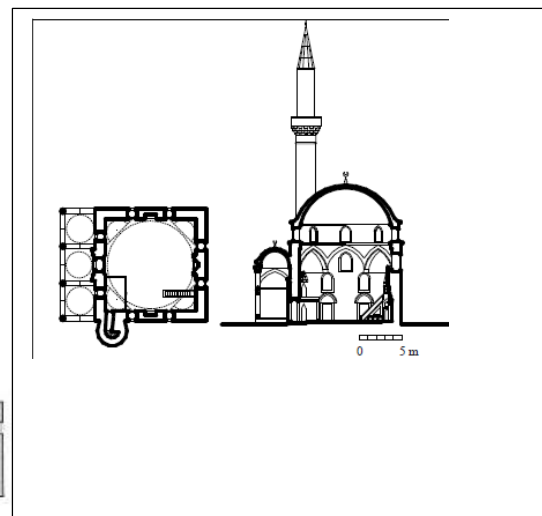




Vue en plan et élévation de la mosquée Dogramacizade Ali Pasa à Ankara. Mosquée contemporaine inspirée des mosquées ottomane, son plan en octogone s'inscrit dans un carré de 22 m de côté. La forme du volume, de la coupole, ainsi que les matériaux choisis répondent aux exigences du confort acoustique.

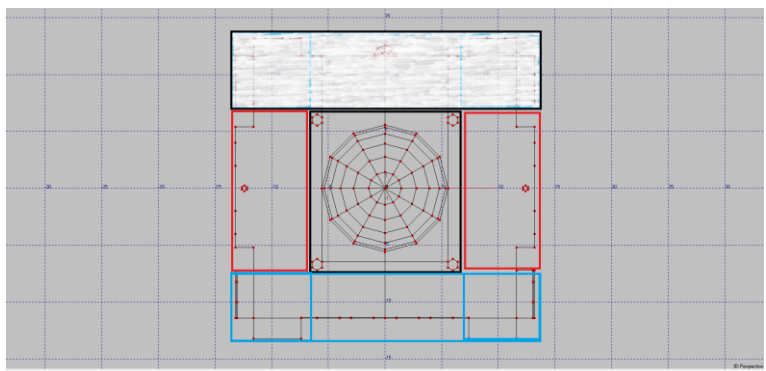
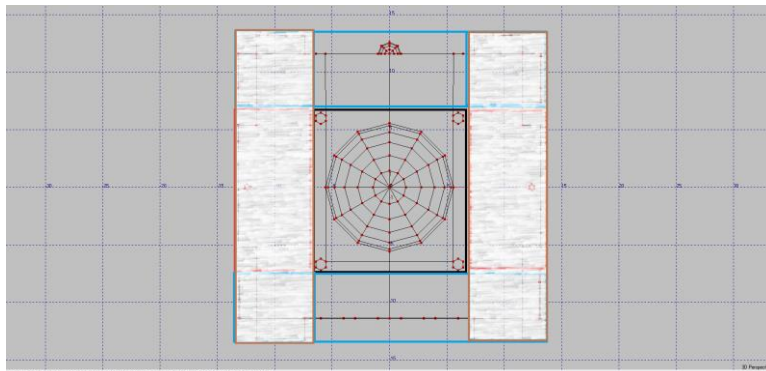
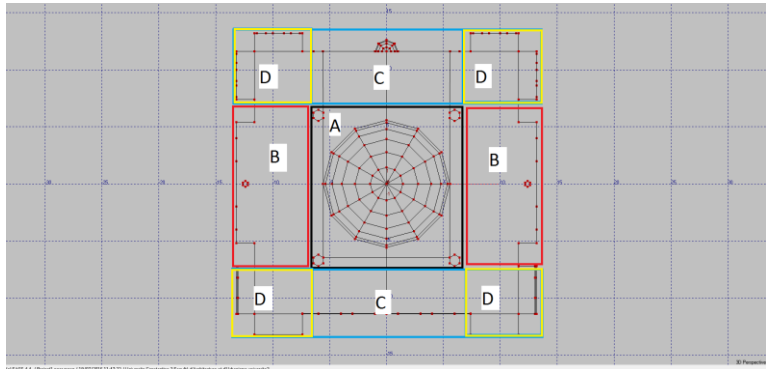
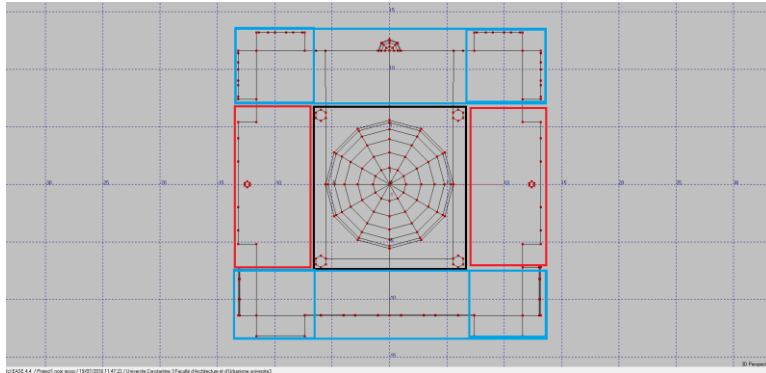


Vue en plan de la mosquée ancienne Rustum pasa à Ankara , comprenant deux travées latérales et une travée en galerie pour l'entrée.



Plan et élévation de la mosquée Karadžozbrg en Bosnie, comportant une seule travée d'entrée en galerie.

Planche 4.31 : plan et élévation de mosquées conçues sous forme d'une grande salle de prière avec coupole. (Zuhre,U , et al ,2007)



Décomposition de l'espace de la salle de prière en neuf unités spatiales pouvant être modulées en fonction de la taille de la mosquée.

Les unités spatiales sont :

A : travée centrale à coupole

B : les deux travées latérales perpendiculaires à la qibla

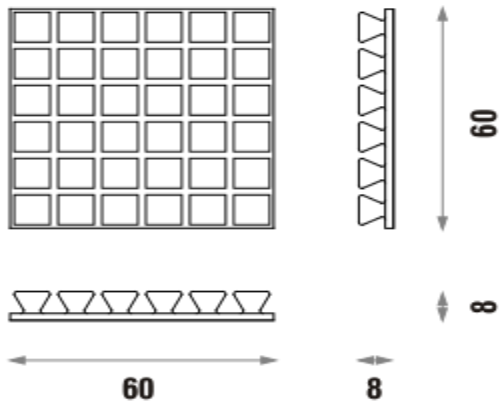
C : les deux travées latérales parallèles à la qibla

D : les travées des angles.

Proposition 1 : composition avec suppression de l'ensemble des travées B et D.

Proposition 2 : composition avec suppression d'une travée C et deux travées d'angles D.

Planche 4.32 : différentes configurations spatiales, pour répondre aux exigences du confort acoustique. (Auteur)

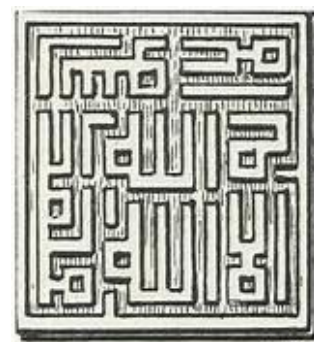
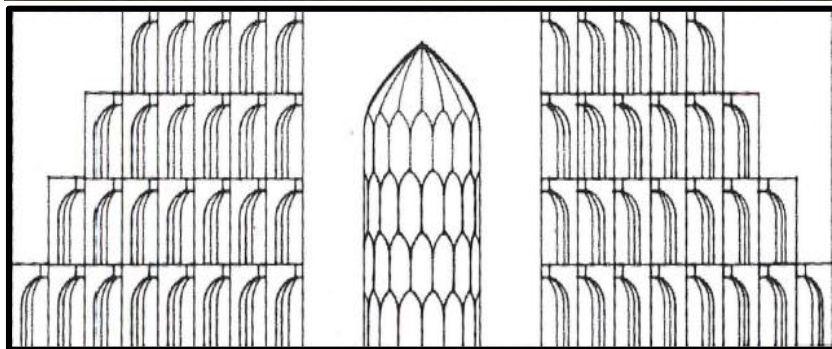


Dessin en plan et en profil d'un panneau acoustique diffuseur composé d'une seule couche de 8 cm d'épaisseur. [www.audiosonica.com](http://www.audiosonica.com)

Figure représentant un panneau acoustique diffuseur en couches. [www.audiosonica.com](http://www.audiosonica.com)



Décoration sur panneaux en bois pouvant servir de diffuseurs acoustiques. (Salle de prière de la grande mosquée de Baghdâd.)



Diffuseurs acoustiques sous forme de motifs décoratifs en moulure de plâtre, en forme curviligne (*muqarnassat*) et en inscription calligraphique. [www.cemaroc.com](http://www.cemaroc.com)

Planche 4.33 : différentes figures représentant des panneaux acoustiques diffuseurs en bois et en plâtre.

### **C. La mezzanine.**

La mezzanine est un étage ouvert sur l'espace de la salle de prière, conçu en tant qu'espace de prière pour les femmes ou bien comme espace supplémentaire pour les hommes ; dans ce cas l'architecte conçoit pour les femmes un espace distinct dans un étage, ou un entresol. . La mezzanine peut donc couvrir une partie de la salle de prière (homme), dans les deux exemples de mosquées étudiées, chaque mosquée possède un type de mezzanine (planche 4.34). On a pu constater suite à l'étude de simulation acoustique, les problèmes acoustiques générés par la mezzanine en particulier dans la mosquée Ibn-Arabi dont la mezzanine est ouverte sur deux espaces à l'avant et à l'arrière de la mosquée. Afin de remédier à ce problème, on présente nos propositions conceptuelles, sur la planche 4.34, sous forme de configurations spatiale en plan et en coupe. La proposition 1, est formée d'une salle de prière avec coupole centrale supportée par quatre poteaux avec l'espace de la mezzanine en porte à faux sur la salle de prière à l'intérieure, à l'extérieur la mezzanine pourra reposer sur une galerie ou tout autre espace de la mosquée.

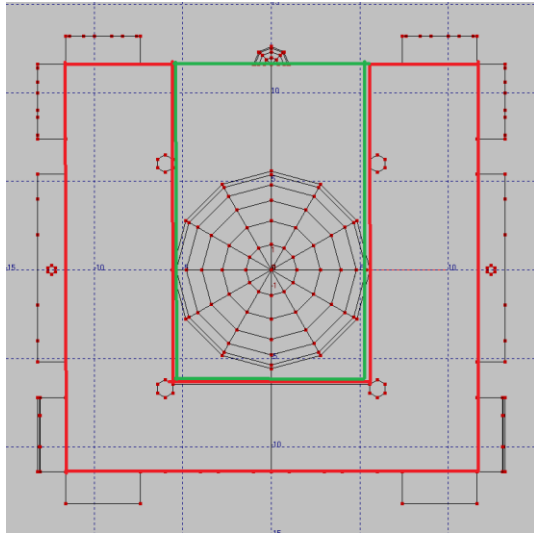
La proposition 2 est formée avec la même salle de prière (que la proposition 1) la mezzanine par contre sera totalement supportée par la galerie extérieure ou tout autre espace prévu dans la mosquée. Notre objectif étant de dégager partiellement ou complètement le volume de la salle de prière, tout en contribuant à réduire le nombre de poteaux.

### **D. La coupole**

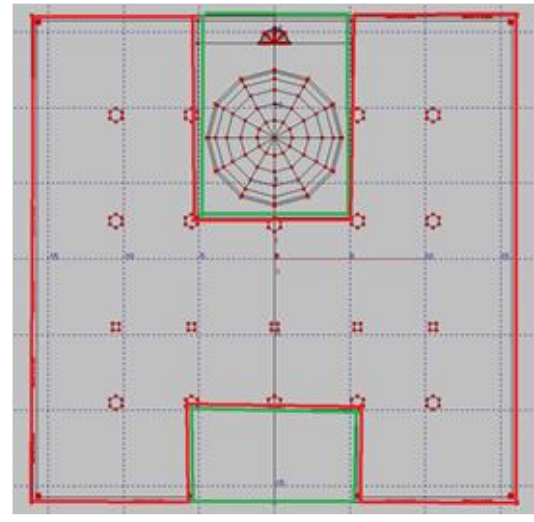
La coupole dans la mosquée, constitue un composant architectural qu'il est nécessaire de traiter par des matériaux absorbants ou diffusants afin de réduire l'effet de focalisation qui contribue à accroître la durée de réverbération. (Planche 4.27)

Un exemple de coupole avec un traitement de matériaux diffusants est illustré dans le schéma de la (planche 4.35), dont la coupole a été traitée par des moulures en plâtre sous forme de *muquarnasat*. Ce type de décoration peut constituer un excellent traitement pouvant aider à la diffusion des ondes sonores. On note également l'épure géométrique intérieure de la coupole qui n'est pas concave mais conique, ce qui favorise la distribution du son en évitant la focalisation provoquée par les formes concaves.

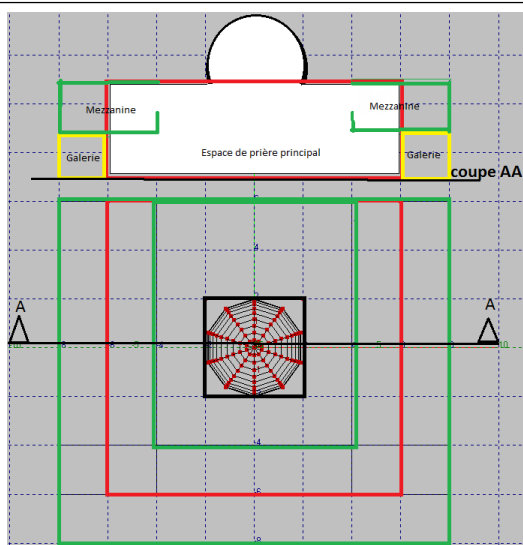
Concernant le traitement par des matériaux absorbant, on donne l'exemple du traitement de la voûte du musée d'Orsay à Paris. Cette dernière a été recouverte par des panneaux confectionnés pour absorber la gamme des fréquences basses (les sons graves).



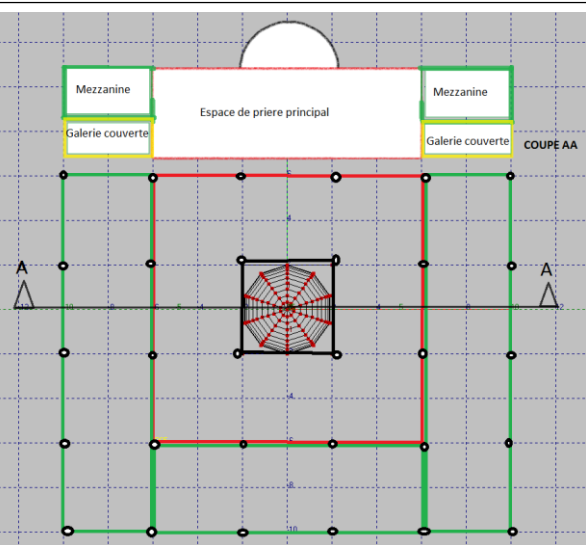
Vue en plan de la mosquée Ennour, la forme de la mezzanine est représentée en rouge sous forme de U. Le rectangle en vert représente l'ouverture de la mezzanine sur la salle de prière principale située au rez-de-chaussée.



Vue en plan de la mosquée Ibn-Arabi, la forme de la mezzanine est représentée en rouge sous forme de H. Les deux rectangles en vert représentent l'ouverture de la mezzanine sur la salle de prière principale située au rez-de-chaussée.

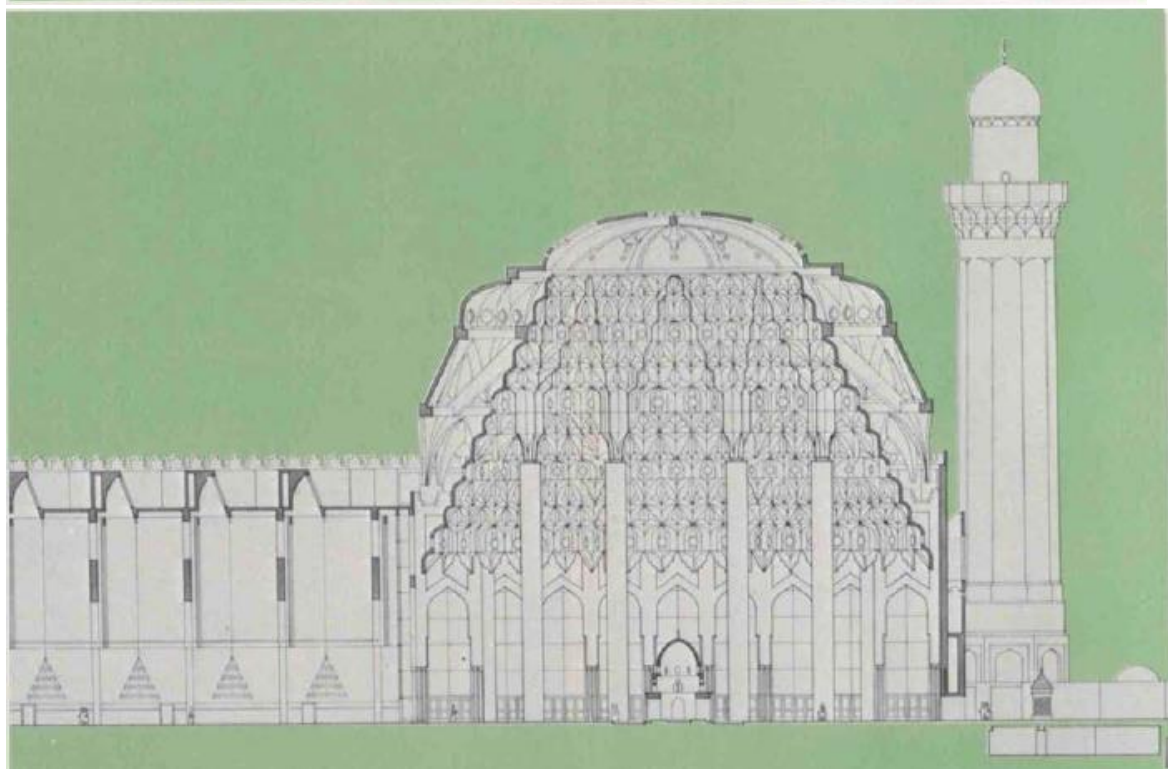
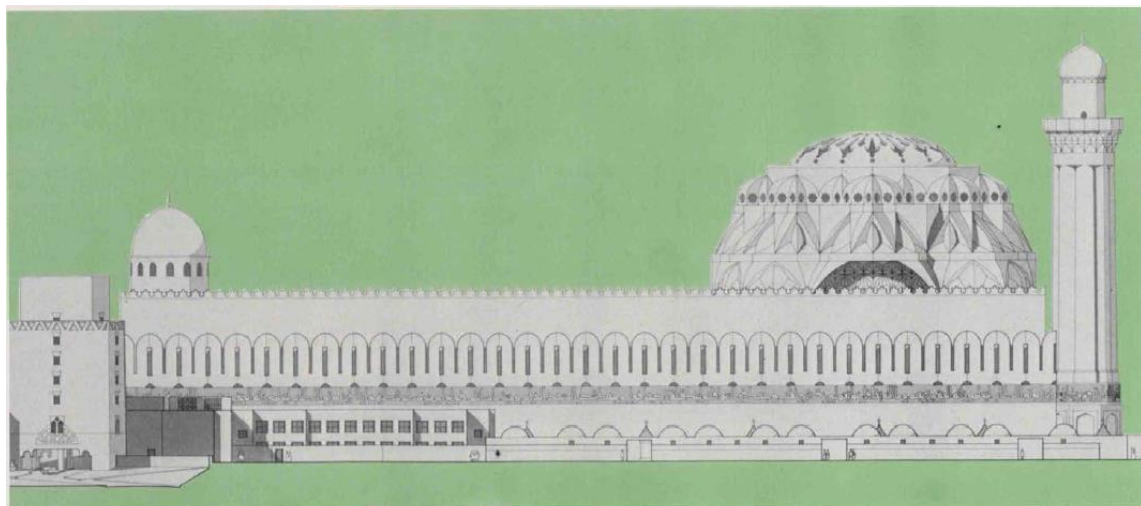


Proposition 1 : espace de prière principal avec volume dégagé et l'espace de la mezzanine en porte à faux sur la salle de prière à l'intérieur et la galerie à l'extérieur.



Proposition 2 : espace de prière principal avec volume totalement dégagé surmonté d'une coupole supportée par quatre poteaux. L'espace de la mezzanine recouvre la galerie à l'extérieur.

Planche 4.34 : propositions concernant la conception de la mezzanine dans le but de dégager le volume de l'espace de prière principal et réduire le nombre de poteaux.

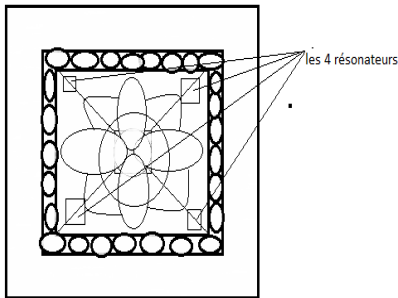
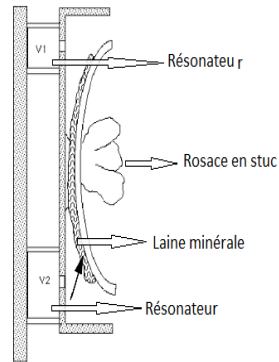


Façade et coupe de la mosquée conçue par les architectes Venturi, Rauch and Scott Brown en 1983 pour le concours de la « State Mosque Competition Baghdad, Iraq » la conception de la coupole présente plusieurs avantages acoustiques. Sa forme intérieure en cône favorise la distribution des ondes sonores et la décoration en relief aide à la diffusion du son.

Planche 4.35 : vue et coupe de la mosquée conçue par Venturi dans le cadre d'un concours d'architecture.



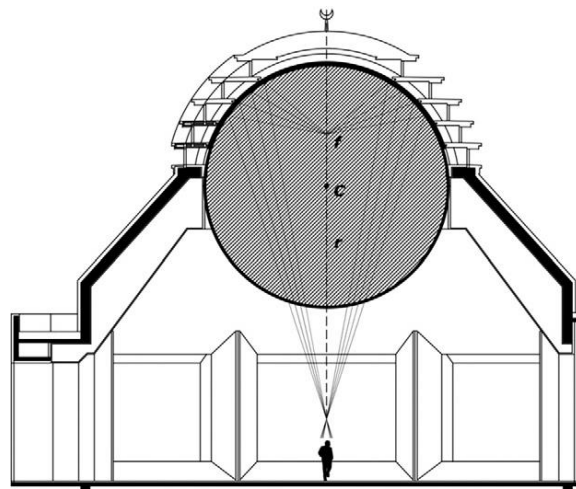
coupe sur le résonateur



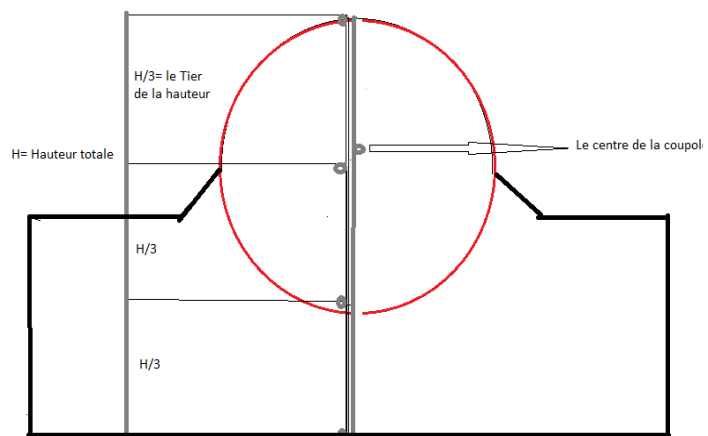
Vue en plan du résonateur

Vue en plan du résonateur, avec la rosace au milieu et quatre trous de tailles différentes pour absorber les fréquences mediums, aigus et graves.

Vue intérieure de la nef du musée d'Orsay à Paris recouvert de 400 résonateurs cachés derrière des rosaces en stuc. (Les cahiers techniques du bâtiment n°98 avril 1988 p80)



La coupe ci – dessus propose de placer le centre de la coupole au-dessus des deux tiers de la hauteur totale. Le respect de ces proportions contribue à placer le point focal au-dessus d'une personne en position debout. (source : référence 78)



Ci-dessus schéma explicatif des rapports

Planche 4.36 : schéma descriptif d'un panneau absorbant et de rapports proportionnels pour le traitement de la coupole

Ce panneau est doté de quatre résonateurs cachés derrière des rosaces en stuc, il constitue un exemple intéressant à reproduire dans des mosquées, du fait qu'il intègre des éléments absorbants à un motif décoratif. Le schéma de principe de ce panneau est représenté sur la (planche 4.36).

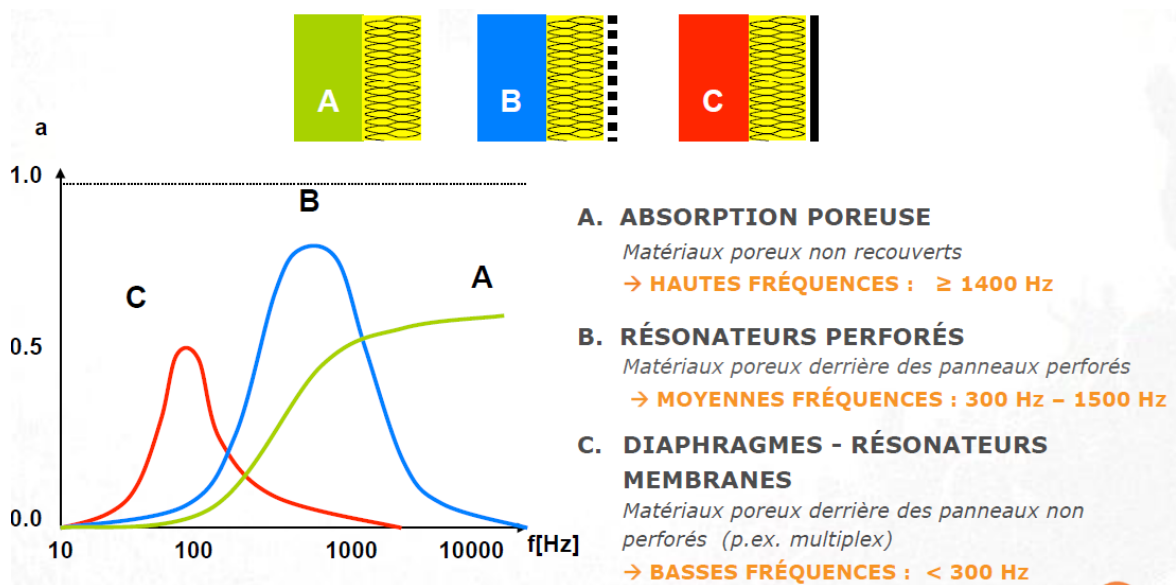
#### **E. Les matériaux de finitions.**

Le choix des matériaux de finition est primordial en vue de réaliser un confort acoustique dans la mosquée. Les matériaux absorbants sont classés en trois catégories, en fonction du type de fréquences que l'on voudrait absorber. Sans entrer dans un exposé détaillé de ces matériaux le schéma de la (planche 4.37) présente un résumé de leurs caractéristiques. La catégorie de matériaux recommandés pour les mosquées est essentiellement les résonateurs préconisés pour les fréquences médiums propre à la parole. Il est également important de pouvoir intégrer le matériau choisi à la décoration de la mosquée. On présentera donc différents exemples de matériaux ordinaire (bois, plâtre, béton) qui selon leurs caractéristiques de conception ou de mise en œuvre, peuvent constituer des matériaux absorbants.

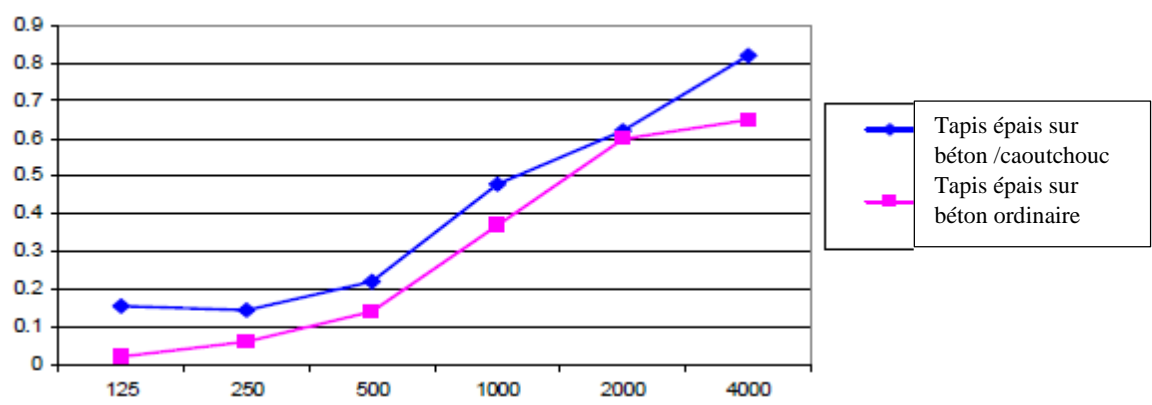
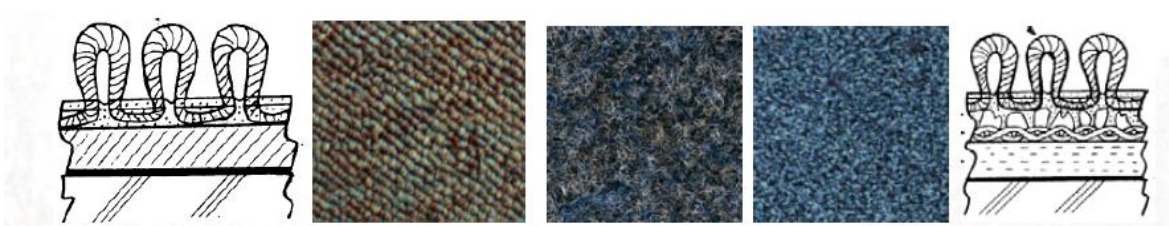
Le matériau qui constitue un atout important à mettre en valeur par un choix judicieux est bien sur le tapis qui recouvre le sol. Ce dernier appartient à la catégorie A des matériaux poreux pour l'absorption des hautes fréquences, le choix d'un tapis avec une sous face en caoutchouc plus épaisse contribue à augmenter l'absorption du tapis. En plus du choix du tapis, le choix du matériau de revêtement de la surface du sol est également important. On recommande de remplacer la chape de béton ordinaire par une chape constituée d'un béton mélangé à des granulats de caoutchouc, dans le but d'accroître l'absorption par le sol. (Planche 4.37).

La nature des matériaux absorbants pour les moyennes et basses fréquences que l'on peut adapter au traitement intérieur des mosquées sont essentiellement le plâtre sculpté ou moulé et le contreplaqué en MDF ou en aggloméré. On peut également utiliser le béton la brique ou la pierre, car tout matériau peut selon ses caractéristiques de conception ou de mise en œuvre devenir un matériau absorbant. On présentera quelques exemples de mises en œuvre de matériaux absorbants que l'architecte pourra utiliser ou s'en inspirer pour concevoir des types de matériaux absorbants appropriés à ses besoins.





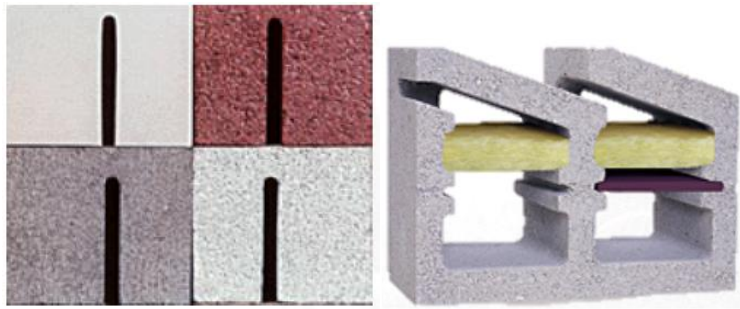
Graphe représentant les coefficients d'absorptions des trois catégories de matériaux absorbants A, B et C. en fonction des fréquences hautes, moyennes et basses. (Source : PDF Formation 2013 Bâtiment Durable, Acoustique. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement)



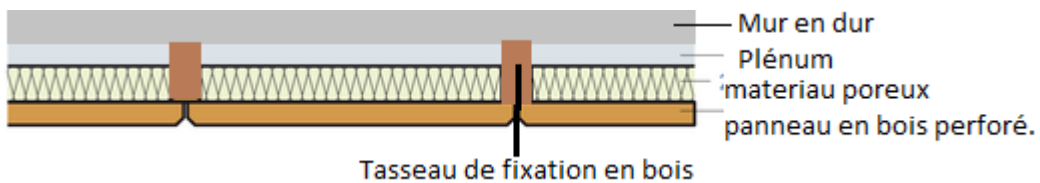
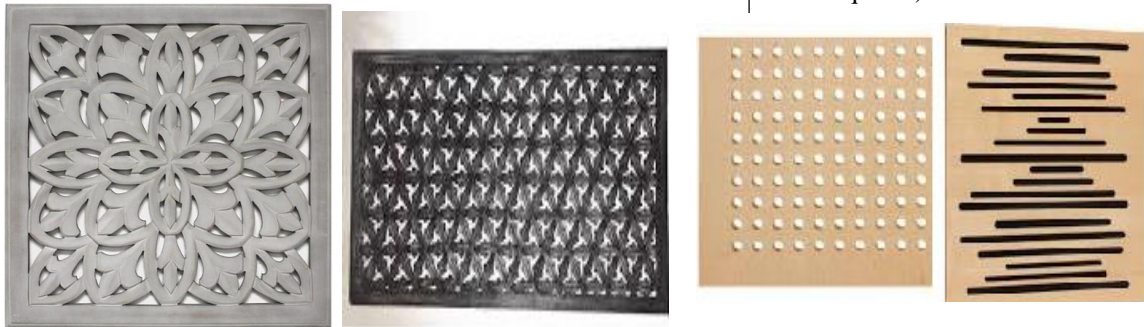
Graphe illustrant les coefficients d'absorption en fonction des fréquences, d'un tapis posé sur un sol en béton avec des granulats de caoutchouc (en bleu), et un tapis posé sur un sol en béton ordinaire (en rose). On remarque que les valeurs du coefficient d'absorption de la courbe bleu sont plus élevés donc plus absorbants. (Orfali.W.,2000)

Planche 4.37 : des exemples de matériaux pour absorption des hautes fréquences, propre à la catégorie des matériaux poreux.

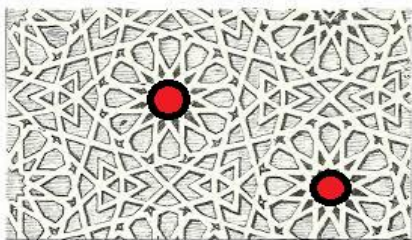
Le principe de mise en œuvre de ces matériaux comme cela est illustré sur le schéma de la (planche 4.38), repose sur l'association d'un matériau poreux comme la laine minérale, d'un panneau perforé ou non dans différents matériaux comme le béton le bois ou le plâtre avec un plénum (lame d'air) pour accroître l'effet absorbant. Nous présentons les trois types de panneaux acoustiques (de la catégorie B) composée dans des matériaux différents. Le béton pour le type 1, le bois pour le type 2 et le plâtre pour le type 3.



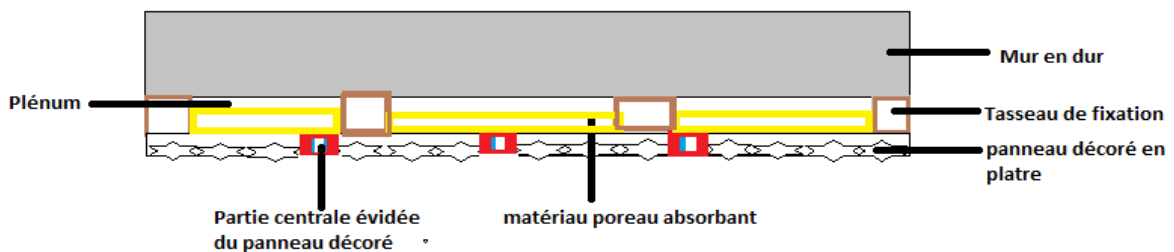
Type 1 de matériau acoustique en bloc de béton, évidé à l'intérieur muni d'une fente sur sa face extérieure. Différents type de matériaux poreux sont fixés à l'intérieur du bloc pour absorber les ondes sonores qui entrent par les fentes. (Source: <http://www.leslie-acoustique.fr/>)



Type 2 de panneau acoustique en bois ajouré avec motif décoratif en arabesque ou simple. Le matériau poreux est collé au panneau ajouré qui est fixé au mur par des tasseaux en bois, une lame d'air est laissée derrière le panneau. (source :auteur)



Décoration en plâtre avec relief de la mosquée El-Haram à la Mecque (photo 2016)



Type 3 de panneau acoustique en plâtre décoré, munis de résonateurs (creux en rouge), composé d'un matériau poreux et d'une lame d'air. (Auteur)

Planche 4.38 : illustration avec détails de mise en œuvre des trois types de panneaux acoustiques décoratifs pour les mosquées.

#### **4.6.4. Mise en œuvre et dimensionnement des matériaux absorbants.**

Les matériaux absorbants seront fixés aux parois verticales (murs, poteaux) ainsi qu'au niveau du plafond. Concernant les parois verticales, il est recommandé de les fixer au-dessus de 1 mètre, afin de les préserver d'une éventuelle détérioration. Leur fixation au plafond se fera comme un faux plafond ordinaire. La mise en place des matériaux absorbants dans la salle de prière de la mosquée, (planche 4.39) se fera selon certains principes :

- 1) Eviter de placer les absorbants au plafond et sur les parois proche de l'imam pour favoriser les premières réflexions, au moins les premières cinq mètres.
- 2) Traiter les murs latéraux et le plafond situés vers le fond de la salle de prière et essentiellement le mur du fond de la salle.
- 3) Dans le but de donner une estimation de la surface que l'architecte doit traiter par des matériaux absorbants, en l'absence de réglementation spécifique à la mosquée, on a pris comme référence la réglementation française concernant les établissements d'enseignements ; dont la fonction d'écoute est assez proche des mosquées. « la réglementation demande que l'aire d'absorption équivalente moyenne (c'est-à-dire la moyenne arithmétique des aires d'absorption équivalente soit  $A_m$ ), dans les intervalles d'octave centrés sur 500,1000 et 2000Hz soit supérieure ou égale aux deux tiers de la surface au sol du local considéré  $A_m \geq 2/3 S_{sol}$  » (Hamayon .L., 1996).
- 4) Dans le but d'aider l'architecte à choisir le type de matériaux absorbant le plus performant d'un point de vue acoustique, on a sélectionné dans le tableau de la (planche 4.40) quelques matériaux en fonction de leurs coefficients alpha sabine moyen pour les fréquences moyennes propre au discours parlé.

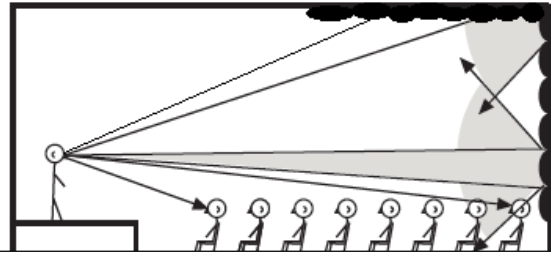
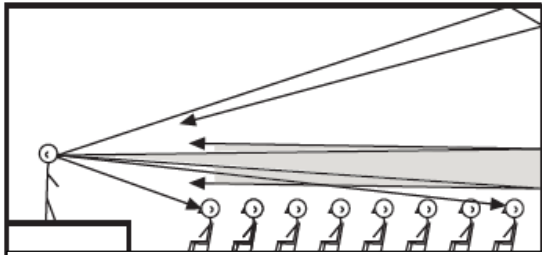


Schéma illustrant les ondes sonores réfléchies sur un auditoire, la position des absorbants vers le fond de la salle a permis de réduire le champ des réflexions et donc l'effet d'écho. (Kleiner, M ; et al 2010)

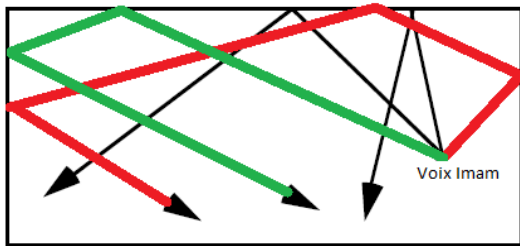
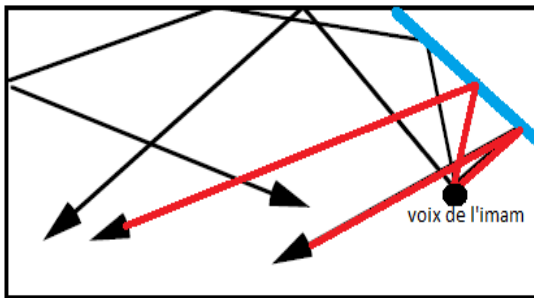
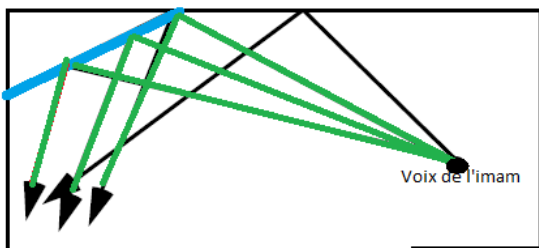


Schéma illustrant la réflexion des ondes sonores sur le plafond proche de l'imam en rouge et sur le plafond éloigné et le mur du fond en vert.

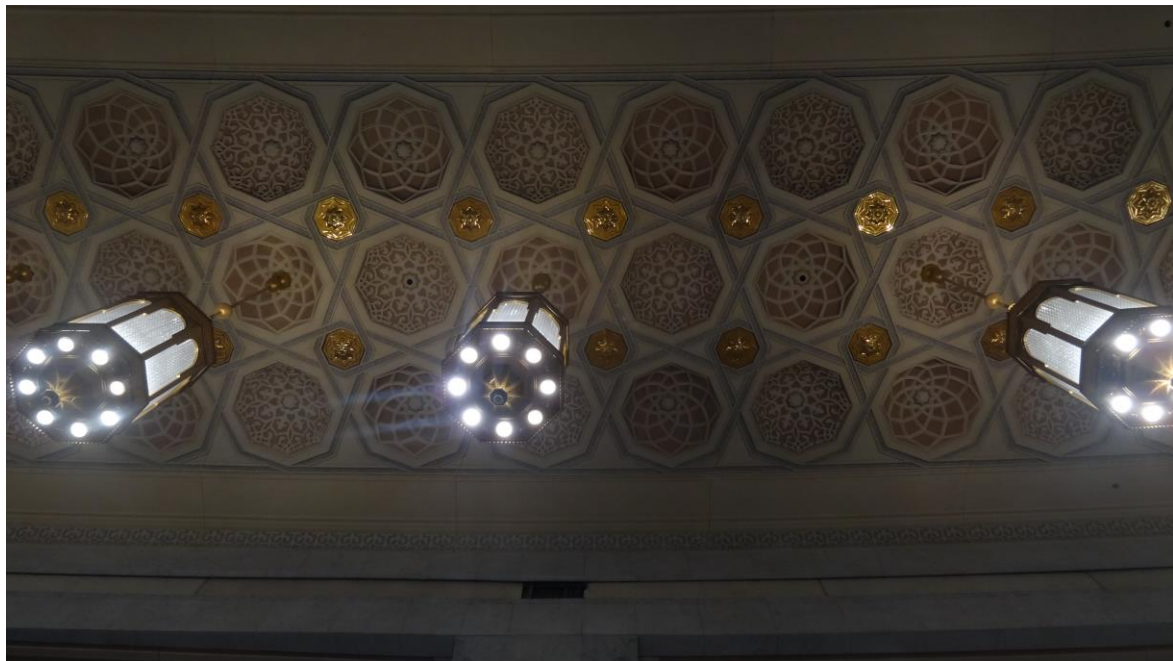


Dans le but de favoriser les premières réflexions et les diriger vers l'auditoire on adopte une forme inclinée au-dessus de la source (voix de l'imam). Cela peut être matérialisé par la forme du Mihrab comme c'est illustré sur la photo d'une mosquée contemporaine à Istanbul en Turquie « la mosquée Sakirin »



Pour réduire le champ des réflexions tardives il est recommandé d'adopter une forme de plafond incliné ou réflecteurs au fond de la salle, la photo d'une mosquée en Malaisie associe une décoration florale moderne à une forme incurvée pouvant servir de réflecteur.

Planche 4.39 : différentes mise en place de forme et de matériaux absorbants.



Décoration de plâtre en relief comprenant des parties en métal doré pouvant être conçues sous forme de résonateurs. (Photo de la mosquée El-Haram à la Mecque 2016)

Tableau des diverses valeurs des coefficients d'absorption des matériaux acoustiques.

Type de matériau absorbant	Coefficient d'absorption $\alpha$ en fonction de la fréquence			
	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz
Panneau de particules de bois à évidement tubulaire comportant des fentes	0.90	0.90	0.80	0.73
Plafond en Plaques de plâtre avec 12% de perforation, plénum de 100mm et fibre minérale de 80mm.	0.92	0.91	0.72	0.60
Bloc de béton creux avec 3 fentes et avec laine minérale	0.96	0.65	0.77	0.49
Panneau perforé en MDF épaisseur 8mm avec 50mm de fibre minérale et 50mm de plénum	0.7	0.9	0.95	0.85

(Hamayon .L.,1996.)

Planche 4.40 : illustration en photos des matériaux acoustiques et des valeurs de leurs coefficients d'absorption.

## **CONCLUSION GENERALE.**

Notre travail a examiné un ensemble d'aspects en relation avec notre questionnement principal concernant les règles architecturales à mettre en œuvre pour la maîtrise de la qualité sonore dans les mosquées par l'outil de l'expérimentation. La problématique des ambiances architecturales nécessite une approche pluridisciplinaire, du fait de son rapport sensible au monde. On a été emmené à aborder la qualité sonore selon une démarche transversale définie par rapport à trois domaines disciplinaires celui de l'acoustique physique, celui de l'organisation spatiale et architecturale et enfin celui des besoins et exigences de l'utilisateur.

La richesse des concepts liés à ces trois champs disciplinaires est présente dans de nombreux travaux de recherche traitant des ambiances architecturales. Une première question a été de savoir comment aborder la complexité de l'interaction entre ces trois composants, par quels outils méthodologiques. Le développement des outils numériques en rapport avec les sciences de l'architecture et des ambiances architecturales, a permis d'intégrer les phénomènes physiques des ambiances dans les réflexions architecturales.

Ainsi il nous a été possible de constater que l'outil de l'expérimentation numérique a été validé dans de nombreux travaux de thèses traitant de la thématique des ambiances architecturale et urbaine. L'expérimentation sous forme de simulation et de mesure in-situ constitue un outil d'évaluation et de prédiction des phénomènes ambiants, l'évaluation subjective de ces phénomènes perçus requiert des outils empruntés aux sciences sociales, on a ainsi opté pour les deux outils méthodologiques.

On a en outre spécifié trois outils d'investigation de notre objet d'étude, en relation avec l'espace de la mosquée, avec le concepteur de l'espace et enfin l'utilisateur de l'espace. Ceci étant les propositions de règles architecturales se fera par l'analyse des synergies entre ces trois procédures.

Dans le premier chapitre, en abordant la problématique des ambiances sonores en architecture, on a mis en évidence toute la complexité de la perception de la qualité acoustique suivant que l'on traite des aspects physiques, architecturaux ou encore perceptifs. Concrètement la complexité de la notion de qualité sonore, implique une pluridisciplinarité où « espace

architectural » et « usagers » se définissent mutuellement. De ce point de vue la caractérisation sonore de l'espace implique une évaluation objective mais également perceptive.

L'étude de la caractérisation de l'ambiance sonore d'un espace architectural, nous a dévoilé toute l'importance du domaine scientifique de « l'acoustique des salles » qui peut répondre aux attentes des architectes pour concevoir des projets ayant une fonction d'écoute. En prenant en compte les exigences acoustiques, l'architecte pourra assurer un confort sonore et une qualité d'écoute pour ses projets. On a également relevé la relation pertinente entre les spécificités fonctionnelles du projet architectural et les modes d'adaptation acoustiques. Les espaces architecturaux selon leur destination fonctionnelles requièrent des qualités acoustiques différentes.

On a également examiné la relation entre critères objectifs et perceptifs à travers le développement de plusieurs études scientifiques qui ont établi des relations, et corrélations entre ces critères, dans le but de créer une correspondance cohérente entre critères objectifs et impressions subjectives. La complexité de ce rapport vient du fait qu'elle oppose l'aspect quantitatif de la mesure à la caractérisation de l'auditeur, car ce qui est qualitatif n'est pas quantifiable. Il n'y a pas forcément une équivalence des propriétés qualitatives de l'objet et la façon dont l'individu les entend ; mais il y a là l'idée d'un rapport (Remy, N. ,2001).

Il est important de rappeler que tous ces travaux ont été effectués sur des salles de concert pour l'écoute de la musique, les critères perceptifs liés au facteur musique sont bien plus nombreux que le message parlé, pour d'étude des mosquées nous n'avons retenus que les critères perceptifs liés à l'appréciation de la parole. Ces descripteurs utilisés pour caractériser la qualité acoustique d'une salle issue de la réponse impulsionnelle sont définis par l'ISO 3382, pour décrire ceux qui sont pertinents pour les mosquées, on a mis en évidence les implications de ces phénomènes physique sur les attributs de l'espace architectural, en l'occurrence la forme, la géométrie et le volume de la salle, la nature de parois, murs, plafond, sol et autres aménagements de la salle.

Enfin la présentation détaillée des critères objectifs a été classés, en fonction des phénomènes physiques qu'ils permettent d'analyser, pour la caractérisation objective de l'espace architectural, ceci constitue un indicateur appréciable sur les relations qu'entretiennent les composants de l'espace architectural et architectonique avec l'évaluation des critères objectifs



en plus qu'il permet de fonder les bases de notre questionnaire destiné aux fidèles des mosquées investiguées.

Dans le deuxième chapitre. On a examiné l'ensemble des caractéristiques architecturales qui définissent la mosquée dans sa relation aux attributs des ambiances sonores. On a identifié les niveaux d'influences et d'échanges mutuels qui caractérisent les rapports, entre la mosquée en tant que projet architectural et le confort acoustique en tant que composante sonore.

Dans l'étude du contexte conceptuel, on a constaté que la conception des mosquées en Algérie souffre d'un manque de richesse et de créativité, les raisons de cet état de fait sont nombreuses, dont l'absence d'un cahier des charges spécifique à la construction des mosquées. En l'occurrence la formulation d'un cahier de charges est nécessaire pour favoriser un travail de création inspiré de notre patrimoine architectural et basé sur des concepts liés aux ambiances sonores.

Dans l'étude du rapport de la mosquée à la composante sonore, on a examiné les paramètres qui influencent le comportement des sons, dans le cadre des fonctions cultuelles de la mosquée, et mis en évidence les types d'exigences acoustiques à prendre en compte dans la conception des mosquées. Selon l'énoncé des fonctions de la mosquée on a relevé l'importance des choix conceptuels élaborés par l'architecte sur la qualité d'écoute et par conséquent sur le confort des fidèles. L'investigation des méthodes et outils d'assistance à la conception appliquée dans le champ des ambiances a permis de mettre en évidence, les apports et les potentialités de ces outils à s'adapter au processus de conception entrepris par les architectes. Dans le but d'évaluer, le potentiel d'assistance de ces méthodes, en tant qu'outil de référence pour les architectes, nous avons entrepris une enquête, dont les résultats ont permis de valider le type suggérés par les architectes, afin de promouvoir l'intégration de la composante acoustique au projet de conception des mosquées. Enfin l'étude de l'état de l'art a permis de sélectionner des valeurs préconisées de critères acoustiques spécifiques aux mosquées, en vue de les exploiter comme valeurs normatives dans l'étude expérimentale.

Dans le troisième chapitre, consacré à l'évaluation objective et perceptive de la qualité acoustique des mosquées. L'évaluation de la composante acoustique des mosquées, fait référence à deux éléments clé de l'espace, à savoir la taille du volume, certains choix conceptuels ainsi que la nature des matériaux, pour sélectionner notre corpus d'étude, on a entrepris une étude statistique sur l'ensemble des mosquées construites dans la wilaya de

Constantine, en prenant la taille de la mosquée comme critère de classement. Suite à ce choix, On a suivi un processus expérimental pour la caractérisation acoustique des mosquées choisies. Pour ce faire on a établi le protocole expérimental pour les deux méthodes d'évaluation, la simulation acoustique et la mesure in –situ. Cette étude expérimentale a permis de caractériser de façon scientifique et rigoureuse, la qualité acoustique des deux mosquées investiguées. On a ainsi pu établir les liens entre les composants de l'espace architecturale et la composante sonore, que l'on résume dans les points suivants :

- Les deux mosquées présentent un espace réverbérant, notamment aux emplacements situés sous la coupole et à l'arrière de la salle de prière. Ceci est dû d'une part à la nature réfléchissante des matériaux de finition (comme la faïence) et également à l'effet focalisant des composants de l'espace comme la coupole.
- La réverbération élevée a eu un impact sur les critères de clarté et de l'intelligibilité de la parole, qui étaient moyennes à faibles, avec des variations importantes entre les différentes positions des récepteurs. Les positions derrière les poteaux et à l'arrière de la salle de prière sont les plus critiques.
- L'espace de la mezzanine dans la mosquée est un composant qui réduit la hauteur du volume à certain emplacement, l'espace de prière possède ainsi une grande variation entre la hauteur de la coupole et l'espace sous la mezzanine. Ces emplacements critiques ont influencé les résultats des critères acoustiques simulés, en particulier le Tr 30 et l'EDT qui étaient assez élevés au niveau de ces positions de récepteurs.

Les rapports entre l'appréciation perceptive des fidèles et l'évaluation objective, a été validé pour certains critères acoustiques. On a relevé dans les réponses des fidèles et dans la simulation acoustique, une nette différence dans la clarté du message entre les premières et les dernières rangées. Par contre malgré les valeurs élevées de la durée de réverbération simulée pour les deux mosquées, la majorité des fidèles ont jugés l'écho acceptable. Enfin, même si nous constatons certains écarts entre les deux modes d'évaluations (perceptive et objective) on préconise de fonder notre travail de correction sur les résultats de l'étude de simulation acoustique.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'étude corrective ainsi que les propositions d'une plateforme d'aide pour les architectes en vue d'améliorer la qualité acoustique de nos mosquées, Nous avons opté pour une stratégie de correction spécifique à chaque mosquée, en

fonction des caractéristiques architecturales propres à chacune d'elle. Les particularités propres à chaque mosquée concernent les aspects liés au volume intérieur, à la disposition de la mezzanine, au nombre de poteaux ainsi qu'à la taille et la position de la coupole dans l'espace. En outre l'interprétation des résultats des critères acoustiques simulés, a orienté notre démarche de correction spécifique pour chaque mosquée, puisque les variations architecturales liées à la conception de l'espace intérieur ont induit des variations dans les résultats des principaux critères simulés.

Durant la première phase de correction on a traité les éléments architecturaux les plus problématiques comme la coupole pour les deux mosquées, le mur de la qibla pour la petite mosquée et le mur arrière pour la grande mosquée. La présence de la moquette dans les mosquées, offrait l'avantage d'un matériau absorbant de grande dimension facile à traiter. Au terme de cette première correction on a observé une amélioration des principaux critères acoustiques, néanmoins, l'analyse des résultats de simulation de ces critères en fonction des positions des récepteurs a permis de mettre en évidence des composants architecturaux qu'on pouvait réaménager pour apporter encore des améliorations acoustiques.

Ainsi pour la petite mosquée avec une grande coupole couvrant la majorité de l'espace, un deuxième traitement de la coupole par une reconstruction de ses proportions géométriques a permis d'apporter des améliorations acoustiques. Pour la grande mosquée par contre, où la coupole n'était pas dominante, on a procédé au traitement du plafond de la mezzanine, qui couvrait la majorité de l'espace et qui posait problème. Les résultats obtenus suite aux deux phases de corrections pour les deux mosquées, ont donné des résultats satisfaisants pour tous les critères acoustiques. En fonction des récepteurs les résultats sont très bon pour les positions proches de la source et moyens pour les récepteurs éloignés de la source. Les seules positions dont les résultats sont faibles pour les critères de la clarté et de l'intelligibilité sont situées derrière les poteaux.

Enfin on peut conclure que la démarche corrective pour la petite mosquée a pu satisfaire à des conditions d'un confort d'écoute optimale sans recourir à une assistance électroacoustique. Pour la grande mosquée, on préconise d'installer des appareils de sonorisation au niveau des poteaux pour améliorer la clarté du message.

A la lumière des résultats des phases corrective, on a établi pour les architectes, un ensemble de propositions architecturales et techniques, comme assistance à la conception acoustique des

mosquées. L'étude des outils qui fondent le déroulement du processus conceptuel, ainsi que les résultats de l'enquête auprès des architectes, ont permis d'établir les méthodes et les outils d'assistance, pour une adaptation des aménagements acoustiques dans les mosquées. Les propositions développées pour les architectes concepteurs, ont pour but de fixer les contraintes à l'intérieur desquelles leur créativité peut se développer librement.

Dans un souci de faciliter l'adoption de nos propositions par le plus grand nombre d'architectes (en fonction de leurs compétences et leurs expériences), On a opté pour une méthode de propositions définies selon deux volets distincts : un premier volet spécifiquement acoustique, propose des procédés acoustiques sur la base de calculs et d'épure géométrique. Un deuxième volet basé sur des critères architecturaux, proposant différents aménagements des principaux composants architecturaux de l'espace de la mosquée. Enfin il est essentiel de préciser que nos propositions tant architecturales que techniques, sont des outils d'assistance que l'architecte peut intégrer au tout début du processus de conception, ce qui constitue un atout considérable pour stimuler le processus de création architecturale.

En fait les corrections acoustiques apportées aux mosquées ne constituent pas une fin en soi, puisque notre objectif est d'orienter nos résultats sur la conception d'un espace de mosquée articulé sur des critères sonores de qualités. Dans notre problématique, on a établi que la notion de qualité sonore de l'espace architectural, doit être abordée dans une perspective pluridisciplinaire. Cette définition basée sur les résultats de nombreux travaux de recherche, nous a amené à faire l'hypothèse que « la caractérisation acoustique d'un lieu d'écoute est défini par l'interaction entre trois composantes principales ; les espaces construits, les phénomènes sonores perçus et les exigences auditif des usagers ». Dans les deux derniers chapitres, on a pu relever à l'issue de l'étude expérimentale, l'influence de la composition et la conception des éléments architecturaux sur la qualité d'écoute des mosquées, les résultats de l'enquête ont validé certains aspects de l'expérimentation. Nous pensons que ces résultats constituent une validation de notre hypothèse de départ.

L'analyse que l'on peut faire de ce retour sur notre hypothèse est, que dans l'approche pluridisciplinaire l'expérimentation acoustique prend une part importante au regard de l'évaluation perceptuelle des usagers, qui requiert des outils et des savoirs qu'on ne possède pas. En dépit de cette faiblesse, nous pensons que l'analyse des enquêtes nous a permis de compléter notre processus d'évaluation objective, et de formuler des interrogations.

La pertinence de tout travail de recherche réside dans sa capacité à assurer sa propre continuité en suscitant des interrogations. Les études sur les ambiances sonores en général sont encore à une étape expérimentale, apte à susciter des interrogations d'ordre global et des pistes de recherches spécifiques à l'acoustique des mosquées. L'évaluation sonore perceptive des usagers des mosquées, le développement des outils expérimentaux des effets sonores dans les mosquées, la recherche de composants architecturaux offrant une qualité sonore pour les mosquées, sont autant de pistes à expérimenter pour développer le champ de la recherche des ambiances sonores.

## **BIBLIOGRAPHIE.**

**Abdelazeez, M. K., Hammad, R. N and Mustafa, A. A.** (1991). Acoustics of King Abdullah Mosque. Journal of the Acoustical Society of America, [e-journal] 90 (3)1441–1445, <https://www.researchgate.net/> [Accessed October 2015 ]

**Abdou, A.A.** (2003) Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia. The Journal of Acoustical Society of America, [e-journal] 113(3), 1505-1517 <https://www.researchgate.net/> [Accessed October 2015]

**Ahmad,Y; Din,N.C ; Othman,R.** (2013) Mihrab design and its basic acoustical characteristics of traditional vernacular mosques in Malaysia. In Journal of building performance. Volume 4. Issue 1 2013 .pp 44-51. <https://www.researchgate.net/> [Accessed October 2015]

**Adolphe, L.** (1998), Ambiances Architecturales et Urbaines, Les Cahiers de la recherche architecturales n°42/43, 1998, Parenthèses : Marseille,

**Augoyard, J.F.** (1995), L'environnement sensible et les ambiances architecturales, In L'espace géographique, n°4,.

**Bayle.M.H,** (2007) Qu'est-ce qu'une mosquée ? Institut européen en sciences des religions, Septembre 2007.

**Boudon P., Pousin F.** (1988) Figures de la conception architecturale : manuel de figuration graphique, Paris, Dunod,.

**Bentafat,F.** (2013) Utilisation de la réponse impulsionnelle pour les mesures de l'acoustique des salles : application à l'amélioration de l'acoustique des mosquées . Magister. USTHB .Alger .

**Berg R.E & Stork D.G.** (1995). The physics of sound, Prentice Hall.

**Berjon, M.** (2007) Analyse des réflexions précoces. Conservatoire National des Arts et Métiers. Paris.

**Bruneau M.** (1998) Manuel d'acoustique fondamentale. Edition Hermès Paris.

**Boubezari M.** (1993), Prédicibilité des activités sonores – une approche chronologique des ambiances sonores, Mémoire de DEA "Ambiances Architecturales et Urbaines, Ecole Polytechnique de Nantes, Cresson : Grenoble.

- CATT Acoustic v8 Software** (2010) Users's Guide and Tutorial . Euphonia Paris.
- Chaabouni, S.** ( 2011). Voir, savoir, concevoir : une méthode d'assistance à la conception d'ambiances lumineuses par l'utilisation d'images références. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France.
- Champilou. V, Coutant B.** ( 2012) Correction acoustique des salles de TD 3N21 et 3N22 vers une solution « tout bois » Rapport de fin d'étude. Nancy Université, Université Henri Poincaré.
- Clana, J** (1998) Acoustique des salles de spectacle in Techniques et architecture (Paris). Numéro 440. pp 106-109.
- CNERIB.** DTR C3.1.1,( 2004) « Isolation acoustique des parois aux bruits aériens. Règles de calcul. Document technique règlementaire. » Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiments (CNERIB). Ministère de l'habitat et de l'Urbanisme (MHU).
- Commins, D.** (1997) Dossier acoustique : l'acoustique des salles de spectacle. Cahiers techniques du bâtiment. N° 177 janvier-février.
- Conan M.** (1990) Concevoir un projet d'architecture Edition le Harmattan.
- Cruz Barney,F.** (1999) Evaluation des performances d'un environnement informatique d'acoustique prévisionnelle. Thèse de doctorat de l'Université du Maine.
- Dandrel L., Loye Deroubaix B., Saunier F. et Richon F.** (2000), L'architecture sonore, PUCA, Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement.
- Degioanni, J-F** (2006) Design sonore : Réussir l'acoustique des lieux de spectacle. in Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment. Numéro 5367 .pp 70-71.
- Degioanni, J-F , Guezel, J-C** (2008) Salles de concert de nouvelle génération in Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment. Numéro 5471 .pp 80-84 .
- Delétré, J.J.** ( 2003) Acoustique : propagation en espaces clos - École d'architecture de Grenoble décembre 1, 2003- (pdf) Available at [www.ENSAG.org.fr](http://www.ENSAG.org.fr).
- Callender, J-H, Watson,D , Crosbie,J-M** , (1997) Time-saver standards for architectural design data : the reference of architectural fundamentals. Ed The McGraw-Hill .

**Duprey, B** (1976) Introduction à l'acoustique des bâtiments d'habitation. Editions Eyrolles, Paris.

**EASE Software** (2014) EASE 4.4 Users's Guide and Tutorial . RENKUS-HEINZ. Acoustic Design Ahnert . Germany. Version 4.4.

**Essert, R** . (1997) Conception des salles de concert : sensibilisation à l'espace sonore et sa maîtrise. In UER- revue technique. Numero 274. Pp 31-39.

**Folmer, L** . (2013) La qibla et le rempart. Mémoire de Magister. Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg.2013.

**Gallas, M.A.** (2013) De l'intention à la solution architecturale, proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases amont de conception. Thèse de doctorat, Université de Lorraine. Ecole doctorale IAEM Lorraine.

**Hamayon .L** .(1996). Réussir l'acoustique d'un bâtiment, Edition Le Moniteur, Paris .

**Hamayon .L** (2013).Comprendre Simplement l'acoustique des bâtiments. Edition du Moniteur, Paris ,3<sup>e</sup> édition .

**Hammad, RN** . (1990). RASTI measurement in mosques in Amman, Jordan, Applied Acoustics, 30 (4)335–345, <https://sciencedirect.com> [Accessed October 2015]

**Hammou A.** (2013) A propos de la conception architecturale. Office des publications universitaires. Alger. Deuxième édition.

**Hégron, G.** (2003). De la modélisation à la conception assistée par ordinateur, La modélisation déclarative. In : Les annales des ponts et chaussées. p. 107- 108.

**Hanrot, S** . (2003) A la recherche de l'architecture, Essai d'épistémologie de la discipline et de la recherche architecturales. Ed L'Harmattan . Paris .

**Hidaka, Y, Tachibana, H, Yano, H.** (1991) . Measurement of Impulse Reponse and Its Applications in Room Acoustics. Journal of Acoustical Society of America, Vol 89, p 1856.

**Hossam Eldien, H, Al Qahtani, H** . (2012).The acoustical performance of mosques main prayer hall geometry in the eastern province, saudi Arabia . [e-journal] Proceedings of the Acoustics. Nantes Conférence <https://hal.archives-ouvertes.fr> [Accessed October 2015]



**IRCAM** , (1990) . Espaces acoustiques Naturels et Artificiels, Aide aux architectes pour la conception des lieux d'écoute. Deuxième rapport d'avancement,

**ISO** (International Standard Organisation) ISO 3382 Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters. ISO. 3382 International Standard, 2nd Edition (1997.)

**I-Simpa Software.** (2012) Users's Guide and Tutorial. IFSTTAR. Paris.

**Jouhaneau.J.** (1996) Traitement acoustique et insonorisation des batiments.in Techniques de l'ingenieur. Bruits et vibrations. Volume BRI. Numéro C3362.

**Jouhaneau.J.** (1999) Notions élémentaires d'acoustique –Electroacoustique. Ed. Tec et Doc Lavoisier .

**Jouhaneau.J.** (2009) Guide méthodologique pour l'étude acoustique d'une salle : approche systemique. .in Techniques de l'ingénieur. Bruits et vibrations. Volume BRI. Numéro BR 1010.

**Jouhaneau.J.** (2003) Acoustique des salles et sonorisation. Ed. Tec et Doc Lavoisier.

**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 l'Université du Maine, Le Mans.

**Kahle Acoustics et Altia.** (2006). Philharmonie de Paris, Programme acoustique. Section sur la salle de concert uniquement. <https://hal.archives-ouvertes.fr> [Accessed October 2015]

**Karabiber Z. Yüksel, C. Binan and R. Ünver .** (2003), A Research Project in the Intersection of Architectural Conservation and Virtual Reality. [e-journal] Cahrisma. In 19 th International Symposium, CIPA , Technical University of Istanbul Antalya, Turkey. <https://www.researchgate.net/>. [Accessed October 2015]

**Karabiber, Z. G .**(1999). Acoustical problems in mosques: A case study on the three mosques in Istanbul. [E-journal] Forum Acusticum, Berlin. <http://dx.doi.org> [Accessed October 2015]

**Kay'yl'y, M.** (2002), Evolution of Acoustics and Effect of Worship Buildings on it. The 3rd European Congress on Acoustics – Forum Acousticum Sevilla, 16–20 September European Acoustics Association, Sociedad Espanola de Acustica (Spanish Acoustic Society), Organized by Architectural School and Civil

**Kleiner, M , Klepper, DL , Rendell, R.T.** (2010) *Worship space acoustics*. J.Ross Publishing  
Printed and bound in the USA.

**Kouzeleas, S.** (2002) développement d'un outil d'aide en simulation acoustique architecturale adaptable à un système de modélisation c.a.o. L'université de bordeaux 1. École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur.

**Kouzeleas, S, Semidor, C.** (2002) *Architectural translation of the acoustical simulation results*. Institute of Acoustics, Subject: Auditorium Acoustics: Historical and contemporary design and performance, Imperial College, 19-21 July .London.

**Kuznik, F. ,Krauss, G. Yezou ,R.** (2009), *Acoustique du bâtiment*. Cours en ligne, Département Génie Civil et Urbanisme, Institut Nationale des Sciences Appliquées Lyon.

**Lamoral, R.** (1975) *Acoustique et architecture*. Masson, Paris.

**Lassange, G.** (1998). *Analyse du rôle des références dans la conception, éléments pour une dynamique de représentation du projet d'ambiance lumineuse en architecture*. Thèse de doctorat. Université de Nantes. Nantes, France.

**Lavandier, C.** (1989) *Validation perceptive d'un modèle objectif de la qualité acoustique des salles*. Thèse de Doctorat. Université du Maine. Le Mans.

**Lebahar J-C.** (1983) *Le Dessin d'architecte : simulation graphique et réduction d'incertitude*, Roquevaire, Edition Parenthèses, 1983, 134 p.

**Lescop, L.** (1999), *La représentation des ambiances architecturales et urbaines : Introduction à une pédagogie des ambiances*. Thèse de doctorat. Nantes : Université de Nantes (I.S.I.T.E.M.)

**Mazouz, S., Zerouala, M. S.** (2001). *The integration of environmental variables in the process of architectural design: The contribution of expert systems*. *Energy and Buildings*, 33(7), 699-710.

**Mazouz, S.** (2004) *Eléments de conception architecturale*. Edition Office des Publications Universitaires. Alger.

**Meisser M.** (1974) *La pratique de l'acoustique dans le bâtiment*. Edition Eyrolles, Paris .

**Meisser M.** (1994) *L'acoustique du bâtiment par l'exemple*. Edition du Moniteur, Paris, 2<sup>e</sup> édition.

**Mostafa ,Refat, I.** (2013). A parametric investigation of the acoustical performance of contemporary mosques. *Frontiers of Architectural Research [e-journal]* 2, 30–41. <https://www.sciencedirect.com>

**Murray, H.** (2004) Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms. *Elsevier, Science Direct Volume 65, Issue 1 January* , pages 69-89.

**Nathanail, C.** (1999) Influence des informations visuelles sur la perception auditive. Conséquences sur la caractérisation de la qualité acoustique des salles. These de doctorat de l'Université du Maine.

**Orfali, W.** (2000) Room Acoustic and Modern Electro-Acoustic Sound System Design during Constructing and Reconstructing Mosques, These Doctorat, Berlin

**Pellerin, G.** (2003) Acoustique Architecturale: théorie et pratiques. Cours CNA – Version CPDA-

**Péneau, J.-P. et Joanne, P.** (1998), Ambiances et références du projet, in les cahiers de la recherche architecturale, n°42-43, Ed. Parenthèse, Marseille.

**Porada, M.** 1997. Conception architecturale, simulation et approche analogique. In : Les sciences de la conception sont-elles énonçables et enseignables ?

**Prost, R.** (1992). Conception architecturale : une investigation méthodologique. Paris : Le Harmattan. ISBN 2738412408.

**Putra A** (2013), Assessment of the acoustical performance in Malacca mosque, Malaysia: A case study on the Sayyidina Abu Bakar . Département génie mécanique, Université Technique de Melaka. Malaisie.

**Pujolle Jean** (1971) Lexique-guide d'acoustique architecturale. Editions Eyrolles, Paris.

**Remy, N.** (2012-2013) Environnement sonore. L5C Caractéristiques physiques des sons et des bruits- Notions de bases. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble. (ENSAG)

**Remy, N.** (2001) Maîtrise et prédictibilité de la qualité sonore du projet architectural Applications aux espaces publics en gare. Thèse de Doctorat à l'École d'Architecture de Grenoble. Octobre.

**Remy N.** (1995), La mise en son du projet architectural, Cresson, mémoire du DEA "Ambiances Architecturales Urbaines", Université de Nantes, Ecoles d'architecture de Grenoble et de Nantes.

**Rougeron C.** (1979) l'isolation acoustique et thermique dans le bâtiment. Editions Eyrolles, 3<sup>e</sup> Edition Paris .

**Semidor C.** (1999), Relations entre architecture et qualité acoustique : contribution à la caractérisation acoustique d'un lieu d'écoute, Doctorat d'état ès sciences physiques, Université Paul Sabatier de Toulouse, Décembre.

**Semidor, C.** (1998), L'espace et le son : outils prévisionnels en acoustique des lieux d'écoute et processus de conception, in Les cahiers de la recherche architectural, 1998, n°42-43, Ed. Parenthèses,

**Senhadji K,** (2011) Lieux de cultes et architectures. Réappropriations et transformations à Oran depuis l'indépendance de l'Algérie, in revue Esprit, ISSN 0014 0759, n° 2 février .

**Serageldin, I.** ( 1990). Contemporary Expressions of Islam in Buildings: The Religious and the Secular. In Expressions of Islam in Buildings. Hayat Salam, ed. Singapore: Concept Media/the Aga Khan Award for Architecture.

**Serageldin, I.** ( 1985). The Mosque Today: An Essay: A critical analysis of contemporary mosque architecture in the Islamic World. In "Architecture In Continuity", Sherban Cantacuzino (ed) Aga Khan Publications, New York .

**Solène Marry.** (2011) L'espace public sonore ordinaire, Les paramètres de la perception sonore dans les espaces publics, Contribution à une connaissance de l'ambiance sonore. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

**Suner, B.** (1991) Révolution dans la conception acoustique des salles. Les cahiers techniques du bâtiment . N° 131 Novembre .

**Templeton, D.** (1993). "Acoustics in the Built Environment: Advice for the Design Team". Oxford: Butterworth.

**Tatusesco ,D.** (1981). Protection acoustique des bâtiments contre les bruits de circulation « Application de l'arrêté de 1978 » Edition Eyrolles, Paris.

**Vedeilhie,R.** (1985) L'acoustique des salles polyvalentes in Travaux communaux. Volume 31, numéros 276. Pp 221-224.

**Vian, J-P.** (1996). La qualité acoustique des espaces comment la caractériser ? Acoustique ET technique, 5. Pp 21-26.

**Zuhre,U ; Semiha Y.** (2007) The acoustical characteristics of the Kocatepe Mosque in Ankara, Turkey. In [e-journal] Architectural Science Review, **51** (1), 21–30, <https://www.researchgate.net/> [Accessed October 2015]

**Zuhre ,S.G; Mehmet ,C.** (2013) Impact of design decisions on acoustical comfort parameters: Case study of Dogmacizade Ali Pasa Mosque. In [e-journal] Science Direct Elsevier. 74. pp 834-844. <https://www.researchgate.net/> [Accessed October 2015]

<http://ease.afmg.eu> EASE 4.4 Software .licensed to the University of Constantine 3. (2015)

**محمود حسن نوفل** (1999) "المعايير التصميمية لعمارة المساجد" ندوة عمارة المساجد كلية العمارة . ندوة عمارة المساجد التخطيط الرياضي

**محمد حمزة إسماعيل حداد** (2004) بحوث ودراسات في العمارة الإسلامية. "الكتاب الأول" الطبعة الثانية مزيدة ومنقحة الناشر دار القاهرة 2004.

**محمد ماجد عباس خلوصي** (1998) عمارة المساجد تصميم وتاريخ وطراز وعناصر خمسة وثمانون مسجدا. دار قابس للطباعة والنشر والتوزيع. بيروت. 1998.

**محمد عبد الستار عثمان** (2000) نظرية الوظيفية بالعمائر الدينية المملوكية الباقية بمدينة القاهرة. دار الوفاء لدنيا للطباعة والنشر. الإسكندرية. 2000.

**نوبي محمد حسن** (2002) عمارة المساجد في ضوء القرآن والسنة. دار نهضة الشرق. القاهرة. 2002

<http://www.anachemia.com/msds/french/0954f.pdf>

<http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/>

<http://www.coursgeniecivil.com>

[http://www.lam.jussieu.fr/Individu/Pellerin/pub/Acoustique\\_Architecturale\\_CNAM\\_2003.pdf](http://www.lam.jussieu.fr/Individu/Pellerin/pub/Acoustique_Architecturale_CNAM_2003.pdf)

Annexes.

Annexe 1 : caractéristiques de la source omnidirectionnelle.

**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°**

<b>Angles en degrés</b>	<b>Fréquence 500 Hz</b>	<b>Fréquence 1KHz</b>	<b>Fréquence 4KHz</b>
-	<b>Niveaux en dB</b>	<b>Niveaux en dB</b>	<b>Niveaux en dB</b>
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	<b>67,4</b>	<b>70,4</b>	<b>63</b>
322,5	<b>67,8</b>	<b>68,2</b>	<b>64,4</b>
330	<b>67,9</b>	<b>66,3</b>	<b>66,3</b>
337,5	<b>67,7</b>	<b>64</b>	<b>65,1</b>
345	<b>67,4</b>	<b>64,3</b>	<b>64</b>
352,5	<b>67,4</b>	<b>64,1</b>	<b>63,1</b>
360	<b>67</b>	<b>69,4</b>	<b>63,5</b>

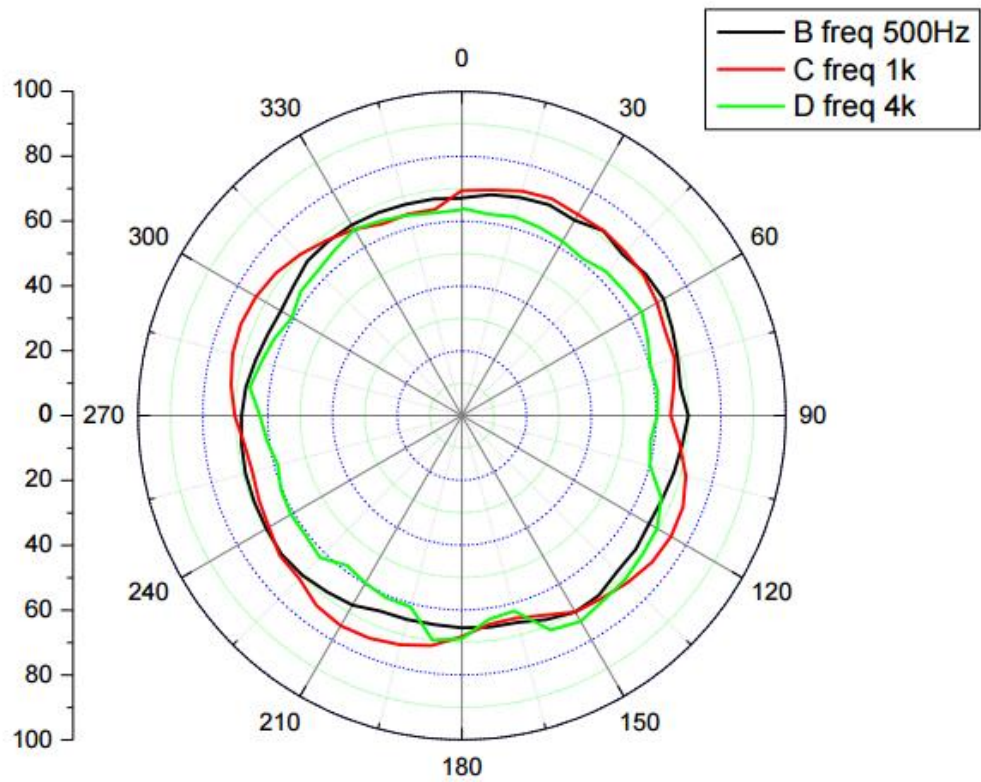


Figure2. Directivité de la source aux fréquences 500Hz, 1000 Hz et 4000 Hz.

## Annexe 2 : Questionnaire des fidèles

### 1\_ identification du fidèle

- 1 homme
- 2 femme
- 3 âge

(Réponses simultanées possibles : 2)

### 2\_ quelle est habituellement la place que vous occupez dans la mosquée par rapport à la position de l'imam

- 1 numéro de la rangée
- 2 à droite de l'imam
- 3 à gauche de l'imam
- 4 en face de l'imam,

(Réponses simultanées possibles : 2)

### 3\_ quelles sont les raisons du choix de votre emplacement dans la mosquée,

- 1 dans le but de bien entendre l'imam
- 2 pour éviter les bruits qui vous gênent
- 3 pour voir l'imam
- 4 autres

(Réponses simultanées possibles : 2)

### 4\_ de la place que vous occupez généralement dans la mosquée, de quelle direction vous parvient le son de la voix de l'imam,

- 1 à votre oreille droite
- 2 à votre oreille gauche
- 3 de face
- 4 de l'arrière
- 5 de toutes les directions,

### 5\_ comment jugez-vous la qualité du son qui vous parvient des hauts parleurs

- 1 fort et gênant
- 2 fort et agréable
- 3 acceptable
- 4 pas assez fort,

### 6\_ comment jugez-vous la clarté des paroles de l'imam que vous entendez

- 1 j'entends de façon distincte toutes les paroles
- 2 je n'arrive pas à distinguer certaines paroles
- 3 je n'arrive pas à distinguer la majorité des paroles
- 4 autres

### 7\_ les bruits venants de l'extérieur (la rue) ou de l'intérieur de la mosquée sont-ils gênants pour bien entendre les paroles de l'imam,

- 1 oui
- 2 non
- 3 autres,

### 8\_ les paroles e l'imam que vous entendez à travers les hauts parleurs, vous parviennent elles avec un écho,

- 1 oui
- 2 non
- 3 sans avis



**9\_ en cas de réponse affirmative à la question précédente, à quel moment entendez-vous cet écho,**

- 1      durant les cinq prières journalières
- 2      durant la prière et le prêche du vendredi
- 3      durant les prières du mois de ramadhan
- 4      durant la prière et le prêche de l'aïd,

**10\_ si vous jugez qu'il y a un écho à l'intérieur de la mosquée, pensez-vous qu'il est ?**

- 1      fort et gênant
- 2      résonant pas très gênant
- 3      acceptable et agréable
- 4      sans avis,

**11\_ pensez-vous que la qualité des paroles de l'imam que vous entendez est différente en fonction de votre posture dans la mosquée ?**

- 1      oui
- 2      non
- 3      sans avis

**12\_ en cas de réponse affirmative à la question précédente, dans quelle posture pensez-vous entendre les paroles de l'imam de façon claire et distincte ?**

- 1      posture debout durant les prières
- 2      postures assises durant les prêches,

**13\_ pensez-vous que la qualité des paroles de l'imam est différente en fonction des différentes activités pratiquées dans la mosquée ?**

- 1      oui
- 2      non
- 3      sans avis,

**14\_ en cas de réponse affirmative à la question précédente, à quel moment pensez-vous entendre les paroles de l'imam de façon claire et distincte ?**

- 1      durant les cinq prières journalières
- 2      durant la prière et le prêche du vendredi
- 3      durant les prières du mois de ramadhan
- 4      durant la prière et le prêche de l'aïd,

**15\_ si vous avez des observations concernant l'une de ces questions, écrivez -les en notant le numéro de la question,**

.....  
.....

## Annexe 3 : Questionnaire des architectes.

**1\_ lors de votre travail de conception des mosquées, vous êtes-vous référé à un cahier des charges spécifique établis par le maitre de l'ouvrage**

- 1 oui
- 2 non

**2\_ pouvez-vous indiquez la nature des critères de références qui définissent généralement votre choix conceptuel**

- 1 critères liés à votre expérience personnelle de la pratique de l'espace de la mosquée.
- 2 critères fonctionnels liés aux exigences de la pratique de la prière et du prêche
- 3 critères liés à la qualité du traitement esthétique et décoratif de la mosquée
- 4 critères liés au confort d'écoute et à la qualité sonore
- 5 autres

**3\_ le choix de la taille de la mosquée est établis en fonction de quels critères**

- 1 proposé par le maitre de l'ouvrage
- 2 en fonction de la taille de la parcelle
- 3 en fonction de la densité urbaine du lieu d'implantation
- 4 autres :

**4\_ quelle est la forme géométrique que vous jugez la mieux adaptée pour la salle de prière**

- 1 forme carrée
- 2 forme rectangulaire avec le mur de la qibla en longueur
- 3 forme rectangulaire avec le mur de la qibla en largeur
- 4 n'importe quelle forme polygonale adaptée à la forme du terrain
- 5 autres :

**5\_ le choix de la structure porteuse de la salle de prière en particulier et de la mosquée en général est dictée par**

- 1 facilité et cout de mise en œuvre
- 2 disponibilité et qualité (mécanique et physique) des matériaux de constructions
- 3 en rapport avec les choix conceptuels
- 4 autres :

**6\_ suite au choix d'un type de structure les dimensions de la trame porteuse sont dictées par**

- 1 les caractéristiques mécaniques optimales du type de structure
- 2 les exigences fonctionnelles et esthétiques
- 3 les exigences ergonomiques liées à la pratique de la prière
- 4 autres :

**7\_ les remarques émises par l'ingénieur quant à votre choix constructif, touche dans la majorité des cas**

- 1 les dimensions des poteaux
- 2 les dimensions de la trame porteuse
- 3 les dimensions de la coupole
- 4 la structure porteuse de la coupole
- 5 autres :

**8\_ la dimension en hauteur de la mosquée est définie en fonction de quels critères**

- 1 liés à l'équilibre proportionnel des éléments de la façade
- 2 inspirés des proportions de mosquées existantes (contemporaines ou anciennes)
- 3 liés aux normes d'hygiène relatives au volume d'air par occupant
- 4 autres :

**9\_ les dimensions de la coupole (hauteur et diamètre) est définie en fonction de quels critères**

- 1 liés à l'équilibre proportionnel du gabarit de la façade de la mosquée
- 2 technique en rapport avec la nature de la structure porteuse
- 3 inspirée de modèles de mosquées existantes
- 4 autres

**10\_ quelle est selon vous la fonction du mihrab**

- 1 une fonction acoustique de rediffusion du son de l'imam vers les fidèles
- 2 une fonction esthétique et décorative
- 3 une fonction pratique pour indiquer la qibla
- 4 autres

**11\_ selon vous la dimension du mihrab (hauteur et profondeur) est fonction de quels critères**

- 1 ergonomique en rapport avec l'échelle humaine
- 2 esthétique en rapport avec les proportions du mur de la qibla
- 3 acoustique en rapport avec l'épure géométrique du tracé des rayons sonores
- 4 autres :

**12\_ le choix des matériaux de revêtement intérieur de la mosquée sont-ils proposés par**

- 1 l'architecte
- 2 l'association de la mosquée
- 3 autres :

**13\_ les matériaux de revêtement intérieur de la mosquée, sont choisis en fonction de quels critères**

- 1 disponibilité et coût
- 2 durabilité et facilité d'entretien
- 3 aspect esthétique et décoratif
- 4 autres :

**14\_ le tapis (ou moquette) est choisi en fonction de quels critères**

- 1 aspect esthétique et décoratif
- 2 facilité d'entretien et confort d'usage
- 3 choisi par la personne qui en a fait un don à la mosquée
- 4 autres :

**15\_ comment jugez-vous l'impact de la conception architecturale et spatiale sur la qualité sonore de la mosquée**

- 1 impact majeur
- 2 impact moyen
- 3 impact négligeable
- 4 aucun impact,

**16\_ selon vous, quels sont les éléments architecturaux et architectoniques qui ont un impact sur la qualité sonore de la mosquée**

- 1 les proportions du volume de la salle de prière
- 2 la forme de la salle de prière
- 3 la dimension et la portée des poteaux
- 4 la dimension et l'emplacement de la coupole
- 5 la nature des matériaux de revêtement des parois de la salle de prière
- 6 la nature du tapis recouvrant le sol de la salle de prière
- 7 le type de sonorisation et son emplacement,

**17\_ le choix du type de sonorisation installée dans la mosquée est fait par**

- 1 l'architecte concepteur
- 2 l'association de la mosquée
- 3 un ingénieur acousticien
- 4 le fournisseur de l'équipement de sonorisation
- 5 autres :

**18\_ pensez-vous qu'il est nécessaire de consulter un acousticien pour le choix et l'installation de la sonorisation dans la mosquée**

- 1 oui c'est nécessaire pour toutes les mosquées
- 2 oui s'il s'agit d'une mosquée de grande envergure
- 3 non ce n'est pas réellement nécessaire,

**19\_ pensez-vous qu'il est recommandé que l'architecte puisse travailler en collaboration avec un ingénieur acousticien, pour la conception des mosquées**

- 1 oui
- 2 non

**20\_ avez-vous été sollicité pour des problèmes de confort acoustique dans les mosquées que vous avez réalisé**

- 1 oui
- 2 non

**21\_ dans le but d'assurer un confort sonore dans vos projets de mosquées, quelle est la méthode d'aide que vous jugez la mieux adaptée à vos besoins**

- 1 soumettre votre projet à un spécialiste en acoustique pour évaluation et éventuellement correction.
- 2 utilisé des méthodes d'assistance que vous pouvez vous même exploiter et mettre en œuvre.

**22\_ quelles sont les types de méthodes d'assistance à la conception qui vous semblent les mieux adaptées pour assurer une qualité sonore dans vos projets de mosquées,**

- 1 un cahier des charges détaillé
  - 2 documents techniques de normalisation et réglementation
  - 3 sources de références classique (livres, photos)
  - 4 logiciels de modélisation géométrique 2D et 3D
  - 5 logiciels numériques de simulation et de prédiction acoustiques,
- Ordonnez les réponses

**23\_ si vous avez des observations concernant l'une de ces questions, écrivez vos observations en notant le numéro de la question,**

.....

## Résumé.

L'acoustique architecturale constitue une spécialité récente, apparue suite à l'introduction des critères d'ambiances (thermique, sonores, lumineux) dans le champ des connaissances de l'objet architectural et de sa pratique. L'acoustique des salles, constitue un sous-domaine de l'acoustique architecturale, défini comme étant l'articulation entre deux champs disciplinaires, celui de l'architecture et de l'acoustique, son domaine d'étude concerne l'émission, la perception et surtout l'absorption du son (musique ou parlé) dans un espace architectural déterminé. L'objectif général de cette science est de réaliser des salles dont les propriétés acoustiques sont optimales au point de vue du confort de l'écoute.

Tout espace destiné à recevoir un public qui s'installe pour écouter un message sonore est appelé un lieu d'écoute. Les mosquées sont considérées comme des espaces appartenant à cette catégorie puisque leur fonction consiste à transférer un message sonore à un public rassemblé en leurs seins. Ainsi la mosquée possède des particularités liées à l'acoustique des salles, de par sa fonction en tant que lieu d'écoute ; cette caractéristique a un impact direct sur les choix conceptuels et par conséquent sur le confort des usagers.

Les théories scientifiques liées à l'acoustique des salles posent clairement la relation entre les éléments architecturaux définis par l'architecte comme le volume, la forme, les proportions géométriques et la nature des matériaux avec la qualité de l'audition dans la salle. Ce travail engage une caractérisation de la qualité acoustique des mosquées par l'outil de l'expérimentation, sous forme de simulation et de mesures in-situ. En outre des enquêtes auprès des fidèles a permis l'évaluation subjective des critères acoustiques. Cette étude a pu établir les liens entre les composants architecturaux des mosquées et les phénomènes sonores en constatant la présence de plusieurs aspects d'inconfort sonore.

L'étude des corrections acoustiques par simulation en vue d'améliorer la qualité d'écoute des mosquées, a permis de traiter les éléments architecturaux présentant des problèmes acoustiques comme la coupole et les matériaux de finitions. A la lumière des résultats des phases correctives, on a établi pour les architectes, un ensemble de propositions architecturales et techniques, comme assistance à la conception acoustique des mosquées. L'étude des outils qui fondent le déroulement du processus conceptuel, ainsi que les résultats de l'enquête effectuée auprès des architectes, ont permis d'établir les méthodes et les outils d'assistance, pour une adaptation des aménagements acoustiques dans les mosquées. Les aménagements proposés, sont des outils d'assistance que l'architecte peut intégrer au tout début du processus de conception, ce qui constitue un atout considérable pour stimuler le processus de création architecturale.

Mots- clés : acoustique des salles. Simulation acoustiques. Mesures acoustiques. Mosquées. Conception architecturale.

## Abstract

The architectural acoustics constitutes a recent specialty, appeared further to the introduction of the criteria of atmospheres (thermal, sound, bright) in the field of the knowledge of the architectural object and its practice.

The acoustics of rooms, establishes a sub-domain of the architectural acoustics, defined as being the joint between two disciplinary fields, that of the architecture and the acoustics, sounds domain of study concern the emission, the perception and especially the absorption of the sound (music or spoken) in a determined architectural space. The general objective of this science is to create rooms whose acoustic properties are optimal in the point of view of the comfort of the listening. Any space intended to receive a public that installs itself to listen to a sound message, called a place of listening.

available to the architect a set of architectural solutions for the Mastery of sound, the Scientific theories related to the acoustics of the rooms clearly show the relation between the architectural elements defined by the architect as the volume, the shape, the geometrical proportions and the nature of the materials with the quality of the hearing in the room. This work involves a characterization of the acoustic quality of mosques by the tool of the experiment, in the form of simulation and of measures in situ. Moreover, surveys of the faithful allowed the subjective evaluation of acoustic criteria. This study was able to establish the links between the architectural components of the mosques and the sound phenomena by observing the presence of several aspects of sound discomfort.

The study of acoustic corrections in order to improve the quality of listening to the mosques, allowed to treat the architectural elements presenting acoustic problems like the dome and the finishing materials. In the light of the results of the corrective phases, a set of architectural and technical proposals have been established for the architects, as assistance to the acoustic design of the mosques. The study of the tools that form the basis of the conceptual process, as well as the results of the survey carried out with the architects, made it possible to establish methods and tools for assistance in adapting acoustic installations in mosques. The proposed improvements are tools of assistance that the architect can integrate at the very beginning of

the design process, which is a considerable asset to stimulate the process of architectural creation environments in the design of mosques.

Key words: Room acoustic. Acoustic simulation. Acoustic measurement. Mosques.

Architectural design.

## ملخص

علم الصوتيات المعمارية هي تخصص ظهر مؤخرا، نتيجة ادخال معايير البيئة (حرارية؛ صوتية؛ ضوئية) في مجال علم الهندسة المعمارية وممارسته. علم الصوتيات داخل القاعة يشكل مجال فرعي لعلم الصوتيات المعمارية، الذي يعرف بأنه يحقق العلاقة بين مجالين من التخصصات: الهندسة المعمارية والصوتيات وان مجاله الدراسي يخص بالتحليل الفيزيائي للصوت وكل ما يتعلق به في أثناء انتقاله في وسط ما. الهدف العام من هذا العلم هو تصميم لفضاءات تحتوي على أفضل الخواص السمعية من تحقق كل جوانب الراحة الصوتية.

الجدير بالذكر أن دراسة أداء الصوت في دور العبادة المختلفة مثل الكنائس والمعابد نالت اهتمام الباحثين بشكل ملحوظ ولكن نلاحظ ان عدد البحوث في مجال الصوتيات في المساجد قليلة جدا. وتعد الراحة الصوتية من اهم الجوانب الأساسية داخل المساجد. فالتصميم الصوتي يمثل أحد المتطلبات التصميمية الأساسية التي بتكاملها مع المتطلبات التصميمية الأخرى يمكن تحقيق الراحة بمفهومها الأشمل.

وقد تناولت اهم النظريات الخاصة بعلم الصوتيات داخل القاعات العلاقة بين الاداء الصوتي وعناصر التصميم المعماري مثل قياس الاحجام وشكل الفضاءات ونوعية مواد البناء المستعملة داخل القاعات. يعتبر ادا علم الصوتيات في القاعات من العلوم التي بإمكانها تقديم منهجية واضحة في عملية التصميم الصوتي. بذلك يستطيع المهندس المعماري تحقيق المتطلبات التصميمية الأساسية للراحة الصوتية.

لأجل تحقق ذلك اعتمد هذا البحث على الثقافة المعلوماتية وما توفره من وسائل لحل هذه المشكلة، والتي تعد برامج المحاكاة الحاسوبية من اهمها خلال مرحلة التصميم كونها تعمل بصورة متزامنة مع عملية التصميم مما يتيح الفرصة لإيجاد الحلول للمشاكل المتوقعة قبل حدوثها واجراء التعديلات اللازمة على التصميم وذلك من خلال عمليات التغذية الراجعة بين هذه البرامج والعمليات التصميمية.

ولأجل تحقيق ذلك عمليا اعتمد البحث منهجية تقوم على استخلاص مؤشرات الاداء الصوتي واختبار المنتخب منها بعدة اختبارات تطبيقية وذلك بالاستعانة ببرامج المحاكاة الحاسوبي. مع اجراء عمليات حساب المؤشرات الصوتية في الموقع داخل المساجد. وقد تم ادراج النتائج على شكل ارشادات ونصائح تصميمية.

الكلمات المفتاحية

علم الصوتيات المعمارية. علم الصوتيات داخل القاعات. برامج المحاكاة الحاسوبي. عمارة المساجد. التصميم المعماري.





