

RELATIONS ENTRE COMPOSANTE ACOUSTIQUE ET CONCEPTION ARCHITECTURALE : CARACTERISATION ET AMELIORATION ACOUSTIQUE DE L'ESPACE DE LA MOSQUEE.

BENMAGHSOULA ZOHRA HAMMOU

Faculté d'Architecture et d'Urbanisme. Université Constantine3. Algérie.

Reçu le 29/06/2016 – Accepté le 02/11/2017

Résumé

De par sa fonction religieuse et sociale la mosquée constitue un lieu d'échange et de savoir, à travers les prêches des imams sous forme de discours et la lecture du coran. La mosquée est donc considérée comme un édifice qui possède des particularités liées à l'acoustique des salles, en tant que lieu d'écoute ; cette caractéristique a un impact direct sur les choix conceptuels et par conséquent sur le confort des usagers. Notre étude tente de répondre aux attentes des concepteurs, en évaluant le confort acoustique des mosquées, par l'un des critères les plus importants en acoustique des salles : le temps de réverbération. On utilisera à cet effet la simulation numérique pour évaluer la qualité acoustique des mosquées et apporter des corrections en optimisant la durée de réverbération pour assurer un confort acoustique.

Mots clés: acoustique des salles. Le temps de réverbération. Mosquées. Simulation acoustique.

Abstract

Because of its religious and social function, the mosque is a place of exchange and knowledge. The transmission of this knowledge is carried through the sermons of imams in the form of speeches and reading of Quran. The mosque is considered as building that has characteristics related to the acoustics of the room, its function as a place of listening; which has a direct impact on the conceptual choices and hence the comfort of the user. Our study attempts to answer the needs of designers, with a characterization of acoustic comfort of the mosques, by one of the most important criteria in room acoustics: reverberation time. For this purpose, we use numerical simulation to predict the acoustic quality of mosques then give correction by optimizing the reverberation time to ensure optimal sound quality in mosques.

Keywords: room acoustic. Reverberation time. Mosques. Numerical simulation.

ملخص

تعتبر المساجد بنايات ذات وظيفة دينية واجتماعية حيث تجرى فيها العديد من النشاطات الخاصة بالقراءة والدرس وقراءة القرآن. ولذلك فهي فضاءات ذات متطلبات صوتية، حيث تدرج في خاتمة القاعات السمعية المتخصصة. وتعد الراحة الصوتية من اهم الجوانب والمتطلبات التصميمية الأساسية للمساجد، التي يجب ان تتكامل مع المتطلبات التصميمية الأخرى. لتحقق المساجد غايتها الدينية والاجتماعية والثقافية في آن واحد.

ان دراستنا تهتم بالكشف عن نوعية الادانية الصوتية لمباني المساجد بمدينة قسنطينة. وقد تم الاستعانة بالثقافة المعلوماتية وما توفره من وسائل لحل هذه المشكلة عن طريق برنامج المحاكاة الحاسوبية. ونعتمد في ذلك على منهجية استخلاص مؤشرات الأداء الصوتي عن طريق حساب عنصر "زمن التردد الصوتي" تم اختبار المنتخب منها لتحسين الأداء الصوتي للمساجد.

الكلمات المفتاحية : الراحة الصوتية. القاعات السمعية. المساجد. زمن التردد الصوتي. المحاكات الحاسوبية.

Introduction :

Les mosquées sont des lieux de culte utilisés pour la prière, la prédication, les conférences, et les récitation coraniques. De par sa fonction religieuse et sociale la mosquée 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. Il y a trois exigences acoustiques distinctes pour les mosquées : entendre les paroles de l'Imam, Comprendre le prêche de l'imam, écouter ou participer à la récitation du Saint Coran [1]. Les fidèles participent à ces activités selon deux modes ergonomiques toujours face à la qibla : debout alignés en rangées parallèles pour les différentes prières ou assis sur le tapis pour écouter le prêche du vendredi ou réciter le saint coran. Toutes les activités exercées dans les mosquées sont liées à l'audibilité et l'intelligibilité de la parole qui est directement assujettie au temps de réverbération. En acoustique des salles, le temps de réverbération est considéré comme le critère le plus important pour caractériser la qualité d'écoute. Les mosquées constituent donc des exemples d'établissements publics où il est nécessaire d'assurer un confort acoustique à travers un examen attentif de sa conception. Le but étant d'atteindre les conditions d'une bonne qualité d'écoute [2]. Les travaux de recherches sur l'acoustique des mosquées ont permis de mettre en évidence les problèmes acoustiques des mosquées investiguées par des méthodes expérimentales comme la mesure et la simulation informatique [3]. En plus des proportions et de la taille du volume la plupart des études et recherches qui ont touché à la caractérisation acoustique des mosquées ont mis l'accent, sur l'importance des matériaux de revêtement, tout en considérant le temps de réverbération comme critère déterminant de la qualité acoustique.

Hammad [4] dans son étude de la grande mosquée d'Amman a relevé l'impact des types de revêtements du sol sur le temps de réverbération, L'étude d'Orfali [5] a détaillé l'impact de la structure primaire (forme, volume, murs et poteaux) ainsi que la structure secondaire (revêtement des murs des poteaux et du sol) sur les valeurs du temps de réverbération, ainsi que sur les valeurs d'autres critères liés à l'intelligibilité de la parole. La majorité de ces travaux ont pu soulever un problème commun, qui est l'utilisation intensive des surfaces dures, marbre, carreau de faïence, verre. Ces matériaux souvent choisis pour leur esthétique et leur facilité d'entretien, présentent des surfaces réfléchissantes du son et donc ayant un faible coefficient d'absorption. L'absorption acoustique dans les mosquées est ainsi très limitée, elle n'est assurée que par le tapis et les fidèles présents dans la salle de prière. Le manque de surface absorbante, aura un effet négatif sur le confort d'écoute au sein de la salle de prière ; puisque le temps de réverbération mesuré ou calculé sera trop long. Un temps de réverbération long va sérieusement affecter l'intelligibilité et la clarté de la parole à l'intérieur de la mosquée.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la qualité acoustique de deux mosquées implantées à Constantine, et proposer des corrections acoustiques en cas d'inconfort. L'évaluation se fera par le critère du temps de réverbération selon Sabine. On utilisera à cet effet l'outil de la modélisation et la simulation pour le calcul du temps de réverbération réel et on recherchera à travers différents choix de matériaux, à l'optimiser en prenant comme références, les valeurs optimales définies dans la littérature scientifique.

Notre article est divisé en sept parties, après l'introduction en partie 1, la durée de réverbération est définie dans la partie 2, suivie d'un aperçu des mosquées choisies en partie 3. La quatrième partie, expose la méthodologie et le matériel utilisé. La partie cinq et six résume l'étude des résultats simulés, ainsi que les corrections. Enfin les conclusions sont présentées dans la dernière partie.

II. La durée de réverbération :

La réverbération est un phénomène de prolongation des sons que l'on constate dans un espace fermé, objectivé par un temps de réverbération, noté T_r et exprimé en seconde. La réverbération dépend de la fréquence du son et il est donc nécessaire d'indiquer les valeurs du temps de réverbération aux différentes fréquences, habituellement en échelle d'octave.

Le rôle prépondérant de la réverbération dans la dégradation du message parlé, est l'une des caractéristiques importantes en acoustique des salles. [6]. Le premier essai de la caractérisation acoustique d'une salle a été mené par W.C Sabine (1868–1919) qui à partir de 1896 a entrepris des études pour caractériser l'effet de réverbération dans une salle. Il établit la formule qui mesure le temps que met un son pour s'atténuer jusqu'à la limite de l'audible. Il trouva la correspondance quantitative entre la surface d'absorption des matériaux, le volume et le temps de réverbération d'une salle. La formule de Sabine est $T_r (s) = 0.16 \frac{V}{A}$ Dans cette formule le T_r est indépendant de la position de la source dans le local et de la position d'écoute. Cette formule de Sabine présente la première solution mathématique et quantitative du problème d'écoute en acoustique des salles. A partir des connaissances des matériaux et des dimensions de la salle, on pouvait désormais prédire le temps de réverbération finale de la salle [7].

La durée de réverbération est le temps mis par les ondes pour s'atténuer après réflexion sur les parois d'un local, par rapport à une chute de l'intensité sonore de 60dB. Il est lié à la fois à la capacité d'absorption de l'espace et à son volume [8]. Pour les espaces à parois très réfléchissantes et de volume important comme c'est le cas des mosquées, il peut y avoir des réflexions puissantes provenant des parois (sol, murs, poteaux et plafond), il y aura alors une confusion totale entre le son direct et le son réfléchi. En fait lorsque les paroles de l'imam sont émises, celles-ci se décomposent en sons directs et en sons réfléchis. Dès une certaine distance à la source, le son réverbéré est plus intense que le son direct ; Ce phénomène d'interférence entre les ondes directes et

réfléchies peut engendrer un écho, qui se produit lorsque l'intervalle de temps qui sépare l'arrivée des deux ondes au même point est supérieur à 0,1 seconde [9].

Dans ce cas la réverbération est considérée comme nuisible si elle masque des sons successifs, la parole devient inintelligible (sommairement, on peut dire que les voyelles masquent les consonnes, lesquelles ne sont plus comprises). En moyenne 15 à 20 syllabes sont produites par seconde par un locuteur, donc chaque 70ms à 50ms (cela dépend du locuteur) il y a une syllabe produite dans la salle. En conséquence, si les réflexions longues et retardées ont un temps supérieur à 50ms l'audience perçoit un son confus. Il faut donc impérativement maîtriser la réverbération, du fait de son impact direct sur l'intelligibilité de la parole. On sera donc amené à entreprendre une correction acoustique qui consiste à amener le temps de réverbération à une valeur optimale, en fonction de la nature de l'espace et de son utilisation. Le plus souvent, il s'agit de diminuer le temps de réverbération en augmentant les surfaces absorbantes.

a) Durées de réverbération préconisées :

Il n'existe pas de durées de réverbération optimales. Il est cependant possible de préconiser des durées de réverbération en fonction de la destination des locaux et de leurs volumes. Berg et Stork [10] recommandent pour la parole un temps de réverbération inférieur à 1 seconde à 500Hz.

Les abaques de la figure 1, [11] nous donne quelques exemples de T_r optimal aux fréquences médium. On peut également utiliser des formules caractérisant le temps de réverbération comme celle de Knudsen, cité dans l'ouvrage « acoustique des salles et sonorisation » [6] qui recommande un T_r optimal aux fréquences médium 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 .

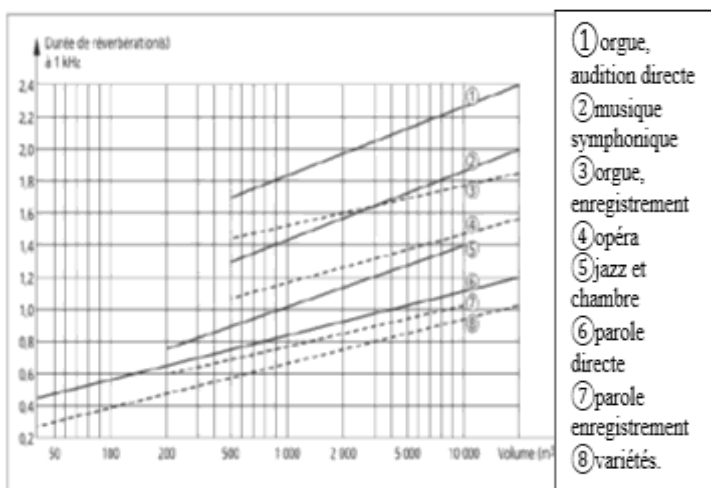


Figure. 1 : Abaque de Béraneck : Valeurs préconisées du temps de réverbération

En Algérie, les valeurs normatives en matière de confort acoustique, sont précisées dans un document technique réglementaire (DTR), élaboré par le centre national de

recherche sur le bâtiment CNERIB [12] relié au ministère de l'habitat et de l'urbanisme. Ce document comporte des recommandations de valeurs préconisées du temps de réverbération pour des espaces tels que les salles de classe, les salles de sport et les espaces résidentiels. Aucune valeur normative spécifique aux mosquées n'est stipulée dans cette documentation. On retrouve cependant dans la littérature scientifique traitant de l'acoustique des mosquées, des valeurs optimales du temps de réverbération. On citera Abdou A.A [13], qui a entrepris dans une étude comparative entre plusieurs mosquées de tailles différentes, un classement des mosquées sur la base de leurs volumes (Tab.1), également Orfali [5] qui a proposé en se basant sur ce classement, des valeurs optimales du temps de réverbération (pour les fréquences médiums), spécifiquement testées sur des mosquées (Fig.2).

Tableau 1 : classement des mosquées par catégorie de surface

Classement des mosquées selon leurs volumes en six groupes	
Groupe des mosquées	Valeurs des volumes
A	<1000
B	>1000 <1500
C	>1500 <2000
D	>2000 <3000
E	>3000 <10000
F	>10000

III. Aperçu sur les mosquées choisies :

La construction des mosquées en Algérie n'est pas différente des autres édifices publics. L'ossature des mosquées est en béton armé avec plancher à hourdis et double mur en brique. La salle de prière principale se situe en général au rez-de-chaussée, avec un étage en mezzanine Le caractère architectural 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 décoratives de plâtre ou les sculptures sur le bois. Le sol de la salle de prière est toujours recouvert d'un tapis ou une moquette ; les murs se composent dans leur partie basse d'un placage en marbre ou faïence avec finition de peinture en hauteur. En se référant au classement du tableau 1 ; Les deux mosquées choisies sur la base de leur volume appartiennent à la catégorie E. Ce choix repose sur un classement de l'ensemble des mosquées implantées dans la wilaya de Constantine (Tableau 2). Selon l'histogramme de la figure 3, les mosquées avec une surface bâtie comprise entre 500 et 1000 m^2 et donc un volume de 4500 à 9000 m^3 , constituent le groupe le plus important. Les deux mosquées choisies « Ibn-el-arabi » et « Ennour » se situent dans deux communes différentes, respectivement « Zouaghi » et « Ain smara ». Comme la plupart des mosquées, elles présentent des similitudes dans la conception architecturale et architectonique

extérieure. La conception de l'espace de prière comporte quelques différences, liées à sa surface, au nombre des poteaux et à la surface de la mezzanine.

a) La mosquée Ibn-el-arabi :

La mosquée Ibn-el-arabi, possède une salle de prière de forme carrée régulière de 30m de côté, surmontée d'un étage en mezzanine couvrant les 2/3 de sa surface. Elle comporte quatre séries de poteaux parallèles à la qibla et cinq séries dans le sens opposé. Le sol est recouvert d'une moquette, les murs et les poteaux très décorés, se composent dans la partie basse d'un revêtement en faïence avec finition de plâtre peint en hauteur. La coupole également décoré en plâtre, d'une hauteur de 15m est décalée du centre géométrique de la mosquée vers le mur de la qibla. L'ensemble de la mosquée constitue un volume parallélépipédique de 30/30/9 m. la mosquée se distingue par des ouvertures très importantes, réparties en bande verticale sur les quatre façades du volume. (Photo 1et 2)

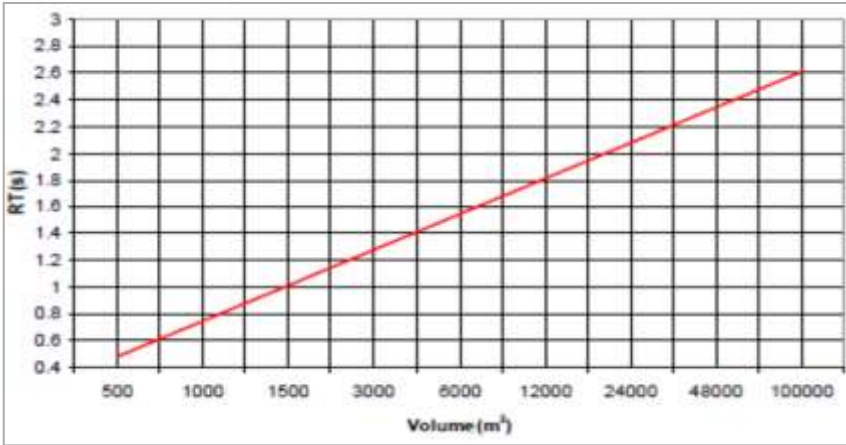


Figure.2 Temps de réverbération recommandé aux fréquences medium pour les six groupes de mosquées

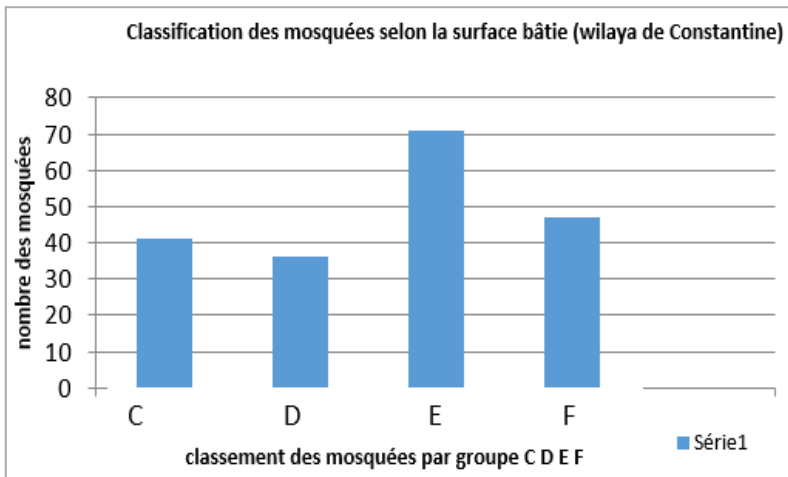


Figure 3 : histogramme illustrant le classement des mosquées de la wilaya de Constantine par catégorie de surface (Données recueillies auprès de la Direction des affaires religieuses et des wakfs de la wilaya de Constantine 2013)

Tableau 2 : classement des mosquées de la wilaya de Constantine par catégorie de surface

les groupes de mosquées associées à leur surface bâtie et à leur volume				
Groupes	C	D	E	F
Volume en m ³ de chaque catégorie	<2250	>2250<4500	>4500<9000	>9000
Surface en m ² de chaque catégorie	<250	>250<500	>500<1000	>1000
Nombre de mosquées par catégorie	41	36	71	47



Photo 1. Vue latérale de la salle de prière de la mosquée Ibn Arabi



Photo 2. Mur de la qibla de la salle de prière de la mosquée Ibn Arabi

b) La mosquée Ennour :

La mosquée Ennour, possède une surface et un volume moins importants que la mosquée Ibn-el-arabi. Le volume de la salle de prière est plus dégagé, puisqu'il ne comporte que quatre piliers supportant l'étage (en mezzanine) et la coupole, se situant au centre géométrique de la mosquée. Les matériaux de finition sont similaires à la mosquée précédente. L'étage en mezzanine couvre 50% de la surface du RDC, occupant la travée arrière, et les deux travées latérales. La mosquée forme un parallélépipède de 22/22/8m avec une hauteur de 14m sous la coupole. L'espace de prière est éclairé par des ouvertures ordinaires, réparties sur les quatre murs conçus avec de multiples retraits et avancés. (Photo 3 et 4).



Photo 3. Mur de la qibla mosquée Ennour



Photo 4. Vue du mur latéral de la mosquée Ennour

IV. Matériels et méthodes :

Dans pratiquement tous les domaines de la connaissance ; l'étude des phénomènes, des plus simples aux plus complexes, passe par des étapes de modélisation et de simulation en usant des multiples logiciels et outils

informatiques. Dans notre étude pour les deux mosquées, on utilisera le logiciel EASE4.4, [15] distribué par la société AFMG. EASE 4.4 est un logiciel de simulation acoustique qui permet la modélisation des salles, des sources acoustiques et électro-acoustiques ; avec la possibilité de calculer de nombreux paramètres utilisés en acoustique des salles. L'un des critères les plus importants en acoustique des salles et que l'on va calculer avec le logiciel EASE, est le temps de réverbération selon Sabine.

a) Matériels :

A partir des plans, coupes et façades des deux mosquées, la modélisation avec EASE, contrairement à d'autres logiciels tels que Catt, Odeon, Epidaure [16], offre un environnement graphique très puissant pour intégrer le modèle géométrique directement sur sa propre interface de saisie. L'ergonomie d'EASE s'adapte bien aux besoins des architectes pour la modélisation des géométries chargées et riches en éléments architecturaux et l'affectation de divers matériaux, comme c'est le cas des mosquées. La visualisation tridimensionnelle de l'espace (fig. 5 et 6) se présente sous forme d'un modèle numérique constitué de facettes auxquelles sont associées des paramètres acoustiques tel que le coefficient d'absorption des matériaux. On rappelle que le coefficient d'absorption α_{sab} est le rapport entre l'énergie acoustique absorbée par un matériau et l'énergie incidente ; il varie entre 0 et 1 en fonction de la fréquence.

b) Méthodologie :

Dans le but de concrétiser l'objectif défini en introduction, la méthode de travail est illustrée dans l'organigramme de la figure 4. On procédera à la modélisation de chaque mosquée, à partir de la définition de la géométrie 3D de la mosquée, et des valeurs des coefficients d'absorption des matériaux des différentes parois (murs, plancher, plafond, poteaux, ouvertures). Les valeurs du temps de réverbération des deux mosquées simulées à l'état vide, sont calculées par EASE4.4, pour la gamme de fréquence de 125 à 8 KHZ. Le temps de réverbération calculé sera ensuite comparé aux valeurs recommandées, puis optimisé par un choix plus approprié des matériaux. Enfin on procédera à l'analyse comparative des résultats obtenus.

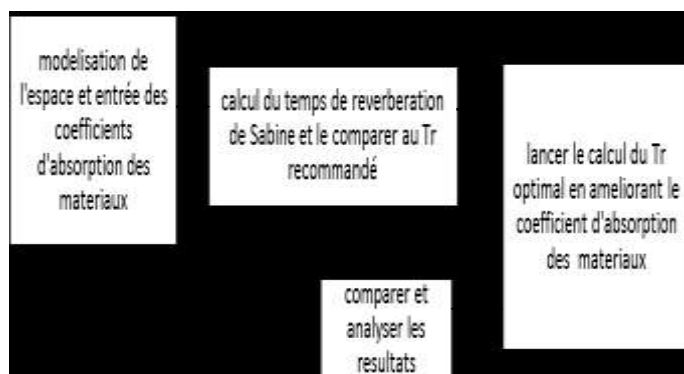


Figure 4. Organigramme du processus de la recherche

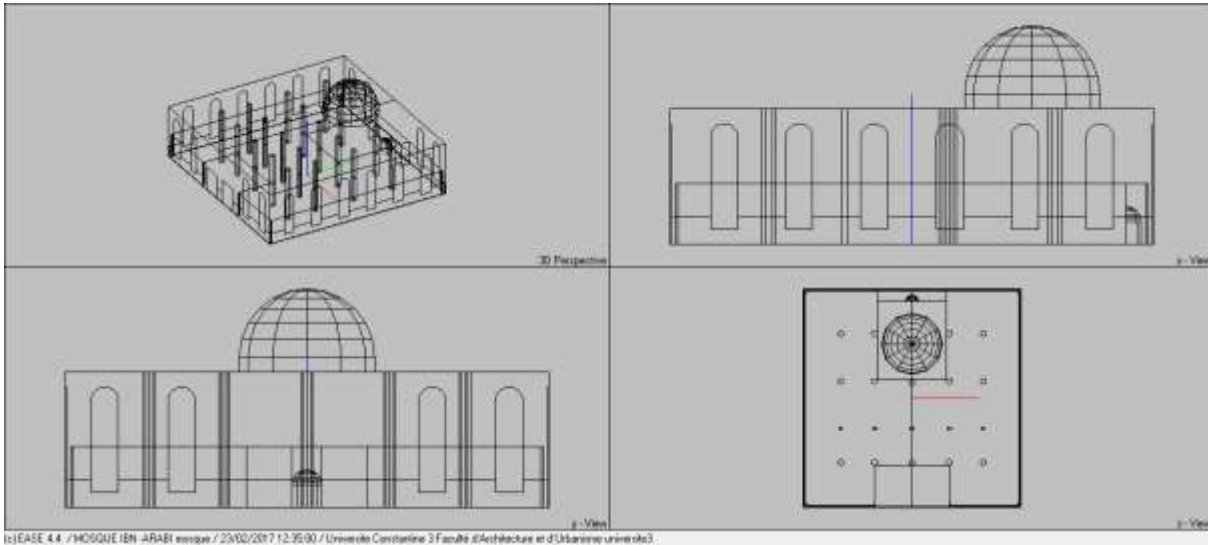


Figure 5. Rendu modelisé de la volumetrie,vue en plan et facades de la mosquée Ibn-el-arabi.

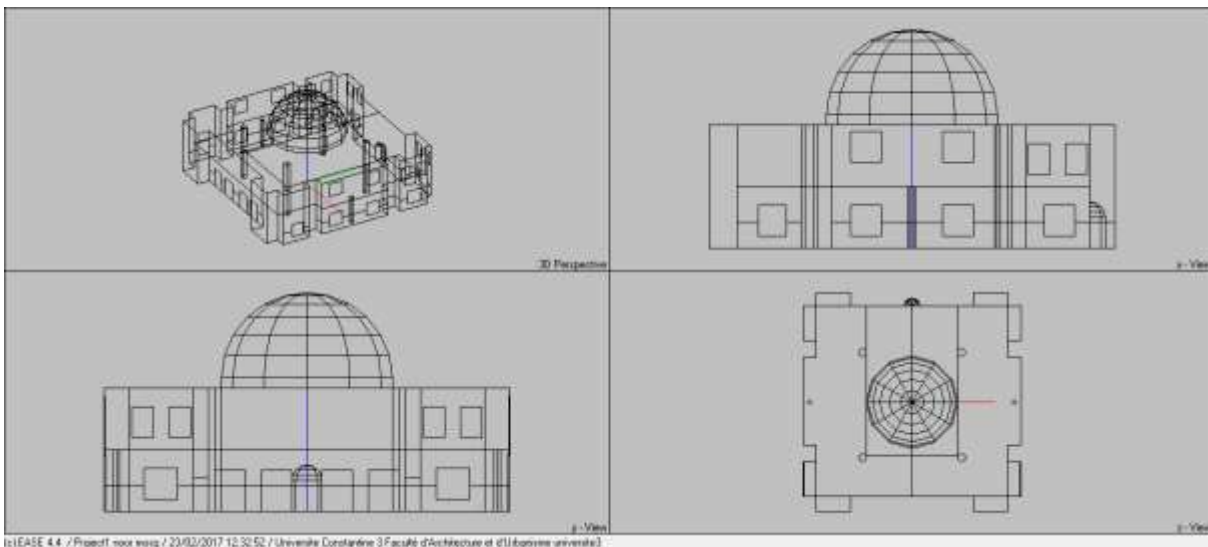


Figure 6. Rendu modelisé de la volumetrie,vue en plan et facades de la mosquée Ennour.

V. présentation des résultats et comparaison :

Les valeurs de la durée de réverbération des deux mosquées simulées à l'état vide, (sans les fidèles), sont calculées par EASE4.4 après la modélisation géométrique et l'affectation des matériaux avec leurs coefficients d'absorption sur les octaves centrées sur 125 à 8 KHz. On a pu relever au terme de la modélisation, certaines spécificités liées aux propriétés architectoniques des deux mosquées. Certains de ces aspects conceptuels seront examinés, afin d'identifier leur impact sur la qualité acoustique des mosquées.

En visualisant les courbes illustrant les coefficients d'absorption de la figure 7, on remarque clairement qu'à l'exception du tapis qui recouvre le sol, tous les autres

matériaux ont des coefficients d'absorption très faible ; notamment dans la plage des fréquences basses. On remarque sur l'histogramme de la figure.8, des pourcentages très proches dans l'utilisation des principaux matériaux pour les deux mosquées ; avec des valeurs plus importantes pour la grande mosquée. Néanmoins, on peut observer que le tapis (matériau absorbant) occupe 18,52% de la surface totale dans la petite mosquée et seulement 16,19% dans la grande mosquée. Cela revient au fait qu'une surface importante de la grande mosquée est occupée par les poteaux au nombre de dix-neuf, alors que la petite mosquée ne compte que six poteaux. On note aussi un pourcentage élevé d'utilisation du verre (matériau réfléchissant) dans la grande mosquée, ainsi qu'un étage en mezzanine plus important, ce qui réduit le volume de l'espace de prière, puisque la hauteur réelle des 2/3 de l'espace (occupée par la mezzanine) sera de 4m au

lieu de 9m. On pourra au terme de la simulation, effectuer une comparaison des résultats obtenus et estimer les impacts des différents critères conceptuels sur les valeurs du temps de réverbération des deux mosquées.

Tableau 3. Propriétés quantifiées des surfaces et des matériaux utilisés pour les deux mosquées.

mosquées	Volumen m ³	Surfaces m ²	Différents matériaux des mosquées estimées en pourcentage.					Surface de l'étage m ²	Surface de l'étage en %
			Plâtre	marbre	moquette	verre	bois		
Mosquée Ennour	5382,98	622,14	71,16%	7,19%	18,53%	2,34%	0,78%	366,54 m ²	58,7%
Mosquée Ibn el arabi	9486,95	1036,84	71,86%	7,75%	16,19%	3,82%	0,38%	795,31 m ²	76,60%

a) Résultats du temps de réverbération des deux mosquées :

Les valeurs du temps de réverbération simulé pour les deux mosquées, sont calculées par EASE4.4 sur les bandes d'octave 125 à 10000 Hz. figure 9.

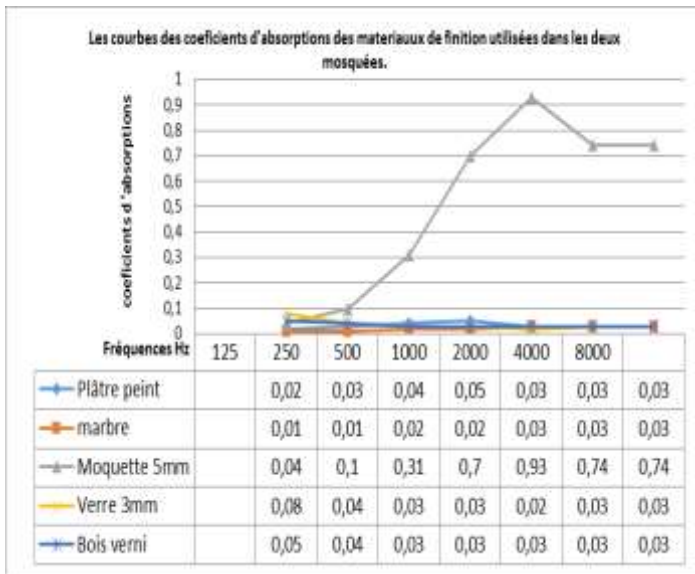


Figure.7 : Courbes représentant les coefficients d'absorption des matériaux des deux mosquées.

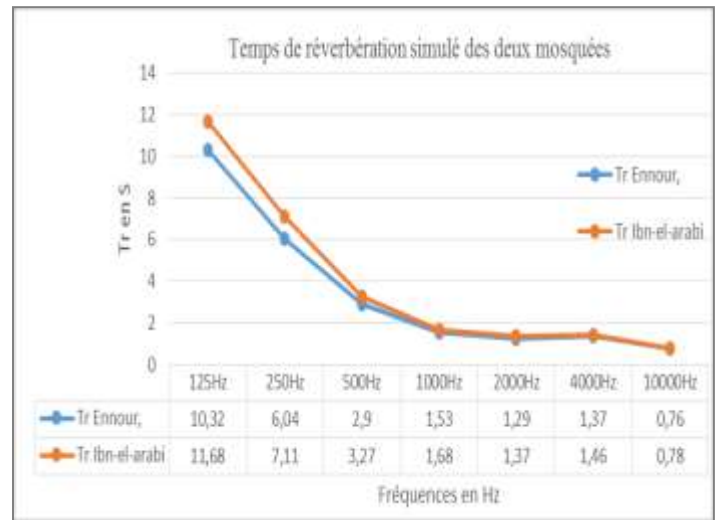


Figure 9 : Les valeurs du temps de réverbération simulées des deux mosquées.

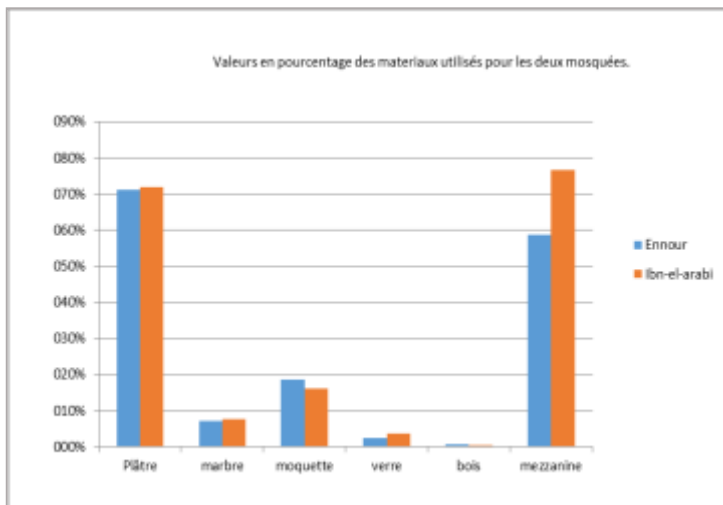


Figure.8. Histogramme des matériaux utilisés pour les deux mosquées

On observe une allure de la courbe de variation du Tr, en fonction des fréquences, très proche entre les deux mosquées. Le Tr_{500 Hz} (plus approprié pour la parole) pour les deux mosquées « Ennour » et « Ibn-el-arabi » est respectivement de **2,9 s** et **3,2s**. Ces valeurs sont supérieures à la valeur recommandée, calculée selon la formule de Knudsen (citée au II. a).

Mosquée Ennour : $Tr = 0.32 + 0.17 \log 5382.98m^3 = \mathbf{0.95 s}$

Mosquée Ibn-el-arabi : $Tr = 0.32 + 0.17 \log 9486.95m^3 = \mathbf{0.99 s}$

Les valeurs du Tr_{125Hz} atteignent les valeurs excessives, **11,6s** pour Ibn-el-arbi et **10,3s** pour Ennour ce qui est très élevé en comparaison à la valeur recommandée qui est de **1,1 s**. La valeur recommandée du Tr_{125Hz} , est majorée à plus 20% en rapport avec le Tr_{500Hz} [18].

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Tr	$Tr+20\%Tr$	$Tr+10\%Tr$	Tr	Tr	$Tr-10\%Tr$	$Tr-20\%Tr$

On note ainsi une différence considérable (d'une dizaine de seconde) entre la plage des basses et hautes fréquences. Ainsi pour les deux mosquées, où la parole est la fonction acoustique principale, on note un temps de réverbération long ce qui va engendrer le masquage des éléments essentiels de la parole et polluer l'intelligibilité. Suite à ces résultats, on procédera à une correction acoustique de l'espace de prière des deux mosquées, en vue de réduire la réverbération pour améliorer l'intelligibilité. Cet objectif peut être atteint par un traitement adéquat de certaines surfaces par des matériaux absorbants.

Tableau 4 : valeurs des durées de réverbération simulées et recommandées.

mosquées	Tr simulés	volume m3	Tr recommandé
ennour	2,9 S	5382,98	0,95s
ibn-el-arabi	3,2S	9486,95	0,99s

VI. Simulation pour optimiser le temps de réverbération :

Comme nous l'avons dit précédemment, le temps de réverbération dépend du volume de la salle et de la nature plus ou moins absorbante des parois qui le composent. Dans les mosquées on doit assurer un confort d'écoute, ceci nous incite à améliorer le critère d'intelligibilité et donc rechercher un temps de réverbération plus faible. Dans les deux mosquées simulées, l'utilisation de matériaux à faible coefficient d'absorption (donc réfléchissants) a engendré une réverbération excessive, nécessitant une correction acoustique, en vue de la diminuer. On doit alors agir sur les différentes surfaces du volume, en choisissant des matériaux plus absorbants. Avec EASE4.4 la modélisation peut être ajustée en activant la fenêtre de calcul interactif du temps de réverbération optimal ; permettant d'affecter de nouveaux matériaux aux différentes parois de l'espace, et d'évaluer la durée de réverbération.

On a opté pour un choix de matériaux disponible et peu onéreux, en procédant à un changement d'un matériau à la fois, afin de juger de la valeur de notre choix dans le processus d'amélioration du temps de réverbération. Enfin on a associé tous les matériaux choisis et comparé le temps de réverbération initial au temps de réverbération optimisé final. Pour ce faire nous avons axé notre choix

sur des matériaux possédant un coefficient d'absorption élevé afin de pallier à l'aire d'absorption manquante, surtout dans la plage des basses et moyennes fréquences. Les matériaux choisis (dans la base de données des matériaux de EASE), sont pour le sol : le tapis LPAD une moquette avec une sous face en caoutchouc et le tapis PAD, également une moquette, mais avec une sous face en mousse de caoutchouc, ce qui en fait un matériau plus absorbant aux fréquences moyennes comparé au tapis LPAD. En effet, le tapis PAD associe la face textile à porosité ouverte (absorbant les fréquences élevées) et la mousse de caoutchouc qui est un matériau poreux épais pour l'absorption des fréquences moyennes. Pour les fenêtres on a opté pour le vitrage « wind glass » avec un coefficient d'absorption passant de 0.03_{500Hz} pour le vitrage initial à 0.29. Enfin nous avons procédé à un remplacement de toutes les surfaces recouvertes de marbre par du plâtre, qui est un matériau plus absorbant aux fréquences moyennes propre à la parole (fig. 10).

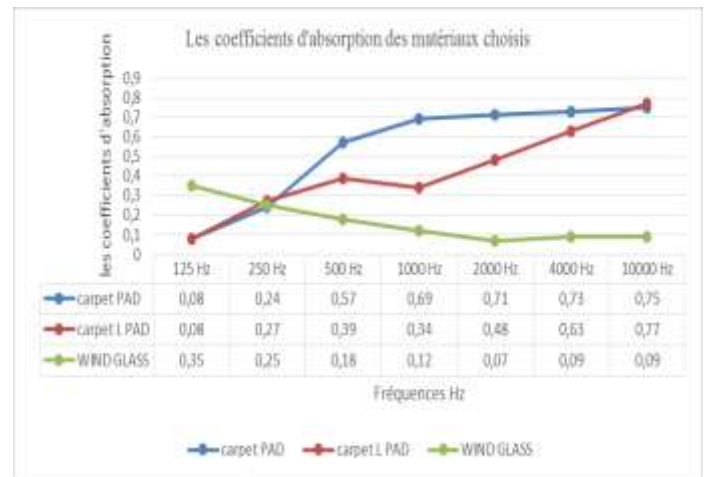


Figure 10 : valeurs des coefficients d'absorption de matériaux choisis.

a) Résultats de la durée de réverbération optimisée :

Les résultats du temps de réverbération optimisé final avec tous les matériaux apparaît dans les figures 11 et 12, respectivement pour la mosquée Ennour et Ibn-el-Arabi. On observe une nette amélioration du Tr_{500Hz} après le réaménagement effectué sur les matériaux de finition des deux mosquées. En procédant à un remplacement successif d'un matériau à la fois, on a observé que les résultats des deux mosquées présentent un Tr_{500Hz} le plus réduit **1,91s**, avec la moquette du type « carpet PAD » comparé aux autres changements de matériaux. Une analyse des résultats du temps de réverbération optimisé final, nous indique une nette amélioration du temps de réverbération aux fréquences médiums avec respectivement pour la petite et la grande mosquée un Tr_{500Hz} de **1,7s** et **1,8s**. Une très faible amélioration des valeurs du Tr est observée aux fréquences des sons graves avec respectivement pour la petite et la grande mosquée

un Tr_{125Hz} de 7,9s et 5,6s. Ces valeurs encore élevées, dépassent la valeur recommandée pour cette catégorie de volume qui est évalué à 1,1s. On remarque néanmoins que pour la petite mosquée le Tr_{125Hz} ne se réduit que de 2,64s, comparé au Tr_{125Hz} de la grande mosquée qui s'améliore de 5,68s. Ce phénomène s'explique par le fait que la grande mosquée possède une surface plus important de fenêtres vitrées, et le Wind glass (comparé aux autres matériaux), dans la plage des fréquences basses, possède un α sabine plus grand. (Fig. 10).

Les comparaisons des durées de réverbérations initiales et optimisées avec tous les matériaux, sont représentées pour les deux mosquées, sur les figures 13 et 14. Les améliorations du Tr sont très visibles sur les deux courbes, pour les moyennes et les petites fréquences. Dans la plage des hautes fréquences, les corrections n'ont pas apporté des résultats significatifs. Enfin dans le tableau 5, on a rassemblés les Tr optimisés et recommandés pour les deux mosquées. On constate que les résultats des durées de réverbérations après correction, sont plus proches des valeurs recommandées.

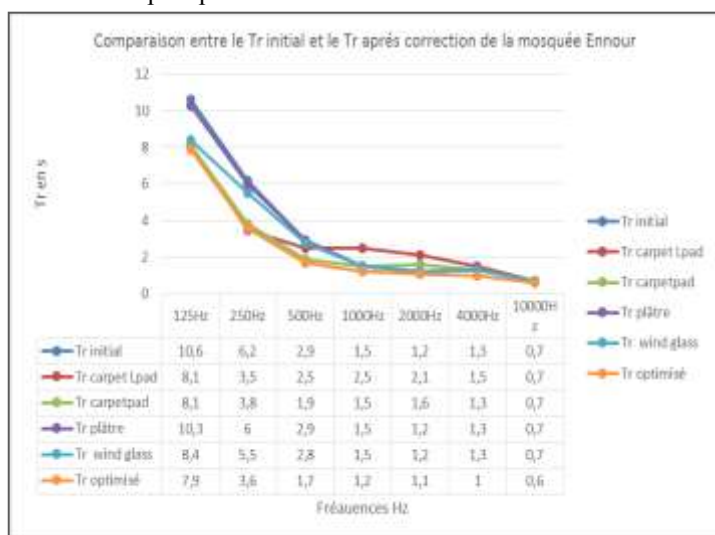


Figure 11 : les résultats du Tr optimisé avec tous les matériaux de la mosquée Ennour.

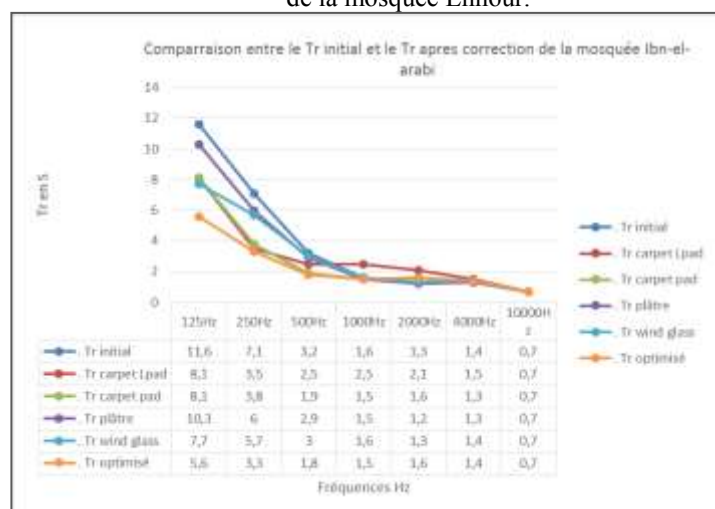


Figure 12 : les résultats du Tr optimisé avec tous les matériaux de la mosquée Ibn-el-arabi.

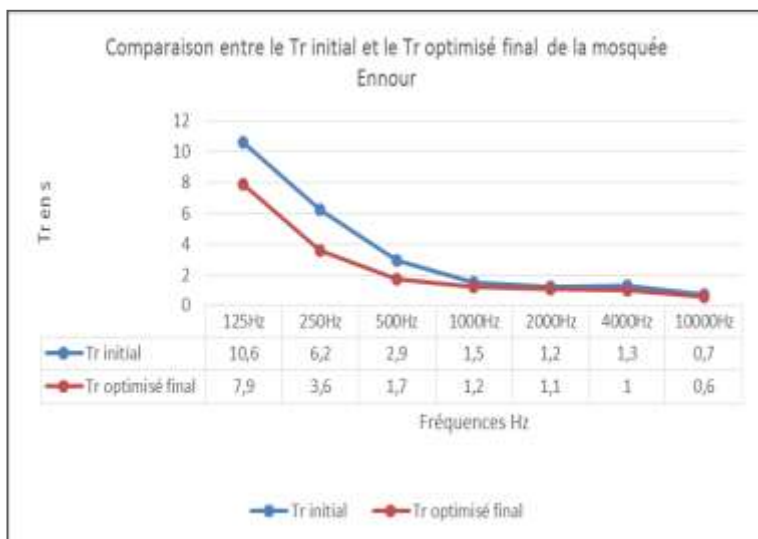


Figure 13 : Comparaison entre le Tr initial et le Tr optimisé de la mosquée Ennour.

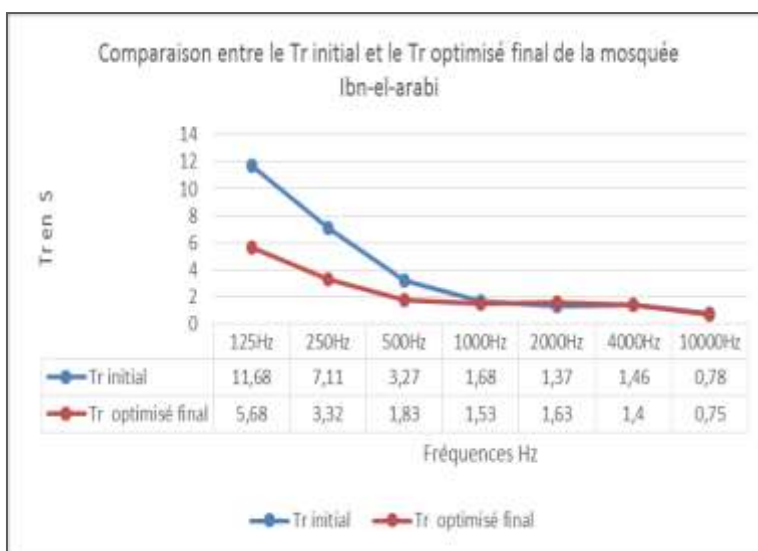


Figure 14 : Comparaison entre le Tr initial et le Tr optimisé de la mosquée Ibn-el-arabi..

Tableau 5 : Comparaison des temps de réverbérations optimisés et recommandés

Fréquences Hz	Tr optimisé Ennour	Tr optimisé Ibn-el-Arabi	Tr recommandé
125Hz	7,9	5,6	1,08
250Hz	3,6	3,3	0,99
500Hz	1,7	1,8	0,9
1000Hz	1,2	1,5	0,9
2000Hz	1,1	1,6	0,81
4000Hz	1,4	1,0	0,72

VII. Discussion des résultats :

Notre étude est un essai, qui ajouté à l'ensemble de la littérature scientifique ; permet dans un cadre général, d'amorcer l'exploration de ce nouveau champ d'investigation qu'est l'outillage de la simulation numérique, appliquée aux facteurs physiques des ambiances architecturales. La simulation numérique affirme l'importance pour les architectes, d'expérimenter cet outil pour l'étude des édifices déjà réalisés ou en phase de conception. Dans le cas spécifique de l'acoustique des mosquées, nos résultats complètent ce domaine de la recherche en mettant l'accent sur l'importance des matériaux de revêtement comme critère déterminant de la qualité acoustique évaluée par le temps de réverbération. Ce diagnostic a permis de nous renseigner sur l'importance et la contribution de certains matériaux, dans la qualité acoustique des mosquées. A la lumière des résultats obtenus, nous présenterons les remarques suivantes :

1. Les résultats du temps de réverbération le plus proche de la valeur recommandée a été obtenu en remplaçant la moquette simple par une moquette avec un coefficient d'absorption important aux fréquences moyennes, spécifiques à la parole. Le temps de réverbération s'est ainsi amélioré d'une seconde et quelques dixièmes. Concernant le choix des matériaux, on peut conclure que le choix d'une moquette appropriée, constitue un critère de taille à prendre en considération, pour assurer une qualité sonore optimale de la mosquée.

2. En comparant le temps de réverbération optimisé des deux mosquées avec le temps de réverbération initial dans les différentes plages de fréquences, on remarque que les améliorations ont été différemment optimisées en fonction des particularités conceptuelles de chaque mosquée. La grande surface de vitrage de la grande mosquée, a permis une amélioration importante du T_r dans la plage des fréquences basses.

3. On citera également le rôle de la structure porteuse de la mosquée qu'il est préférable d'alléger en optant pour de grandes portées, pour augmenter la surface du tapis (principal matériau absorbant). La réduction du nombre de poteaux (au-delà des premières réflexions), permet aussi d'améliorer la qualité sonore en réduisant les surfaces de réflexions du son

4. En analysant les variations du temps de réverbération optimisé en fonction des différentes plages de fréquences, moyennes, basses et hautes ; on remarque une amélioration dans la plage des moyennes et hautes fréquences ; par contre dans la plage des fréquences basses, les valeurs du temps de réverbération restent excessivement élevées, avec le double de la valeur recommandée. On peut aisément expliquer ce phénomène, par le fait qu'il faut plusieurs modes d'absorptions, donc plusieurs matériaux dans un local pour absorber uniformément sur tout le spectre. L'absorption dans les fréquences basses nécessite des matériaux tels que les membranes ou les résonateurs. [16], avec des mises en œuvre complexes. Dans le but de réaliser une absorption uniforme sur l'ensemble du spectre des fréquences il est

nécessaire d'utiliser un assemblage ou panachage de matériaux différents dans un même espace.

En conclusion, en vue d'une maîtrise du confort sonore dans les mosquées, une attention particulière doit être apportée aux différents éléments de l'espace, on citera en particulier les matériaux de finition, les ouvertures, les poteaux et la moquette du sol. Tous ces éléments peuvent constituer des pistes pour des recherches ultérieures.

REFERENCES

- [1] Zerhan, K. "Acoustical Problem In Mosques", March 16, Yildiz Tech University. (1999).
- [2] Abdou, A A. "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia". *Acoustical Society of America Journal*, Volume 113, Issue 3, pp. 1505-1517 (2003) <https://www.researchgate.net/> [Accessed October 2015]
- [3] Karabiber, Z G. "Acoustical problems in mosques: A case study on the three mosques in Istanbul". *Forum Acusticum*, Berlin, CDROM, 4 pgs. (1999).
- [4] Hammad, R. "RASTI measurements in mosques in Amman. Jordan", *Applied Acoustics* 30, 335-345. (1990). <https://sciencedirect.com> [Accessed October 2015]
- [5] Orfali W. "Room Acoustic and Modern Electro-Acoustic Sound System Design during Constructing and Reconstructing Mosques", These Doctorat, Berlin (2000).pp96-100.
- [6] Jouhaneau, J. « Acoustique des salles et sonorisation ». Ed. Tec et Doc Lavoisier. 2003.pp 61-211.
- [7] Remy, N. « maîtrise et prédictibilité de la qualité sonore du projet architectural Applications aux espaces publics en gare ». doctorat à l'École d'Architecture de Grenoble. Octobre (2001).
- [8] Mullan, Mc. R. "Environmental science in building" London. 1983.
- [9] krauss G, yezou R, kuznik F "cours acoustique du bâtiment INSA Lyon (.2009/2010).
- [10] Berg R.E & Stork D.G. (1995). *The physics of sound*, Prentice Hall.
- [11] Hamayon. L. « Comprendre simplement l'acoustique du bâtiment ». Ed Le Moniteur. 2013. P.77.
- [12] DTR C3.1.1, « Isolation acoustique des parois aux bruits aériens. Règles de calcul. Document technique réglementaire ». Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiments (CNERIB) (2004). Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme (MHU).

- [13] Abdou, A. A. "Comparison of the acoustical performance of mosque geometry using computer model studies", Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands August 11-14, (2003). <https://www.researchgate.net/> [Accessed October 2015]
- [14] License d'exploitation du logiciel EASE4.4, au nom de l'Université Constantine 3.
- [15] Kouzeleas, S. «développement d'un outil d'aide en simulation acoustique architecturale adaptable a un système de modélisation c.a.o. » (2002) Université Bordeaux l'école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur.
- [16] Mostefa Refat,I. "A parametric investigation of the acoustical performance of contemporary mosques". *Frontiers of architectural research* (2013) 2, 30-41 <https://www.sciencedirect.com>
- [17] Abdelazeez, M. et al.: "Acoustics of King Abdullah Mosque". *Fac. of Eng. and Tech., U. Jordan, Journal of Ac. Soc. of Am.*, Vol. 90, Sept. (1991). <https://www.sciencedirect.com>.
- [18] Delétré,J.J. « Acoustique : propagation en espaces clos » - École d'architecture de Grenoble – décembre 1, (2003) pp 7-10. cours en ligne.
- [19] Hossam Eldien, H. Al Qahtani, H "the acoustical performance of mosques main prayer hall geometry in the eastern province, Saudi Arabia". *Proceedings of the Acoustics (2012) Nantes Conference*
- [20] Lamoral.R. « Acoustique et architecture ». Ed Masson, Paris. 1975.