



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

L'ACOUSTIQUE DANS LES LIEUX DE CULTTE
cas des mosquées ottomanes en Algérie

THESE

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

Par
Mohamed Ladaoui Benferhat

Année Universitaire
2022-2023

INTRODUCTION GENERALE.

I. INTRODUCTION.

L'évolution de l'art de bâtir est d'autant plus complexe ; qu'elle se réapproprie les connaissances dans différents domaines ; culturel, sociologique, religieux et aussi environnemental. La manière avec laquelle ces éléments peuvent être conjugués, détermine la nature des productions architecturales.

La perception des usagers envers l'espace architectural, comme produit fini, passe, souvent, par un processus assez complexe et assez confus. En fait, il en résulte une expérience sensorielle ; correspondante à une sensation d'agrément, de satisfaction, ou même de désagrément. La perception est essentiellement relative à la nature de l'espace ; en l'occurrence, à son usage.

La notion d'usage, a évolué avec le développement de l'architecture. Les grands architectes de l'époque moderne ont exprimé une attention particulière à cette notion. A cette époque, dont la machine illustre l'apogée de la pensée humaine ; l'un des célèbres architectes ; Le Corbusier, prend la machine comme un modèle à suivre, jusqu'à considérer la maison comme une machine à habiter. Certes ; cette expression ouvre un autre débat sur la pensée de l'architecte ; ce qui n'est pas le sujet de cette thèse ; néanmoins, l'expression fut cruciale durant la première moitié du 20^{ème} siècle.

Plus tard, l'ethnographie du mot Usage ; a évolué avec d'autres architectes à savoir Hassan Fathy et Aldo van Eyck (Daniel Pinson, 2007). Après les architectes ; les théoriciens de l'architecture vont se précipiter pour établir un cadre référentiel de l'usage. L'analyse de l'espace architectural passe à une grande vitesse, pour se diversifier davantage, à travers les essais de Kevin Lynch, dans « l'image de la cité » à l'échelle urbaine, Bourdieu, dans ses travaux sur les villages kabyles et Raymond Haumont dans les « Pavillonnaires » (Daniel Pinson, 2007).

D'après Pinson, l'usage a un caractère versatile ; d'où l'intérêt vers l'aspect environnemental de l'architecture. Il est sans doute difficile de savoir à quel moment les historiens des arts se sont orientés vers les aspects environnementaux. Il est certain, qu'à travers les dernières décennies, nous constatons une ascension d'engouement envers la prise en charge de l'environnement dans l'acte de construire. L'ouvrage « *Architecture of the Well-Tempered Environment* » de l'historien britannique Rayen Banham, constitue un premier traité de l'histoire de l'architecture, selon une chronologie relative à la prise en charge des aspects environnementaux (Daniel Pinson, 2007).

Plusieurs travaux de recherches pluridisciplinaires, tentent d'apporter des réponses aux différents questionnements sur l'une des nouvelles missions des architectes, qui consiste à assurer une architecture, pas uniquement belle ou satisfaisante de point de vue plastique, mais aussi, une architecture en parfaite harmonie avec la nature. Partant du principe que la prise en charge de certains aspects est très ancienne ; beaucoup de chercheurs ; explorent les monuments historiques, en vue de réhabiliter le savoir des anciens, perdu avec le temps. Il s'agit de solutions architecturales passives aux problèmes relatifs à la thermique, à l'acoustique et à la lumière.

II. PROBLEMATIQUE.

L'étymologie du mot « environnement », dévoile plusieurs positionnements épistémologiques. Plusieurs concepts ont vu le jour, afin d'exprimer ce rapport entre usager, espace architectural et environnement physique.

L'évaluation des environnements physiques, prend en compte la fonction de l'édifice. En fait ; au-delà du simple confort des usagers ; une volonté d'exprimer une symbolique particulière, relativement à la particularité de l'espace. Il est évident ; que l'environnement physique qui prime dans un musée est la lumière ; de même pour une salle de concert ; l'importance est accordée à l'acoustique. Outre le confort, une conception réussie offre aux usagers une expérience irréaliste, chargée de symbolisme. C'est l'intention primordiale des lieux de culte. La plupart des travaux de recherche dans le domaine des caractérisations des environnements physiques dans les mosquées et églises, sont dédiées à l'éclairage et l'acoustique. La maîtrise de ces deux facteurs détermine la qualité de l'espace de prière en question.

Dans la présente recherche, il est question d'explorer l'acoustique dans les mosquées. Le son, comme la lumière, sont liés au culte musulman, car les pratiques religieuses se basent sur la **récitation** (lire et entendre) des textes sacrés « le Coran ».

L'histoire de l'architecture des mosquées, renseigne sur des réalisations somptueuses, en proportion avec l'importance de la dynastie, du gouverneur. Il était toujours question de réaliser l'édifice le plus spacieux et le plus glorieux. Cette volonté des gouverneurs devait s'accommoder avec les besoins sonore de l'espace.

Les édifices à grandes échelles et/ou à formes complexes ; risquent d'offrir des espaces non performants de point de vu sonore, empêchant ainsi, le bon déroulement des pratiques religieuses. Il est supposé que les édifices de petite taille ; comme les oratoires de prière, ne posaient pas de problème, contrairement aux fondations somptueuses, lieu des prières de l'Aïd, de Vendredi, nécessitant une attention particulière quant à la qualité sonore.

La prière collective ou en groupe, exige une voie unique, celle de l'Imam ; qui est le guide spirituel. Plusieurs pratiques religieuses, imposent une bonne intelligibilité.

Comment est-il possible d'assurer une très bonne qualité sonore, sans le recours aux moyens technologiques (amplificateurs, ...etc) ; dans de vastes salles de prière ?

Les scientifiques musulmans étaient les premiers à découvrir l'impact des corps des usagers sur la propagation du son dans un espace fermé (Muhammad Adil Afridi). Et que cette propagation s'effectue dans l'air sous forme d'ondes circulaires (Muhammad Adil Afridi). Mais le plus important, c'est qu'ils ont également été les premiers à expliquer le phénomène d'écho. Cela laisse supposer, qu'il existait un savoir spécifique au phénomène sonore. Ceci nous pousse à se demander s'ils avaient développé des mécanismes et/ou des procédés appropriés aux mosquées ? Comment résoudre la dualité de conception d'une salle de prière, à la fois vaste et de bonne performance sonore ?

En fait, depuis le livre IV de Vitruve, on constate que les anciennes civilisations ont développé des dispositifs différents pour assurer une bonne qualité acoustique notamment dans les milieux ouverts comme les théâtres. Les efforts des grecs, se sont poursuivis par les romains, et jusqu'aux musulmans, plus précisément, l'empire ottoman.

Toutefois, il est très difficile de trouver une source écrite comme témoin des performances réussies des musulmans dans le domaine de l'acoustique. En conséquence, il

Il y a beaucoup de travaux d'explorations sur les anciens édifices. Ces travaux se basent, essentiellement sur des campagnes de mesures in-situ, comme les explorations par simulation. D'autre part, les deux moyens d'investigation sont combinés pour une évaluation objective des environnements sonores des monuments (Magrini, A, Ricciardi, P, 2007).

Le projet CAHRISMA (*Conservation of the Acoustical Heritage by the Revival and Identification of the Sinan's Mosques Acoustics*); témoigne de l'aboutissement des conceptions de Sinan ; le grand architecte de l'empire Ottoman. Ce projet consiste en une comparaison entre plusieurs églises de style byzantin, avec les mosquées de style ottoman (Zerhan Karabiber, 2003).

Les œuvres de Sinan constituent une leçon d'acoustique architecturale, caractérisé par de grands volumes nécessaires à la propagation des ondes sonores. L'emploi de grandes coupes centrales, dans les mosquées ottomanes, est jugé parfois comme désavantageux du point de vue sonore ; car elles engendrent des réflexions tardives (Mutbul Kayili, 2005). Ce problème est résolu grâce à l'ingéniosité de l'architecte ; en adoptant un système de correction du temps de réverbération basé par l'introduction des jarres renversées. Ce dispositif permet l'absorption de l'excédent des réverbérations, en offrant ainsi une excellente intelligibilité sonore ; digne de la symbolique des mosquées. Ce système a été découvert grâce à **Beyhan Ercag**, lors des travaux de restauration effectués à la mosquée Sultane Ahmed (bleue) à Istanbul. L'intention de Sinan, a été confirmée plus tard, grâce à l'examen de ses manuscrits. En fait, il s'agit de plusieurs éléments combinés pour assurer un espace performant du point de vue acoustique. Les écrits, rapportent des solutions par rapport au type de toiture, de l'organisation spatiale, les articulations des formes, ainsi que la position et le nombre du *Mahfil* (mezzanines), utilisés pour répéter les différents ordres de l'Imam pendant la prière (Mutbul Kayili, 2005).

Le système acoustique dans les salles de prière dans les mosquées ottomanes réalisées en Turquie s'avère très développé. Les mosquées ottomanes en dehors de la Turquie semblent avoir le même cachet architectural ; sont-elles dotées aussi du même système acoustique ?

III. QUESTION DE RECHERCHE.

En Algérie, comme dans les autres pays du Maghreb, l'architecture islamique en générale, et celle des mosquées en particulier, est beaucoup plus inspirée des modèles Andalous. Tandis que, durant la domination des ottomans ; le paysage urbain de principales villes algériennes s'est enrichi par de nouvelles réalisations de style ottoman, se démarquant du reste des édifices de la ville.

L'Algérie à l'époque de la régence ottomane, qui s'est étalée sur trois siècles, est passée par plusieurs étapes. La fin du 18^{ème} siècle, plus précisément, sous le règne de Hussain Pacha, plusieurs opérations de construction, de reconstruction et d'agrandissement de mosquées existantes ont été lancées. Cela ne pouvait se concrétiser sans la main d'œuvre locale ; d'artisans Maures, d'origine andalouse, qui transmettaient leurs savoir faire de père en fils, ainsi que les chrétiens et les renégats vivants dans les villes côtières, et de la population locale. Une société riche et variée, génère une fusion de plusieurs techniques constructives.

Une architecture naissant du croisement de deux écoles de références différentes et de langage architectural aussi bien différents sur le plan syntaxique qu'architectonique. Une originalité émanant de sa sobriété autant remarquable que sa monumentalité. Un tel corpus suscite la curiosité scientifique et dévoile un nouveau regard sur l'évolution de l'architecture des mosquées. Une évolution régit par une mutation de dispositifs acoustiques dans les lieux de prière.

Existe-il un système acoustique aussi développé que celui de l'architecte Sinan, dans les mosquées réalisées en Algérie, sous la régence turque ?

IV. HYPOTHESES.

- 1/ les mosquées algériennes de style ottoman se caractérisent par le même environnement sonore.
- 2/ Les différentes altérations que subissent les mosquées empêchent la vérification de la présence de dispositifs acoustiques.
- 3/ les mosquées réalisées sous la régence turque, se caractérisent par l'emploi de solutions acoustiques qui émanent de la fusion du style local avec le style ottoman.

V. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.

Le présent travail de recherche vise la caractérisation des environnements acoustiques des mosquées algériennes de style ottoman, comme il tente ; à travers l'examen de différents documents historique, une vérification de l'authenticité de notre riche patrimoine.

Nous supposons qu'une approche environnementale, peut servir pour une restauration efficace de ces monuments ; car il ne s'agit pas d'un simple assemblage d'éléments architecturaux et architectoniques, mais bien plus ; d'un vécu spécifique à l'intérieur de ces espaces, qui nécessite une attention particulière.

Cette recherche, tente d'apporter des connaissances en acoustiques ; nécessaires pour toute intervention auprès de ces monuments. Comme elle envisage aussi, une exploration de l'importance de la morphologie des bâtiments sur la conception sonore.

Une lecture typologique permettra une mise en valeur du patrimoine architectural ottoman ; à travers l'examen des différents éléments architecturaux employés dans les édifices constituant notre corpus d'étude.

VI. METHODOLOGIE DE RECHERCHE.

Pour atteindre ces objectifs et répondre à la question de recherche, la présente thèse est structurée en six chapitres. Ces derniers reflètent une approche hybride entre caractérisation physique de l'acoustique et patrimoine architectural.

Le premier chapitre est orienté vers les généralités de l'acoustique des salles. Dans lequel, nous présentons une large explication des principes de propagation, de réflexions et d'absorption du son. Une tentative d'appréhender les critères déterminant la nature de l'environnement sonore ; tels que la configuration de l'espace, la forme des parois et/ou des détails, les matériaux de revêtement, ainsi que le volume. Pour à la fin du chapitre est dédiée à l'identification des principaux paramètres acoustiques pour une caractérisation de l'environnement sonore d'un espace architectural.

Le deuxième chapitre, se focalise sur l'acoustique des lieux de culte en général ; et celle des mosquées en particulier. A travers une lecture des différentes contributions scientifiques sur l'acoustique des églises, mosquées ; nous souhaitons arriver à une

compréhension objective des caractéristiques de l'environnement sonore relatif à chaque religion. L'usage de l'espace définit le déroulement des pratiques culturelles dans l'édifice ; en l'occurrence, la position de source(s), des usagers. Par conséquent, les pratiques culturelles conditionnent la production de l'environnement sonore. A la fin de ce chapitre, une synthèse sur l'environnement sonore des mosquées ottomanes est présentée ; ainsi qu'une identification des composants du système acoustique développé par Sinan (attributs, matériaux, formes, position de source).

Le troisième chapitre, est le pan entre l'acoustique et le patrimoine. Un positionnement épistémologique, pour expliquer notre approche, qui consiste en une caractérisation des environnements sonores, des mosquées classées patrimoine national. La démarche est basée sur les critères définis par la charte de Venise (authenticité, style, vocation) ; ainsi que la continuité du fonctionnement de l'édifice. Ces critères vont nous permettre de définir la liste des mosquées pouvant constituer notre corpus d'étude. Une délimitation de l'ère d'étude et du périmètre géographique va servir pour arrêter le corpus.

Le quatrième chapitre, présente une étude historique, et typologique des mosquées ottomanes en Algérie. Conformément aux critères définis dans le chapitre trois ; une sélection de huit mosquées à khotba de statut authentique a été faite. Elles sont réparties sur plusieurs villes ; essentiellement au Nord du pays. Elles seront présentées par ordre chronologique.

Le chapitre cinq, relate les différentes méthodes de prédictions des paramètres acoustiques, dont essentiellement le temps de réverbération. Comme il répertorie les différentes techniques de recherche pour évaluer les environnements sonores des salles de prière. A la fin de ce chapitre, le protocole a été défini. Trois techniques vont être employées pour une évaluation aussi bien qualitative que quantitative.

Le sixième chapitre ; présente l'ensemble des résultats de cette recherche, avec des interprétations en référence aux travaux antérieurs. Il s'avère que les mosquées algériennes, de style ottoman, avaient préservées une authenticité malgré les événements qui se sont succédés durant des siècles de leur existence. Bien qu'elles aient été construites par une communauté de rite hanéfite, elles sont toujours fonctionnelles. Les résultats dévoilent une ressemblance des environnements sonores, sur le plan qualitatif ainsi que quantitatif.

A la fin, la conclusion de la thèse vient apporter des réponses aux questions posées. Durant la préparation de la thèse, beaucoup d'obstacles ont été surmontés pour pouvoir aboutir à sa finalisation. Plusieurs mosquées ont été fermées pour des travaux de rénovation, ou en raison de leurs vétustés, en attente d'une éventuelle programmation d'opération de restauration future.

CHAPITRE I : PRINCIPES FONDAMENTAUX DU SON

INTRODUCTION.

La méthodologie adoptée pour réaliser cette thèse, consiste à explorer l'état de l'art de l'acoustique des lieux de culte. Afin de passer en revue la documentation existante sur la question de recherche, il s'avère impératif de clarifier des notions relatives à l'acoustique des bâtiments, pour permettre à l'auteur et aux lecteurs de cette recherche une conception harmonieuse quant à l'environnement sonore.

Dans ce chapitre une tentative de définir des principaux concepts spécifiques à l'acoustique architecturale en général a été entreprise et en particulier celle relative aux lieux de culte. Pour ensuite déterminer les principaux paramètres acoustiques à explorer étant l'objectif.

En acoustique ; les recherches tardives ont abouti à un grand nombre d'indicateurs. Il est indispensable d'expliquer lesquels de ces indicateurs sont susceptibles de renseigner sur l'acoustique des lieux de culte.

1.1. DEFINITION DU SON.

Le phénomène sonore est le résultat de va-et-vient des particules d'air autour de leurs positions initiales. Ce déplacement est provoqué par une pression exercée dans l'espace. Entre espace ouvert et/ou fermé, la propagation du son ne se reproduit pas de la même façon. Le son en champ libre se propage à partir de la source dans tous les sens librement sans obstacles ; tandis que la propagation dans les espaces fermés (les salles) est plutôt liée à l'environnement (objets aux alentours) de la source ; tels que les murs, le toit, le sol et même l'ameublement, ...etc. (Foteinou, 2013). La présence des ces différents objets dans la trajectoire des ondes sonores engendre un environnement sonore particulier à cette salle (Berjon, M, 2007). Dans le cadre de cette thèse, nous ne considérerons que le son dans les espaces clos.

En tant que principal vecteur des ondes sonores, l'air, de par ses caractéristiques (vitesse, mouvement ou orientation), détermine l'acoustique d'une pièce. Le son se mesure par la **Fréquence** (hertz), l'**Amplitude** et la **Longueur d'Onde** (Foteinou, 2013).

1.2. L'AUDITION.

1.2.1. PROPRIETES DE BASE.

Le son est audible par l'homme à un intervalle de fréquence allant de 20 Hz à 20 000 Hz (Long, M, 2005). L'oreille humaine est sensible, de manière extraordinaire, à de très petites variations de pression acoustique ($20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ or Pa), ce qui prouve la grande sensibilité, mais aussi la complexité de cet organe (oreille) et sa robustesse (Long, M, 2005). L'ouïe est le seul sens qui reste éveillé pendant le sommeil, et perçoit tous les sons.

En termes de décibels, l'homme peut entendre des sons à partir de 0 dB jusqu'à 120 dB ; ce dernier est donc considéré comme le seuil de douleur. L'oreille humaine est munie d'une protection contre les sons très forts, au-dessus du seuil d'audition (Long, M, 2005). Mais cette défense n'est pas totalement efficace, le temps de réaction étant de l'ordre de 0,5 milliseconde, ce qui ne permet pas d'arrêter certains signaux rapides comme les coups de feu (Long, M, 2005).

La sensibilité de l'oreille est impressionnante, car grâce à son mécanisme sophistiqué, elle est capable de reconnaître la nature du son en analysant tous les signaux auditifs (Long, M, 2005).

1.2.2. PROPRIETES DES SOURCES SONORES.

La source sonore se définit par sa **puissance** (niveau de puissance acoustique) exprimée en décibels (dB), sa **sensibilité**, sa **directivité** et son **intensité**. Plus le niveau de puissance sonore est élevé, plus la source est puissante. En fait, tous les paramètres acoustiques dépendent du niveau de puissance sonore de la source.

La sensibilité de la source est exprimée par la valeur du niveau de pression acoustique à un mètre (1 m) de la source (Long, M, 2005).

$$L_p = L_s + 10 \log J - 20 \log \left(\frac{r}{r_{ref}} \right) \dots \dots \dots \text{(Long, M, 2005)}$$

L_p = niveau de pression acoustique mesuré (dB)

L_s = sensibilité du haut-parleur (dB à 1 m pour 1 W alimentation électrique)

J = distance mesurée (m)

r_{ref} = distance de référence (m)

Tableau 1.1 Niveau de puissance de différentes sources sonores. (Source: Long, 2005)

POWER (Watts)	POWER LEVEL (dB re 10^{-12} Watts)	SOURCE
25 to 40 Million	195	Saturn Rocket
100,000	170	Ram Jet
		Turbo Jet Engine with Afterburner
10,000	160	Turbo Jet Engine, 7000-lb Thrust
1,000	150	4-Propellor Aircraft
100	140	
10	130	75-Piece Orchestra } Peak RMS Levels in Pipe Organ } 1/8 Second Intervals Small Aircraft Engine
1	120	Large Chipping Hammer
0	110	Blaring Radio Centrifugal Ventilating Fan (13,000 CFM)
0.1	100	Auto on Highway
0.01	90	Vane Axial Ventilating Fan (1500 CFM)
0.001	80	Voice - Shouting (Average Long-Time RMS)
0.000,01	70	Voice - Conversational Level (Average Long-Time RMS)
0.000,001	60	
0.000,000,1	50	
0.000,000,01	40	
0.000,000,001	30	Voice - Very Soft Whisper

Il faut distinguer deux types de sources : les petites sources dites **ponctuelles** et les sources **sphériques** (Long, M, 2005). La première est appelée source ponctuelle en raison de sa taille qui n'influence pas les mesures, elle transmet généralement l'énergie dans un champ libre. Pour les sources dites « *ponctuelles* » le niveau de pression acoustique diminue d'environ 6dB par rapport au niveau de puissance acoustique lorsque la distance se double (Long, M, 2005).

Le niveau de pression acoustique change avec la distance, ce niveau change aussi avec le changement d'orientation par rapport au centre de la source. En fait, la directionnalité de la source signifie le changement du niveau de pression en fonction de la position (orientation) d'un point donné (récepteur) (Long, M, 2005). La directivité n'a aucun rapport avec le niveau de puissance acoustique. La directivité d'une source peut être identifiée par le périmètre de la zone autour du centre de la source, où chaque point de ce périmètre a le même niveau de pression acoustique (Long, M, 2005).

Selon la directivité, les sources sont divisées en deux catégories : les sources unidirectionnelles, comme la voix humaine qui transmet l'énergie dans une seule direction, ainsi que les sources omnidirectionnelles, qui transmettent l'énergie sonore dans toutes les directions (360°). Cependant les sources peuvent avoir le même niveau de puissance sonore, mais pas la même directivité (Long, M, 2005). Pour distinguer la directivité d'une source donnée, il convient de calculer l'indice de directivité $D(\theta, \phi)$, mesuré en dB. En fait, la différence calculé (en décibels) exprime la directivité de la source (Long, M, 2005).

$$D(\theta, \phi) = L_p(\theta, \phi) - \bar{L}_p \dots\dots (Long, M, 2005)$$

$D(\theta, \phi)$: indice de directivité (gain) pour une telle direction (dB)

$L_p(\theta, \phi)$: Niveau de pression acoustique pour une telle direction (dB)

\bar{L}_p : La moyenne du niveau de pression acoustique de toutes les directions

(θ, ϕ) : certaines directions (angles°)

Le choix de directivité de la source est très important pour la prise des mesures in-situ. Une attention particulière doit être portée à la voix humaine ; pour les fréquences moyennes (500Hz-1kHz), car le niveau de pression peut présenter des différences considérables entre l'avant et l'arrière de la source (devant et derrière la source). Conformément à Kleiner ; la différence peut atteindre 5 dB aux fréquences de 1kHz. Autrement dit, l'orientation de la source (unidirectionnelle) peut être déterminante en termes de mesures acoustiques (Kleiner et al, 2010).

Enfin, l'intensité d'une source pourrait être définie en mesurant l'énergie propagée à travers une surface donnée, pour un temps déterminé (Long, M, 2005).

$$I(\theta) = \frac{E \cos(\theta)}{T S} = \frac{W \cos(\theta)}{S} \dots\dots\dots (Long, M, 2005)$$

$I(\theta)$ = Intensité (W/m²)

E = Energie contenue dans une onde sonore (N m/ s)

W = Puissance sonore (W)

S = Surface mesurée (m²)

T = Période de l'onde sonore (s)

θ = Angle entre la direction de la propagation et la surface normale.

L'intensité peut être à son maximum lorsque l'angle (θ) soit égal à 0, c'est-à-dire lorsque la source est orientée directement vers la paroi (surface).

$$I = \frac{W}{S} \dots (\text{Long, M, 2005})$$

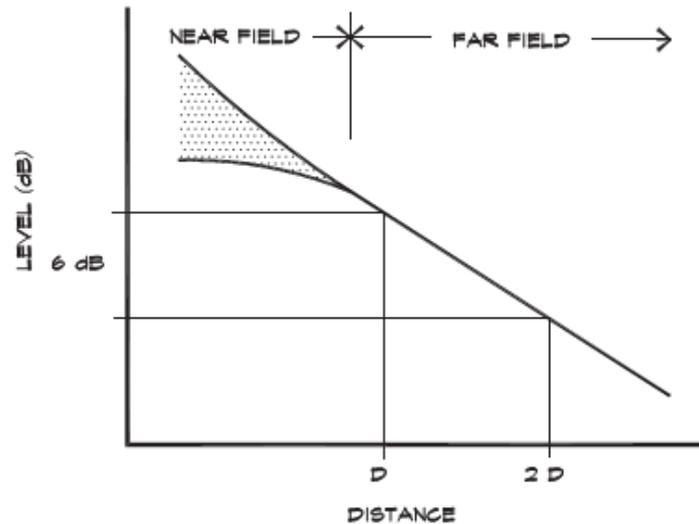


Figure 1.1. Niveau de pression acoustique en fonction de la distance pour une source ponctuelle. (source : Long, 2005)

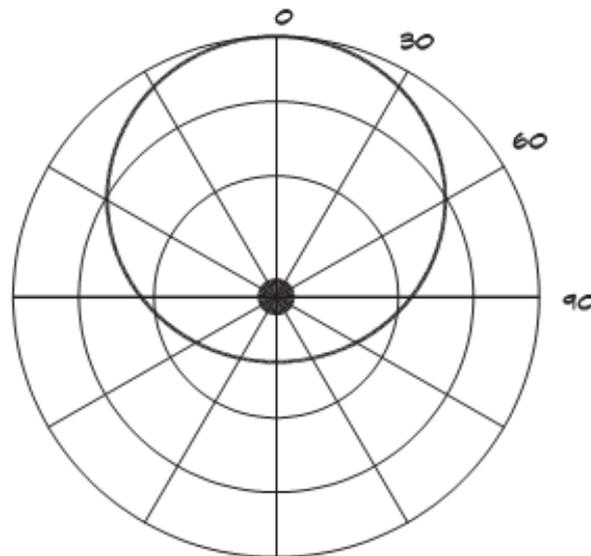


Figure 1.2. Directivité du son. (Source: Long, 2005)

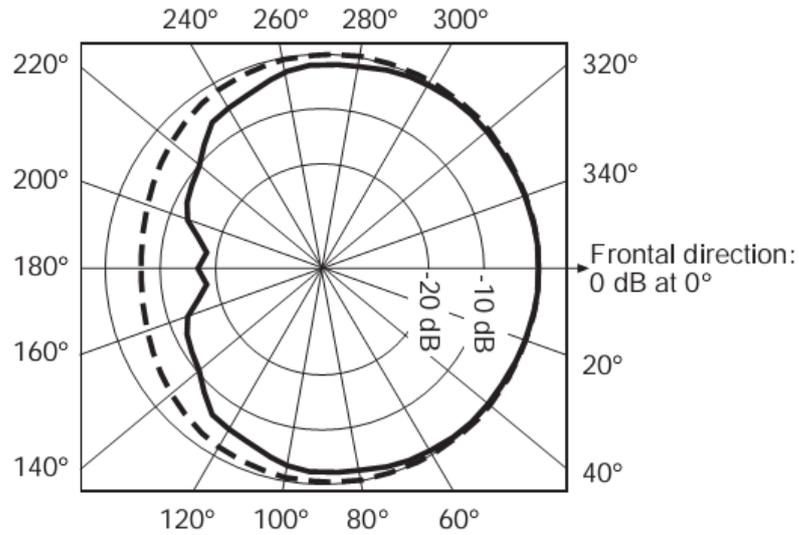


Figure 1.3. Le niveau de pression acoustique autour de la tête humaine. (Source ; Kleiner et al, 2010)

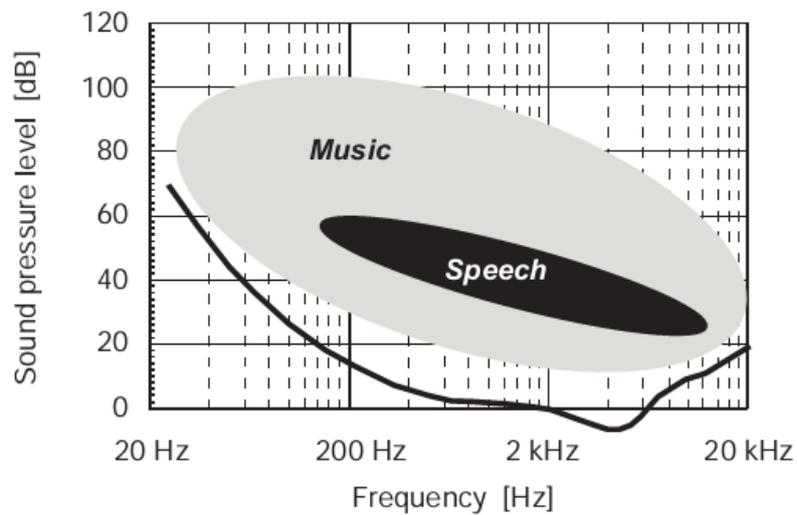


Figure 1.4. différences du SPL entre la parole et un orchestre de musique. (Source ; Kleiner et al, 2010).

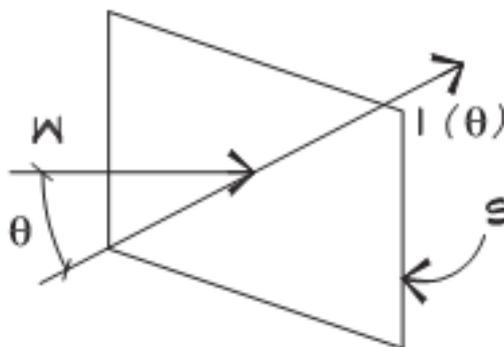


Figure 1.5. Angle d'incidence d'une onde sonore sur une surface rectangulaire. (Source : Long, 2005)

1.2.3. MASQUAGE ET BANDES CRITIQUES.

Dans son ouvrage «*Architectural acoustics* » ; Long se réfère à Scharf qui explique que l'oreille humaine ne peut pas distinguer des sons dans certains cas particuliers. La cochléaire (de l'organe de l'oreille) agit comme un filtre pour cacher les sons dans certaines fréquences particulières. Lorsque deux sons arrivent à l'oreille en même temps, la cochléaire, en tant que filtre de l'oreille, ne peut pas distinguer un son d'un autre à certaines fréquences ; ces fréquences sont appelées ainsi bandes critiques. La zone de dissimulation (chevauchement) est nommée bande passante. Plus les sons sont proches les uns des autres (de fréquences proches), plus la largeur de bande est importante. Pour de nombreux phénomènes, la largeur est d'environ un tiers d'octave (Long, M, 2005).

Les bandes critiques sont importantes pour la faculté d'écoute, car elles peuvent masquer certaines tonalités, notamment lors de l'écoute de musique. Pour information, les bandes critiques affectent le calcul de l'intensité sonore (Long, M, 2005).

Le son masqué doit augmenter son (amplitude) afin de se faire entendre en présence du masquant, cet intervalle est appelé le niveau de masquage. Pour la parole ; les masques sont les plus gênants aux basses fréquences, car ils dissimulent une gamme très importante du message vocal (discours) (Kleiner et al, 2010).

L'effet de masquage peut également se produire lorsque le temps séparant le son réfléchi et le son direct est trop court. L'oreille ne peut pas séparer l'un de l'autre, par conséquent le son direct sera renforcé par le son réfléchi. Le phénomène du masquage temporel dépend du niveau des deux sons ainsi que de la durée pendant laquelle l'énergie réfléchie persiste dans la pièce (Kleiner et al, 2010 ; Howard et Angus, 2013).

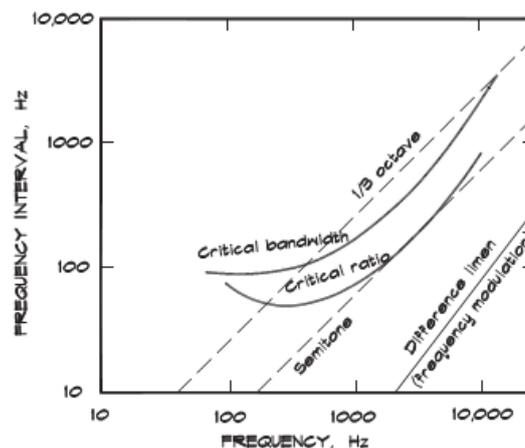


Figure 1.6. Les bandes passantes critiques de l'oreille. (Source : Long, 2005)

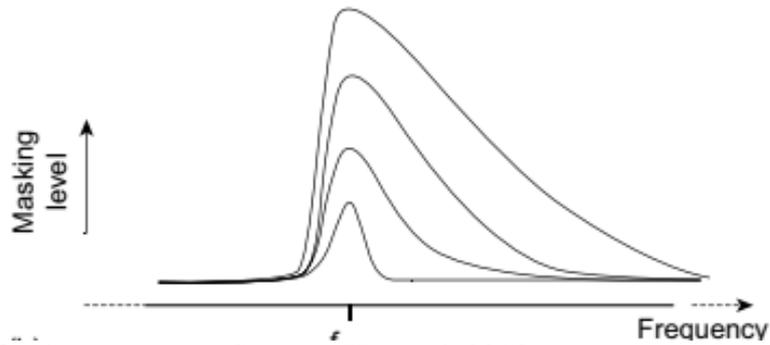


Figure 1.7. Effet de masquage. (Source : Howard, 2013)

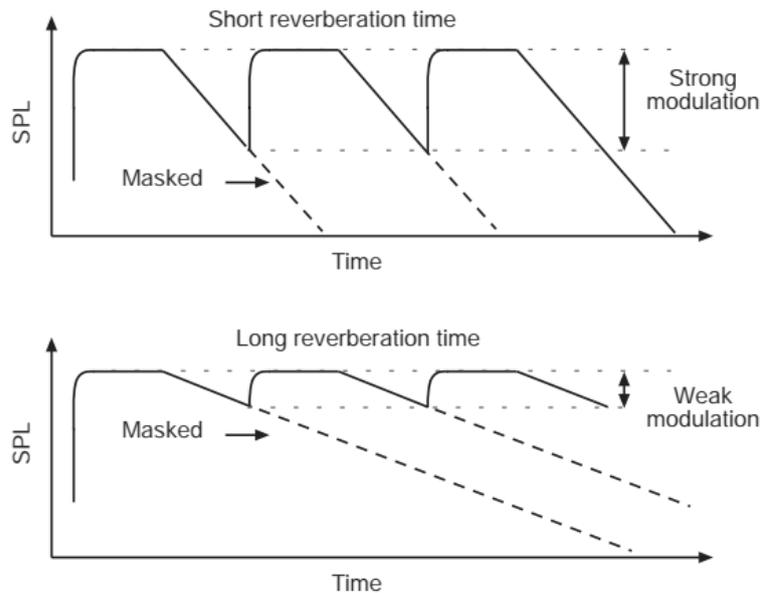


Figure 1.8. Effet de masquage dans le temps. (Source : Howard, 2013)

1.2.4. AGE ET AUDIBILITE.

Les recherches prouvent que la déficience auditive provient du vieillissement et/ou de la longue exposition à des sons forts (≥ 85 dB). Selon Kleiner (figure 9), plus l'âge avance, plus les défaillances pour avoir une audition claire deviennent importantes ; plus particulièrement à partir des fréquences moyennes (1kHz-2kHz) (Kleiner et al, 2010).

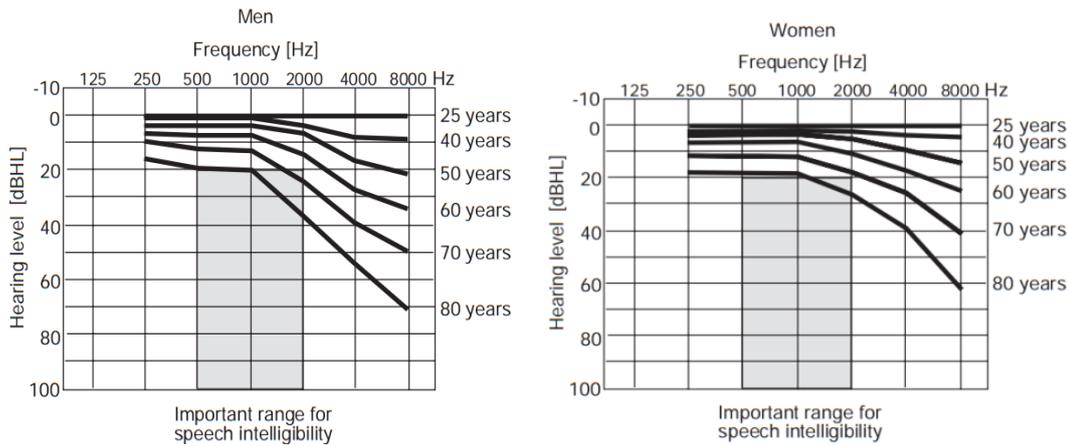


Figure 1.9. Seuil d'Audition dû à l'âge. (Kleiner et al, 2010)

1.3. ACOUSTIQUE DES SALLES.

1.3.1. PROPAGATION ET REFLEXION DU SON DANS UNE SALLE.

Le son et la lumière sont physiquement identiques ; leur propagation dans l'espace peut être présentée comme des rayons (selon les mêmes règles que l'optique). Le son se propage dans toutes les directions, traversant ainsi l'espace à travers un nombre infini de chemins, en fonction de l'énergie sonore de la source, de la géométrie et de la fermeture du champ (champ libre/acoustique des salles).

En champ libre, l'intensité de l'énergie sonore décroît avec la distance, ce qui signifie; plus la distance entre la source et le récepteur augmente, plus l'intensité du son diminue (Baumann et al, 2008 ; Kleiner et al, 2010). L'atténuation de l'intensité de l'énergie sonore est de l'ordre de $1/4$ lorsque la distance est doublée, et de $1/100$ lorsque la distance est 10 fois plus grande (Baumann et al, 2008). Dans cette thèse, notre intérêt se porte uniquement sur l'acoustique des salles.

Dans les espaces intérieurs (fermés), le récepteur (l'oreille humaine) perçoit une expérience différente du son. En raison de la grande célérité du son dans les espaces intérieurs (vitesse de l'air est de 340 m/sec (Baumann et al, 2008), l'énergie sonore sera perçue par l'auditeur de manière très rapide. En fait, l'oreille humaine est très sensible aux variations de temps, de qualité et d'intensité du son. Pour expliquer ce phénomène, supposons que l'énergie sonore, de la source à l'auditeur, se déplace sous forme d'ondes circulaires successives, c'est-à-dire que l'énergie sonore arrive à l'auditeur à différents moments ; de quelques millisecondes à quelques secondes ($t_0, t_1, t_2 \dots t_n$, etc.) ; sachant

que l'oreille reçoit plusieurs ondes sonores à différents moments (Baumann et al, 2008, Foteinou, 2013).

Au contact avec des objets, et en fonction des propriétés acoustiques du matériau; l'énergie sonore se répartit en trois catégories d'énergies : absorbée, transmise et réfléchi (Baumann et al, 2008 ; Kleiner et al, 2010).

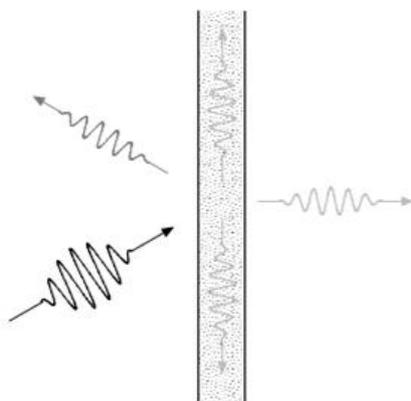


Figure 1.10. Energie sonore en contact avec un objet (absorbée, réfléchi et transmise).
(Source: Kleiner et al, 2010)

1.3.1.1. ABSORPTION.

Les matériaux sont employés en fonction de leur capacité à absorber l'énergie sonore. Cette capacité d'absorption dépend à son tour des propriétés acoustiques du matériau, de la surface de l'objet (taille) et de sa géométrie. Dans une pièce, tous les objets ayant une surface poreuse absorbent l'énergie sonore (comme les meubles et les personnes). L'absorption des personnes est relative : **i)** au nombre de personnes, **ii)** aux vêtements ; qui varient d'hiver en été, **iii)** à la position des personnes dans l'espace (sur un siège, debout, etc.). Les personnes peuvent manifester une absorption très importante, notamment lorsque la hauteur de la pièce soit inférieure à sa largeur (Baumann et al, 2008).

Le coefficient d'absorption du son est désigné par la lettre α , dont la valeur est fixée entre 0 et 1. Chaque matériau possède son propre coefficient d'absorption, variable en fonction de la fréquence. Sont rares les matériaux qui présentent le même coefficient (α) quelle que soit la fréquence. Souvent les matériaux présentent une grande différence entre les basses et les hautes fréquences (exemple des rideaux et des bois légers) (Kleiner et al, 2010).

La surface d'absorption effective est symbolisée par la lettre A ; avec $A=\alpha*S$ (surface en m²). Donc, pour calculer l'absorption totale, il faut calculer :

$$A=\alpha_1*S_1+\alpha_2*S_2+\alpha_3*S_3+ \dots+\alpha_n*S_n \text{ [4, 6].}$$

1.3.1.2. REFLEXION ET DIFFUSION.

Parallèlement à l'absorption partielle de l'énergie sonore, une autre fraction de l'énergie sonore est réfléchi par la surface du matériau. La réflexion du son par les surfaces peut s'expliquer selon les lois de l'optique. La réflexion aura le même angle d'incidence (θ) ; la paroi fonctionne comme un miroir. Ici, la forme de la surface (plane, concave ou convexe) influence la largeur de l'énergie réfléchi (tant que la surface est plane et beaucoup plus grande que la longueur d'onde du son) (Kleiner et al, 2010). Le son peut être dispersé si la surface de l'objet est lisse.

Le son peut être réfléchi de manière spéculaire ou diffuse en fonction des caractéristiques des matériaux. Quant la diffusion ; un coefficient de diffusion δ [compromis entre 0-1] correspond aux matériaux utilisés. Les surfaces intérieures (murs, fenêtres, sols...etc) réfléchissent ou diffusent les rayons sonores en fonction de leurs caractéristiques géométriques (plates, convexes ou concaves) ; de leurs dimensions (largeur) ; de leur texture (lisse, poreuse...etc) et enfin de leur qualité d'absorption. La géométrie de la surface est responsable de la directionnalité des rayons réfléchis.

La réflexion de l'énergie sonore dépend aussi de la largeur des parois. Précisément, la largeur de la surface détermine si l'objet peut réfléchir le son ou il passera à travers. En fait, la largeur de l'objet doit être plus grande que $\frac{1}{2}$ de la longueur d'onde λ pour réfléchir spéculairement l'énergie sonore. Plus la surface de l'objet est grande par rapport la longueur d'onde, plus la réflexion est longue. Si l'objet est plus petit que la longueur d'onde, le son passera à travers (figure 13) (Kleiner et al, 2010).

La texture des parois de l'objet détermine si l'énergie sonore (non absorbée par le matériau) sera réfléchi ou diffusée. En fait, il existe une relation paradoxale entre le coefficient de diffusion δ et le lissage de la surface du matériau (surface effective des irrégularités des parois/ longueur de l'onde sonore); plus la surface est lisse, plus le coefficient de diffusion δ est petit (Kleiner et al, 2010 ; Foteinou, 2013 ; Howard et al,

2013). Le coefficient de diffusion δ comme le coefficient d'absorption α varient en fonction des fréquences (voir figure14).

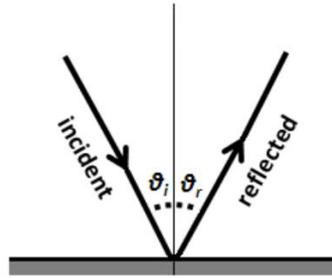


Figure 1.11. Angle d'incidence ϑ de l'énergie sonore sur la surface du plan. (Source : Foteinou, 2013)

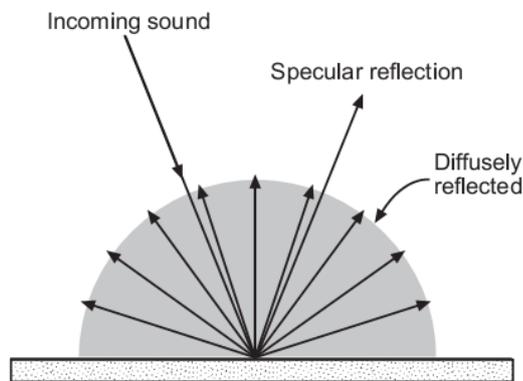


Figure 1.12. Énergie sonore réfléchie. (Source : Kleiner et al, 2010)

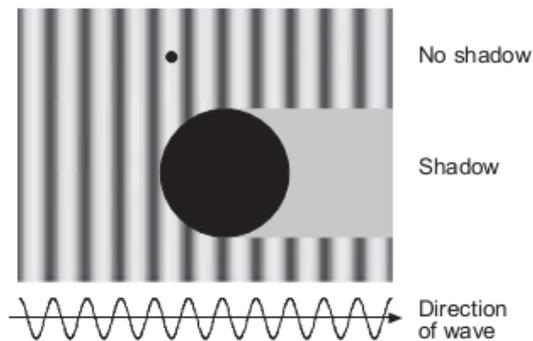


Figure 1.13. la longueur d'onde sonore via la surface de l'objet. (Source : Kleiner et al, 2010)

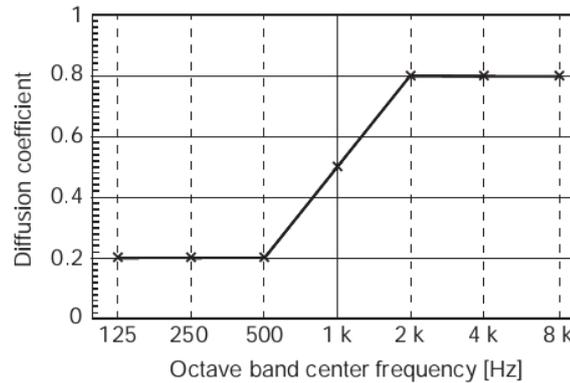


Figure. 1.14. diffusion typique des matériaux en fonction de la fréquence. (Source : Kleiner et al, 2010)

1.3.2. PERCEPTION DES REFLEXIONS DANS LES ESPACES FERMES.

Dans les espaces clos, les ondes sonores proviennent de la source sonore (son direct) à laquelle s'ajoutent de nombreuses réflexions provoquées par le contact de l'énergie sonore avec différentes parois (murs, fenêtres, plafonds, sièges, etc...). Les êtres humains ont la faculté de distinguer entre les différentes réflexions; et les acousticiens relatent ce phénomène physique comme suit:

1.3.2.1. ÉNERGIE SONORE DIRECTE.

Elle provient directement de la source sonore à l'auditeur (sans aucun contact avec des obstacles). Sur le plan physique, elle est identique à la propagation du son dans un champ libre (Foteinou, 2013). En raison de l'absorption de l'air et de la loi des carrés inverses (*inverse square law*), le son direct arrive à l'auditeur avec moins d'énergie. Le niveau de son direct est un indicateur pour évaluer la clarté et l'intelligibilité du son dans les espaces, comme il aide à identifier la position de la source sonore (Baumann et al, 2008 ; Howard et al, 2010 ; Foteinou, 2013).

1.3.2.2. REFLEXIONS PRECOSES.

Les réflexions précoces sont les premières réflexions provoquées par le contact du son avec les objets les plus proches à la source sonore (généralement les surfaces entourant la source sonore). Elles arrivent à l'auditeur (récepteur) après environ 80ms à 100 ms (Baumann et al, 2008). Les premières réflexions sont différentes de l'énergie sonore directe dans le temps et dans la direction (Howard et al, 2010). Etant le résultat des réflexions à partir des objets ; les premières réflexions changent avec le déplacement de la source et le

changement de la position des récepteurs dans l'espace (Howard et al, 2010). Si quelques-unes de ces réflexions sont très différées, c'est-à-dire une différence de longueur totale du trajet supérieure à environ 30 millisecondes ; une sensation d'écho sera perçue (Howard et al, 2010). Ce temps (intervalle) entre le son direct et les premières réflexions renseigne sur la taille de la pièce (Baumann et al, 2008).

Les réflexions précoces peuvent à la fois réduire l'intelligibilité pour la parole, et provoquer des changements de timbre non désirés, pour la musique (Howard et al, 2010). L'auditeur perçoit le son comme plus lucide et plus intense au fur et à mesure que l'intervalle entre les séries de réflexions se rapproche, dans une fourchette de temps de 50 à 150 millisecondes environ (Baumann et al, 2008).

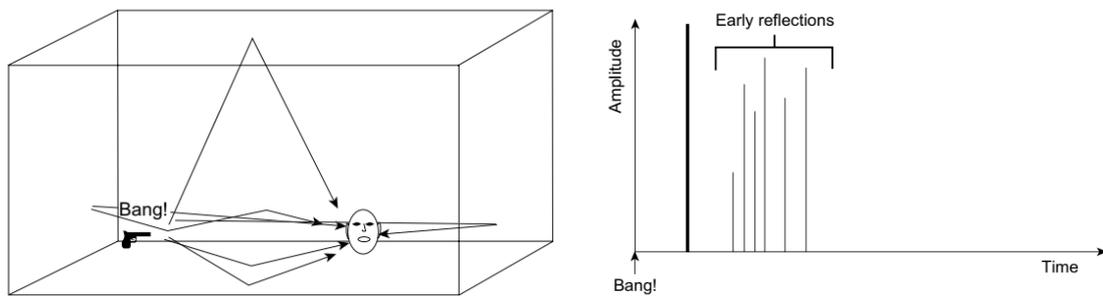


Figure 1.15. Réflexion précoce des énergies sonores. (Source : Howard, 2013)

1.3.3. ÉLÉMENTS ARCHITECTURAUX (VOLUME, FORME DU TOIT, FORME DES MURS, FERMETURE D'UN ESPACE), MATERIAUX.

L'Architecture des espaces sacrés exprime un symbolisme très riche. Au cours des siècles, la principale préoccupation a été de développer la forme architecturale et d'assurer un bon fonctionnement (acoustiquement) des édifices religieux. Quelle que soit la religion, chrétienne, judaïque ou musulmane, les édifices religieux sont conçus (en utilisant divers moyens) pour assurer un environnement acoustique propice à la prière.

Baumann dans "*Acoustics in Sacred Buildings*" illustrent différents choix de conception architecturale en évoquant l'impact sur l'acoustique. Dans ce qui suit, une tentative est faite pour résumer la littérature traitant de l'impact du volume, du toit et de la forme de l'espace sur l'atmosphère acoustique à l'intérieur des bâtiments (Baumann et al, 2008).

La qualité de l'acoustique dépend du volume de l'espace. En fait, il existe une relation transitive entre le volume et le gain d'énergie dans l'espace; plus le volume est grand, plus

l'énergie sonore est stockée dans l'espace. Le volume conditionne le temps de réverbération optimal pour un tel espace (voir section 4.2 sur le temps de réverbération). La relation entre le volume et le temps de réverbération est strictement adaptée à l'usage des bâtiments et à l'expérience acoustique envisagée par le concepteur. Pendant le processus de conception, le volume de l'espace est déterminant, car il est en harmonie avec les surfaces qui délimitent l'espace. Un autre détail est également important, à savoir le volume par personne (ou par siège). Maekawa et Lord (1994) ont déterminé le rapport recommandé; Volume-personnes (V/C), pour un meilleur environnement acoustique dans une salle.

L'espace fermé est utile pour l'intelligibilité du son, car la fermeture, contrairement à l'espace ouvert (champ libre), bénéficie du gain des premières réflexions qui amplifient le niveau sonore, permettant ainsi de transmettre le son sur de plus longues distances. Cependant, les réflexions ultérieures provoquent un temps de réverbération plus long, ce qui produit des problèmes d'écho (Abdou, 2003). La délimitation de l'espace est définie par sa géométrie, forme des murs et le toit.

La géométrie de l'espace (carré, rectangle, cercle ...etc) a fait l'objet de nombreuses études. Sachant que l'énergie sonore est transmise dans l'espace sous forme d'ondes circulaires ; son contact avec les parois entourant la source (murs, toit et sol) détermine la manière dont le son est perçu. Un bon compromis entre la source (puissance, position et directivité) et la taille des espaces (longueur, largeur et hauteur) détermine la qualité de l'intelligibilité à l'intérieur des salles.

Une source sonore ne produit pas la même ambiance sonore entre forme simple ou une composition de plusieurs formes (formes intercalées), où dans un espace vaste ou étroit, dans un espace ouvert ou fermé ; en fait, le son ne sera pas entendu de la même manière. Si la hauteur d'un espace est inférieure à la moitié de sa largeur, le paramètre acoustique (temps de réverbération) sera considérablement affecté une fois l'espace est entièrement occupé (Baumann et al, 2008).

Tous les éléments architecturaux à l'intérieur d'une pièce participent à la réflexion de l'énergie sonore à l'intérieur. Néanmoins ; le toit, les murs et même les colonnes et les piliers ont un impact différent sur la propagation du son.

Étant des miroirs de l'énergie sonore; les murs par leur forme (concave, convexe ou droite) affectent de manière différente l'atmosphère acoustique. A l'intérieur des espaces, le

changement de la position de la source sonore par rapport aux parois réfléchissantes peut modifier entièrement l'environnement acoustique (Long, M, 2005 ; Baumann et al, 2008). Au fond des espaces intérieurs, il recommande d'éviter les murs de forme concave, afin de minimiser la concentration de l'énergie sonore dans un point focal. Alors que les surfaces convexes; peuvent être attachées aux murs parallèles à la source pour diminuer les échos parasites, car elles dispersent l'énergie sonore (Long, M, 2005 ; Orfali, 2007 ; Baumann et al, 2008).

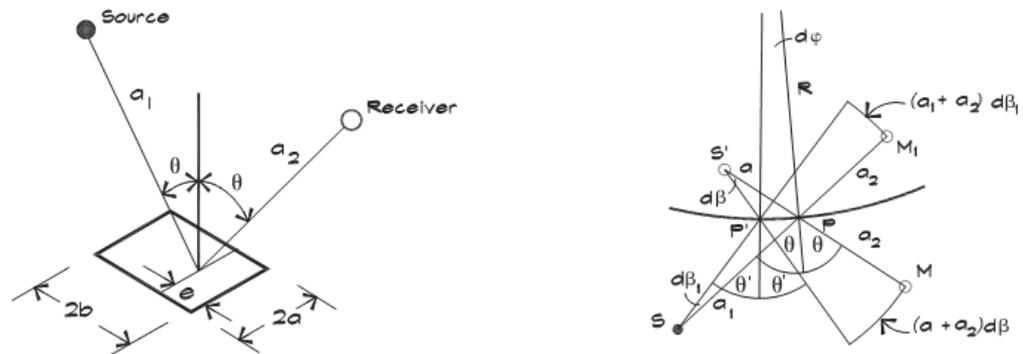


Figure 1.16. Impact de la courbure du mur (plat, concave ou convexe) sur la réflexion du son. (Source : Long, 2005)

L'une des formes les plus populaires dans les bâtiments religieux de l'histoire est la coupole. Il est certain que le dôme, en tant que couverture, devrait avoir une influence sur l'acoustique de la pièce. De nombreux chercheurs ont entrepris des recherches afin de définir si le dôme a une contribution positive ou négative sur l'ambiance acoustique. Pour certains, dans les bâtiments religieux classiques (sans système électro-acoustique), les coupoles constituent un amplificateur naturel pour poursuivre la propagation du son dans tout l'espace, ce qui est nécessaire pour comprendre le discours ou la prière (Baumann et al, 2008); pour Baumann, Le dôme assure un temps de réverbération plus long, sans affecter la clarté de la parole. Tandis que Mutbul Kayili (Kayili, M., 2005) juge les dômes comme des "**formes incommodes en acoustique**" car ils sont à l'origine des échos constatés dans certaines mosquées, en raison des réflexions tardives de l'énergie sonore dans la salle (à cause de la suppression des vases acoustiques).

Les espaces couverts par des demi-coupoles peuvent faire l'objet d'une absorption sonore supplémentaire, ce qui ne peut pas être prédit que par des moyens sophistiqués ; d'où le recours aux simulations numériques (Prodi et al, 2001).

Il est évident que la forme des coupoles, étant une couverture d'espace, elles influencent l'acoustique des espaces en question, pour cela, il est vital de savoir comment et quand la coupole peut être utile ou non pour l'acoustique ; notamment pour les lieux de culte.

Parmi les recherches élaborées pour apporter plus d'explication sur l'usage de coupole ; on peut se référer à Orfali. Dans cet article, il entretient le rapport entre la hauteur de la source et la hauteur des récepteurs (hauteur source-récepteur) avec la taille de la coupole (rayon). A la fin un ratio s/r a été défini. Sa valeur doit être supérieure à 1,1 pour assurer une harmonie entre la hauteur de focalisation (e) et la hauteur de la source sonore (Orfali, 2007) (figure 17).

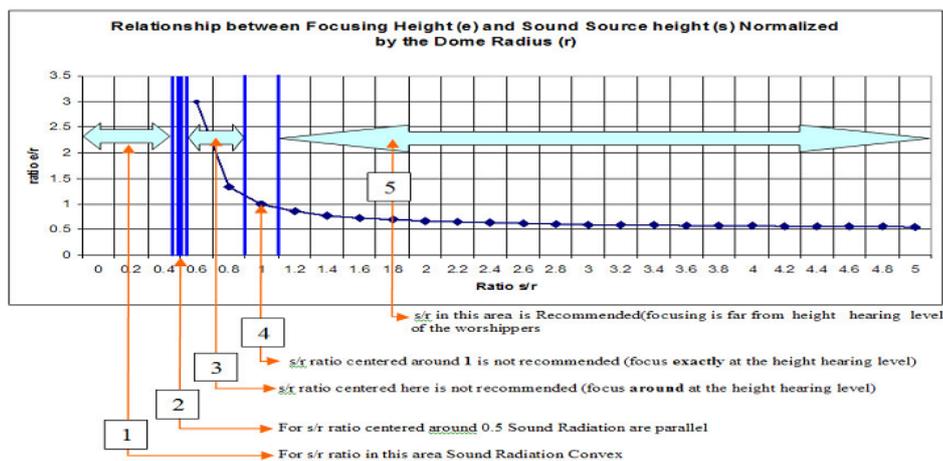


Figure 1.17. Relation entre la hauteur de focalisation (e) et la hauteur de la source (s) normalisée par le rayon du dôme (r). (Source : Orfali, 2007)

Le matériau, outre le volume, constitue un critère clé pour une bonne qualité acoustique. La nature du matériau (choix) détermine les taux d'absorption, la réflexion, de diffusion et de la réfraction de l'énergie sonore. En fait, la surface du matériau vibre en réaction de l'énergie sonore, obéissant aux règles de transfert d'énergie (Foteinou, 2013). En plus du coefficient d'absorption α ; le matériau selon la nature de sa surface (lisse, poreuse, ...etc) pourrait influencer la diffusion de l'énergie sonore. L'explication de la façon dont le son est diffusé/absorbé ou réfracté a été abordée précédemment. Les matériaux sont généralement choisis en fonction de leur coefficient d'absorption, qui varie avec les fréquences. Chaque matériau a un rendement dans les basses, moyennes ou hautes fréquences (voir 3.1- Propagation et réflexion du son dans une salle).

1.4. PARAMETRES D'ACOUSTIQUES.

L'Acoustique est une science consacrée à l'étude du son, permettant ainsi de développer des paramètres acoustiques susceptibles d'expliquer les phénomènes sonores de manière objective. Etant une thèse en architecture, il est utile d'en rappeler les principaux paramètres liés à l'acoustique architecturale.

1.4.1. LA REPONSE IMPULSIONNELLE.

Tout espace est calme à la base, et ne présente aucune particularité sur le plan acoustique jusqu'à ce qu'il soit excité par des signaux sonores (bruits). La réponse Impulsionnelle (RI) consiste à enregistrer la réaction d'une salle excitée par un signal spécifique (balayage sinusoïdal). Le signal doit être suffisant pour stimuler la salle à toutes les fréquences (de 63Hz jusqu'à 8kHz). La réponse de la salle à cette excitation sera enregistrée afin de l'analyse pour comprendre les caractéristiques acoustiques de l'espace en question. La Réponse impulsionnelle (IR) a un vaste usage dans le domaine de l'acoustique, car elle permet l'évaluation de l'environnement acoustique des espaces existants, tout comme elle permet la prédiction des paramètres acoustiques pendant le processus de conception (Long, M, 2005).

Mathématiquement, la réponse impulsionnelle de la pièce (RIR) peut être définie par la fonction Delta de Dirac comme suit:

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$$

Avec la condition: $\int_{-x}^x \delta(t)dt = 1$ (Foteinou, 2013)

Le balayage sinusoïdal généré en entrée pour enregistrer la réponse impulsionnelle d'une salle donnée est caractérisé par un intervalle de fréquence allant de 20Hz à 20000 Hz, d'une durée déterminée et d'une amplitude reconnue.

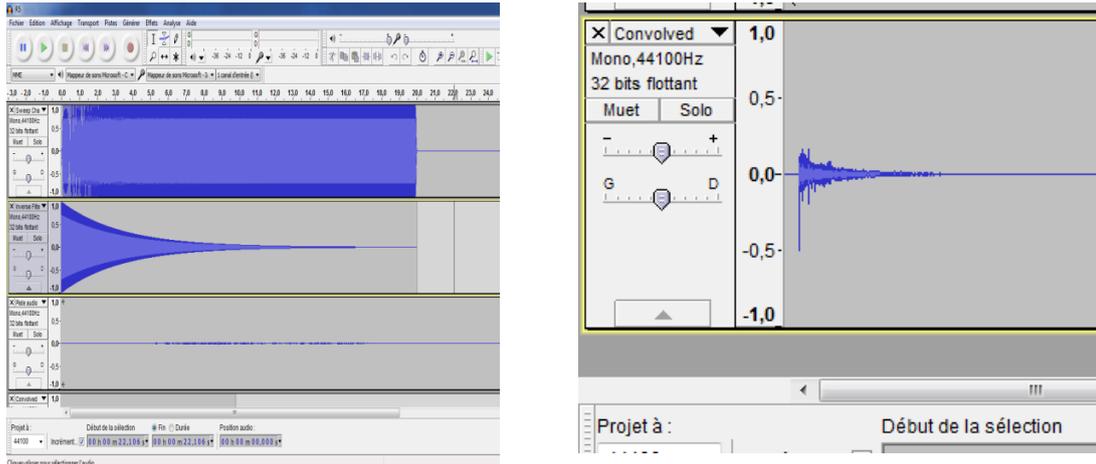


Figure 1.18. Les étapes pour générer une réponse impulsionnelle à l'aide d'un logiciel (le logiciel Audacity). (Source : Auteur)

1.4.2. TEMPS DE REVERBERATION.

Le temps de réverbération, conventionnellement T , est le paramètre d'acoustique le plus important en acoustique des salles. Il a été expliqué précédemment que la source sonore génère un signal qui excite la pièce (son direct). En conséquence de cette excitation, les surfaces à l'intérieur de la pièce recevant un signal sonore vont absorber une partie de l'énergie sonore. Le reste va être réfléchi sous forme de réflexions pendant un certain temps, même après l'arrêt de la source sonore (de quelques millisecondes à quelques secondes). L'énergie réfléchi diminue en fonction de deux principaux facteurs ; à savoir, le volume de l'espace et le coefficient d'absorption (α).

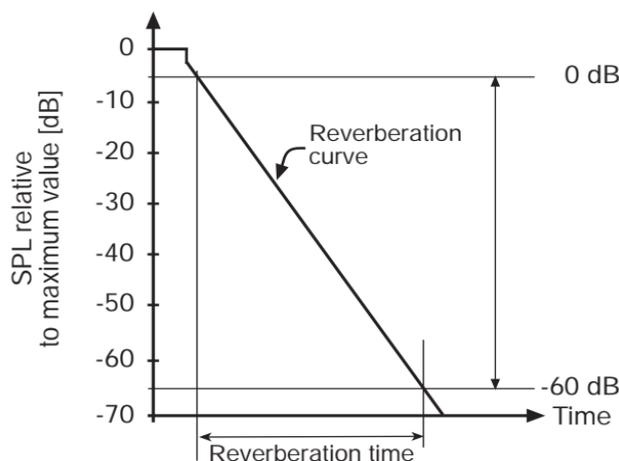


Figure 1.19. Temps de réverbération (T_{60}). (Source : Kleiner et al, 2010)

Par définition, le temps de réverbération (T_{60}) est l'intervalle de temps mesuré à partir du moment de l'arrêt de la source sonore ; jusqu'à diminution du niveau de pression acoustique dans la salle de 60dB (figure19). Cette information (T_{60}) permet la qualité acoustique de l'espace en se référant aux exigences acoustiques relatives à l'usage de cet espace.

Dans certains cas particuliers, il est impossible de mesurer T_{60} , car le niveau de pression (SPL) mesuré est inférieur à 60dB (pour plusieurs raisons ; parmi lesquelles une forte absorption par les matériaux). Dans ces cas, il est recommandé d'extrapoler la courbe de décroissance d'environ 5 dB à 25 dB pour un temps de réverbération mesuré, communément appelée T_{20} , ou une décroissance de la courbe de niveau sonore de 5 dB à 35 dB, pour obtenir T_{30} (ISO 3382-1). Comme il s'agit d'une extrapolation, les valeurs de T_{60} , T_{20} ou T_{30} peuvent être utilisées de la même façon.

Le temps de réverbération est étudié car il renseigne sur les acoustiques des salles. Les valeurs obtenues doivent être optimales ; en référence aux graphiques préétablis pour les bâtiments ayant un usage acoustique spécifique. Cependant, il existe bel et bien des bâtiments pour lesquels il n'y a pas encore de valeurs optimales pour le temps de réverbération. Lorsque les valeurs du temps de réverbération s'éloignent des valeurs optimales ; des corrections acoustiques sont recommandées dans les espaces concernés.

Pour prédire (calculer) le temps de réverbération, de nombreuses formules ont été développées, mais la formule la plus simplifiée et la plus utile est celle développée par Sabine (Wallace C. Sabine 1930). Il s'agit d'une fonction entre le volume et la surface d'absorption :

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

Le temps de réverbération varie également en fonction des fréquences. La valeur optimale du temps de réverbération est généralement la valeur moyenne obtenues aux fréquences moyennes (500-1000 Hz), pour une température généralement 20°C (Baumann et al, 2008).

1.4.3. CLARTE DU SON.

Le calcul du temps de réverbération est très important pour l'acoustique architecturale mais il n'est pas le seul paramètre à étudier pour assurer une bonne acoustique dans un espace. Pour obtenir une meilleure évaluation de l'acoustique architecturale, d'autres paramètres acoustiques doivent être analysés.

La clarté est l'un des paramètres acoustiques pertinents. Elle renseigne sur la façon dont l'auditeur ressent et reçoit l'énergie sonore. En fait, la clarté se définit comme étant le rapport entre l'énergie directe (et/ou les premières réflexions) et l'énergie tardive (énergie diffuse) (Long, M, 2005 ; Berjon, M, 2007). La meilleure valeur de clarté peut être obtenue lorsque l'énergie directe (premières réflexions) est égale à l'énergie diffuse (clarté proche de 0). Si la clarté est plus élevée, cela signifie qu'il y a plus d'énergie directe que d'énergie réfléchie. Comme l'inverse est correct ; c'est-à-dire que si les valeurs de clarté sont négatives (inférieures à 0), cela signifie que l'énergie réfléchie est plus importante que l'énergie directe (Long, M, 2005 ; Berjon, M, 2007 ; Foteinou, 2013).

La clarté dépend de la position de l'auditeur (parois environnantes : forme, matériau, position par rapport à la source, distance par rapport aux auditeurs); cependant elle n'est pas liée à la géométrie de l'espace (contrairement au temps de réverbération). La clarté renseigne sur l'intimité de la salle (l'espace).

En théorie, deux paramètres définissent la clarté; elle est désignée par C_{50} pour la parole et C_{80} pour la musique. La clarté pour la parole est le rapport entre les premières réflexions et l'énergie diffusée mesurée à 50 millisecondes. La musique étant différente de la parole, elle est mesurée sur les premières réflexions de 80 milliseconde (Berjon, M, 2007 ; Foteinou, 2013).

1.4.4. DEFINITION DU SON.

La définition du signal sonore est étroitement liée à sa clarté. Elle correspond au rapport entre l'énergie des 50 premières millisecondes et l'énergie totale de la réponse impulsionnelle. Dans la mesure où il s'agit de l'énergie des 50 premières millisecondes, la définition rapporte la même impression subjective que la clarté (C_{50}), comme elle est utilisée essentiellement pour évaluer la qualité acoustique de la parole dans les pièces.

La définition relative à la clarté, elle peut être calculée comme suit:

$$D_{50} = 10 \log_{10} \frac{E_0^{50}}{E_0^{\infty}} \quad (\text{Gérard, K et al, 2009})$$

Ou,

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{Foteinou, 2013})$$

avec,
$$C_{te} = 10 \log \frac{\int_0^{te} p^2(t) dt}{\int_{te}^{\infty} p^2(t) dt}; \quad (\text{Foteinou, 2013})$$

Alors,

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \quad (\text{Foteinou, 2013})$$

La définition en tant que ratio, est exprimée en pourcentage (%). Pour l'interprétation des valeurs; des intervalles de valeurs ont été définis; à savoir, les valeurs inférieures à 30% sont considérées comme **mauvaises**. De 30% à 45% présentent une définition considérée **pauvre**. Les valeurs **moyennes** sont comprises entre 45-60%. Une **bonne** définition est définie entre 60-75%, et enfin, une **excellente** définition est définie à partir de 75% (75-100%) (Joanne, P, 2003).

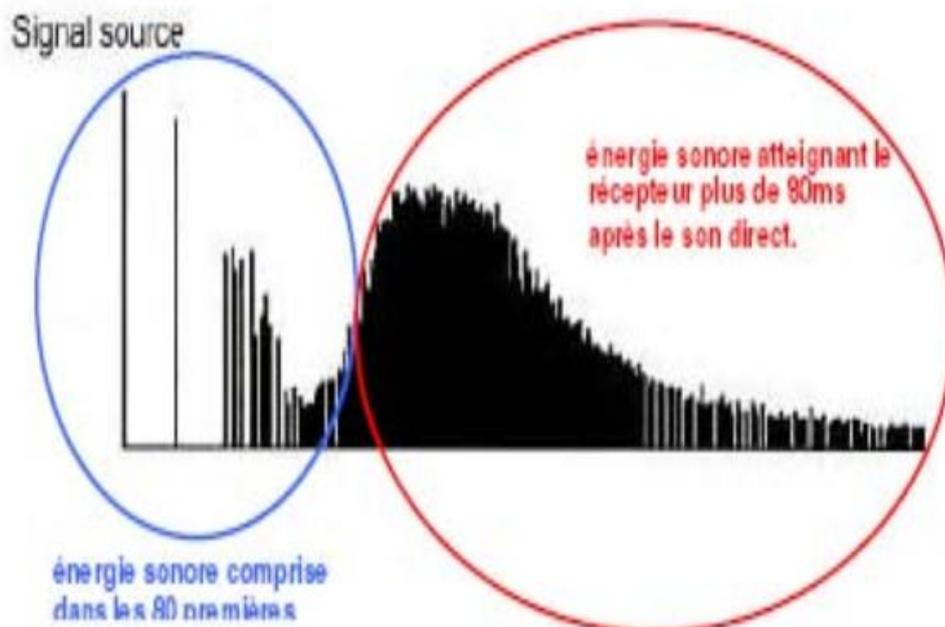


Figure 1.20. Représentation de la Définition du son en histogramme. (Gérard et al, 2009)

1.4.5. INDICE DE TRANSMISSION DE SON (STI).

De nombreux paramètres doivent être examinés pour garantir une bonne acoustique. Toutefois, une bonne acoustique, comme expliqué précédemment, dépend de l'usage de l'espace. Les paramètres acoustiques sont répartis entre paramètres objectifs et subjectifs.

L'intelligibilité de la parole est un paramètre objectif utilisé pour l'évaluation de l'acoustique des salles, notamment celles dont l'usage porte sur la communication (mosquée, église, théâtre, salle de conférence, salle de classe...). Il s'agit de donner une valeur objective à la subjectivité de la compréhension de la parole.

La clarté et la définition permettent d'obtenir des informations sur la qualité du son (temps de réverbération et distance source-récepteur) ; mais elles ne prennent pas en compte le bruit de fond (BGN) ou certaines particularités liées au signal de parole. Pour cette raison, l'indice de transmission du son (STI), ou l'intelligibilité rapide de la parole (RASTI) ont été développés par les acousticiens afin de résoudre ces lacunes (Gérard et al, 2009 ; Othman et Mohamed, 2012).

En fait, l'intelligibilité de la parole peut être évaluée subjectivement en les interrogeant de manière individuelle. La technique consiste à mesurer (compter) les mots/phrases (syllabes, mots ou phrases) compris clairement par un groupe d'auditeurs; dans une période donnée (Long, M, 2005 ; Othman et Mohamed 2012). L'intelligibilité de la parole n'est pas synonyme de qualité de la parole. En fait, l'intelligibilité de la parole est liée au nombre de mots (item) correctement compris. Quant à la qualité de la parole est relative aux distorsions audibles, ce qui signifie que la parole peut être de mauvaise qualité malgré son audibilité (Othman et Mohamed 2012).

Cependant, il est possible d'obtenir des valeurs plus objectives du STI (ou sa version simplifiée qui est le RASTI). Le calcul se base sur des équations mathématiques à l'aide d'un logiciel (*Audacity* par exemple) ; appliqué sur une réponse impulsionnelle. Les valeurs de STI/RASTI sont des valeurs absolues (unité de mesure); évoluant entre 0 et 1.

Tableau 1.2. Interprétations des valeurs de STI/RASTI. (Source : Letowski, 2017)

	Mauvais	Pauvre	Faible	bon	Excellent
STI (0-1)	0 – 0.3	0.3 – 0.45	0.45 - 0.6	0.6 – 0.75	0.75 - 1

1.4.6. INDICE DE CORRELATION INTERAURAL IACC.

En acoustique des salles, il est évident que les réflexions atteignent tous les auditeurs. Depuis 1967 (Harold Marshall, Veneklasen et Hyde) jusqu'en 1985 (Ando) ont élaboré différents travaux de recherches pour une meilleure compréhension de la contribution des réflexions latérales au phénomène d'écoute (de perception orale) (Long, M, 2005). Il a été découvert que les deux oreilles de l'auditeur (droite et gauche) ne perçoivent pas le signal sonore (énergie sonore) de la même manière et en même temps. Cela signifie que la différence entre les deux oreilles quelle qu'elle soit minime est significative à la perception des signaux ; particulièrement durant les 80 premières millisecondes (Long, M, 2005). Pour calculer l'IACC, il faut utiliser la formule suivante:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \dots\dots\dots (ISO 3382-1)$$

A la lumière des paramètres acoustiques précédents ; est-il nécessaire d'effectuer des mesures binaurales pour étudier la perception du son dans tous les espaces quelque soit la fonction?

Pour mieux répondre à cette question, il suffit de se référer aux standards. En fait; la norme ISO 3382-1 (2009) ; vient dans le but d'expliquer les différents paramètres acoustiques, la méthode de prise de mesure in situ relative à chacun de ces paramètres, ainsi que le domaine d'application. Jusqu'à nos jours l'indice de corrélation interaural (IACC) fait encore l'objet de discussions, essentiellement par rapport à l'interprétation de ses valeurs (ISO 3382-1). Toutefois, IACC est plus significatif pour les salles destinées à la musique. En fait, il a été affirmé par Ando (Soeta, Y., et al, 2012) que le coefficient IACC renseigne sur la largeur de la salle. Par ailleurs, il est certain que sa valeur reflète la nuance entre les deux oreilles (ISO 3382-1).

1.4.7. TEMPS CENTRAL (Ts).

Le temps central représenté par (Ts), se définit par l'expression suivante : « le Ts est *le centre de gravité temporel de la réponse impulsionnelle au carrée* » en référence à la norme (Iso 3382 -1). En d'autre terme, c'est le centre de la représentation graphique

(histogramme) de la réponse impulsionnelle. Il renseigne sur le temps moyen nécessaire au son pour atteindre l'auditeur. Il peut être calculé en utilisant la formule suivante:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \dots\dots\dots (\text{ISO 3382-1})$$

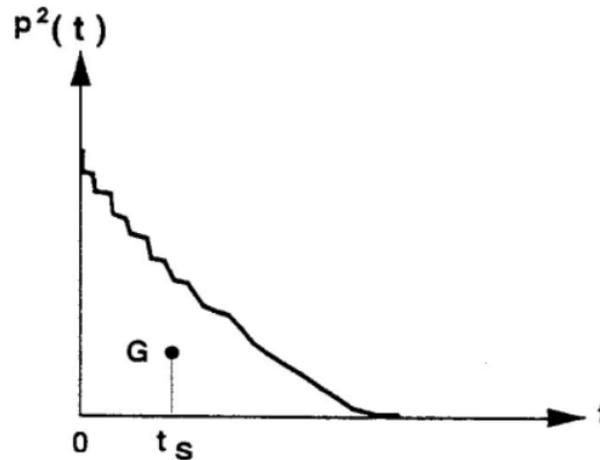


Figure 1.21. Temps Central (T_s). (Source : Gérard et al, 2009)

1.4.8. LA FORCE SONORE (G).

La force sonore (G) (*Strength*) est liée à la pression de la source. il s'agit de la différence entre la pression d'une source omnidirectionnelle donnée (mesuré dans un point spécifique dans une salle : espace clos) et la pression de la même source sonore mesurée à une distance de 10m de la source, dans un champ libre (à l'extérieur; sans aucune obstruction). Les mesures doivent être effectuées avec une source omnidirectionnelle.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P^2(t) dt}{\int_0^{\infty} P_{10}^2(t) dt} \dots\dots\dots (\text{ISO 3382-1})$$

Avec,

P : pression mesurée en espace clos.

P_{10} : pression acoustique mesurée dans un champ libre à 10m de la source.

CONCLUSION.

Ce chapitre nous a permis de passer en revue l'état de l'art sur l'acoustique des lieux de culte. A partir de la documentation existantes dans le domaine de l'acoustique des lieux de culte ; une clarification des principales notions présentée. Il est question de rappeler les principes de propagation du son dans un espace fermé (l'acoustique des salles) ; qui se diffère de la propagation dans un champ libre (espace ouvert). A ce stade ; la forme de l'espace ; particulièrement de ses composantes ; murs, toit, piliers, ameublement...etc. ainsi que les caractéristiques (performances) sonores des matériaux ; absorption, réflexion, diffusion, diffraction, constituent les principaux déterminant de la qualité de production du son ; leur reconnaissance est indispensable. L'espace architectural contribue énormément par son volume ; car il existe une relation transitive entre le volume et le gain d'énergie dans l'espace; plus le volume est grand, plus l'énergie sonore est stockée dans l'espace ; en fait, le volume conditionne le temps de réverbération optimal ; qui est le principal indicateur sur la qualité d'un environnement sonore. En plus du volume, la géométrie (carrée, rectangle, cercle, ...etc) ainsi qu'une forme simple/complexe, horizontale/ inclinée, ou rectiligne/curviligne, ...etc, participe dans la génération et le conditionnement d'un environnement sonore. Parmi les formes les plus répandues dans les bâtiments religieux, figure la coupole. Les chercheurs évoquent un long temps de réverbération dû à la coupole ; tandis que certains le considèrent comme positif, assumant une ambiance irréelle nécessaire au lieu de culte ; tel que Baumann. D'autres chercheurs le jugent comme négatif, car il est responsable d'une sensation d'échos, qui affecte l'intelligibilité de la parole (Kayili, M, 2005). Les recherches actuelles ne semblent pas déterminantes vis-à-vis de l'usage des coupoles. Mais une recherche apporte plus d'éclaircissement sur le rapport de la hauteur de la coupole avec la hauteur de la source et du récepteur ; en fait, un ratio s/r a été défini par Orfali ; qui doit être supérieur à 1,1 pour assurer une harmonie entre la hauteur de focalisation (e) et la hauteur de la source sonore (Orfali, 2007).

En parallèle aux conditions de génération du son ; l'utilisateur de l'espace, étant le récepteur du message sonore, constitue en soit un facteur aussi important. Car en fait ; l'être humain, aperçoit uniquement les ondes sonores comprises entre 20 et 20000 Hertz. Aussi, l'oreille humaine est d'une sensibilité extraordinaire ; lui permettant de sentir même de petites variations de pression acoustique, allant jusqu'à $(20 \times 10^{-6} N/m^2 \text{ or } Pa)$. En tenant compte de la sensibilité et la complexité de l'oreille humaine ; mais elle reste très

fragile ; pas entièrement étanche envers les niveaux sonores dépassant le seuil d'audibilité (120 dB) ; avec une fragilité d'un intervalle de 0,5 milliseconde de temps nécessaire pour réagir. De part ses capacités auditives, l'être humain peut apercevoir le son différemment ; selon son âge. En fonction de ses capacités auditives il peut être fragilisé momentanément, après une longue exposition à des sons forts (≥ 85 dB).

Le troisième élément déterminant de l'acoustique des salles ; après la configuration de l'espace (forme, matériaux ; aménagement) et l'utilisateur, est la source. En fait, la source diffère ; d'un être humain à une source artificielle (musique, baffe, etc...). Il a été rappelé dans ce chapitre, que les sources sonores se différencient par leurs puissances, leurs directivités, ainsi que leurs intensités. Une autre caractéristique de la source sonore ; c'est sa **directionnalité**, qui est relative au changement du niveau de pression en fonction de la position du récepteur. En plus, les sources sonores se différencient de part leur orientation (unidirectionnelle, omnidirectionnelle). Toutes ces informations influencent la perception d'un son généré dans un espace donné ; donc, elles sont indispensables avant l'entame d'une campagne de mesure pour une éventuelle caractérisation d'un environnement sonore. Dans ce chapitre, il était aussi question d'appréhender d'autres notions relatives au son, tel que le masquage du son, lorsqu'il y a superposition de deux sons en même temps.

A la fin, nous avons abouti à l'identification des principaux paramètres acoustiques significatifs pour l'acoustique des lieux de culte ; précisément pour les mosquées ; car la seule source sonore est la voix de l'*Imam*. Les indicateurs qui vont être analysés sont : le temps de réverbération (T_{20} , T_{30} ou T_{60}). L'EDT ; car il nous renseigne sur le premier contact du son avec les objets les plus proches à la source sonore, ainsi que les paramètres liés à la qualité du message vocal (la parole) qui sont essentiellement ; D_{50} , C_{50} et STI. Ces indicateurs s'avèrent les plus pertinents pour une évaluation d'un environnement sonore ; dont la source principale est la voix humaine de l'*Imam*.

Ce chapitre nous a apporté les principales connaissances en rapport avec l'acoustique des lieux de culte. Un approfondissement de ces connaissances fera l'objet du prochain chapitre, pour permettre l'identification de l'approche adéquate pour étudier l'acoustique dans les mosquées en particulier.

Chapitre II. ACOUSTIQUE ET USAGE DANS LES LIEUX DE CULTES.

“Architectural acoustics has been described as something of a black art or perhaps more charitably, an arcane science. While not purely an art, at its best it results in structures that are beautiful as well as functional. To produce art, however, the practitioner must first master the science of the craft before useful creativity is possible, just as a potter must learn clay or a painter his oils”

Marshall Long

INTRODUCTION.

L'architecture comme production plastique, répond à une complexité d'exigences artistiques, environnementales, de confort et surtout d'usage. L'usage de l'espace architectural ne signifie pas l'adaptation des usagers à l'espace (architecture) ; mais plutôt l'adaptation du produit architectural aux exigences fonctionnelles. Par delà, les exigences fonctionnelles englobent toutes les attentes des usagers de cet espace ; dont les exigences acoustiques. L'acoustique consiste évidemment à concevoir un environnement sonore particulier.

Dans ce chapitre, une brève illustration du résultat d'adaptation de l'architecture aux exigences acoustiques des lieux de culte sera abordée. A travers des exemples de mosquées, églises, et/ou autres lieux de culte, nous procéderons à une description des différentes solutions créées au cours de l'histoire pour aboutir à des environnements sonores dignes des chefs-d'œuvre réalisées par de grands architectes.

Une attention particulière sera accordée aux mosquées ; objet de cette thèse. Ce chapitre abordera également d'autres informations pouvant cerner la particularité de l'acoustique dans les mosquées.

2.1. ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE ET USAGE.

L'architecture est souvent considérée comme un spectacle visuel ; limité à une expérience temporelle instantanée mais émouvante (Pinson, D, 2005). En fait, outre que la plasticité des formes, des couleurs et des matériaux, l'architecture offre une expérience vécue qui ne se limite pas aux signaux reçus par les cinq sens, bien au-delà, elle la dépasse pour une expérience sensorielle émouvante.

Les monuments historiques ; notamment dédiés au culte, ne cessent d'émerveiller les visiteurs, tant par la beauté de leur architecture, que par leurs ambiances uniques à l'intérieur des salles de prière. Le visiteur de notre dame de Paris, ou de la Suleymaniye d'Istanbul, ému par l'architecture des deux monuments, le sera encore plus en écoutant le chant à notre dame de Paris, ou la récitation du coran à l'intérieur de la grande mosquée Suleymaniye.

Il est bien connu que l'usage de l'espace définit les exigences acoustiques. Entre un théâtre, une salle de sport, un lieu de culte ou une gare ; l'environnement sonore n'est pas le même. Pour assurer une acoustique optimale répondant aux exigences de l'espace ; c'est-à-dire aux attentes des usagers, il est nécessaire de se référer au temps de réverbération optimal défini par les normes (figure 2.1.).

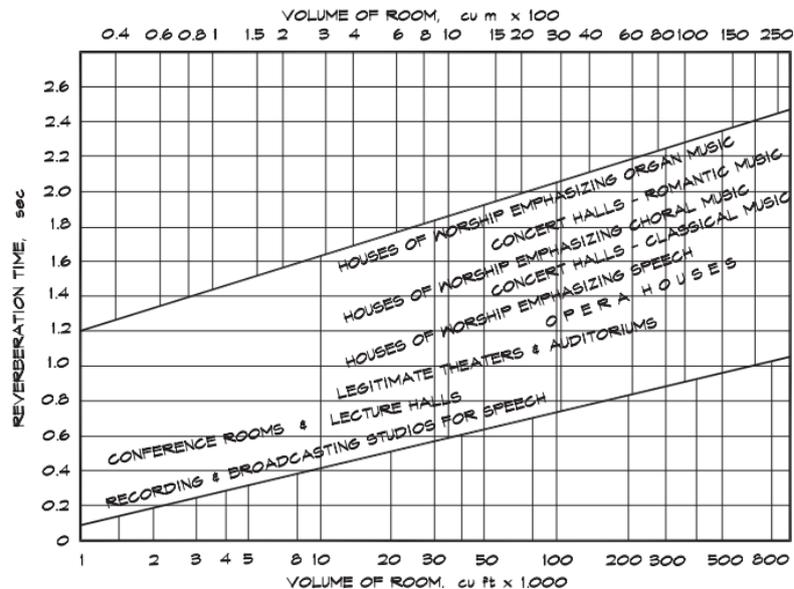


Figure 2.1. Les valeurs optimales du temps de réverbération de la nature de l'espace en fonction du volume. (Source : Long, M, 2005)

L'acoustique diffère d'un usage à l'autre, en référence à la forme du bâtiment, à la nature de la(es) source(s) sonore(s) et aux pratiques à l'intérieur de l'espace (position des auditeurs, pratiques, ...etc).

Quant à la forme du bâtiment (à l'intérieur) elle a un rapport de réversibilité avec le son ; car elle influence l'environnement sonore d'une part ; à cause de la réflexion, la diffraction et la réfraction du son par l'enveloppe intérieure (Long, M, 2005). La forme est, en conséquence, influencée par le son ; car elle doit obéir à des instructions (recommandations) pour contenir un environnement sonore approprié (voir chapitre 1).

En ce qui concerne la source, elle est évidemment la clé de l'acoustique. Elle est relative à la nature de l'espace, et aux activités qui s'y déroulent. Pour cette raison, il peut y avoir une ou plusieurs sources. Comme expliqué au premier chapitre ; la source peut être une voix humaine, un instrument de musique, ou un haut-parleur, ...etc. Ainsi ; le choix des sources sonores est subordonné par sa directivité (unidirectionnelle, omnidirectionnelle : voir le chapitre 1).

Enfin, les pratiques et/ou les activités à l'intérieur de l'espace varient d'un usage à un autre. Entre un spectateur d'un match dans une salle de sport et un auditeur dans une salle de concert, un voyageur dans une gare ou un élève dans une classe, les conditions de production et d'écoute du son sont très divergentes, d'où le besoin d'étudier l'acoustique relativement à chaque usage.

Dans ce chapitre, nous passons en revue des principales recherches sur l'acoustique des lieux de culte ; avec plus d'éclairage sur les travaux dédiés aux mosquées, objets de cette thèse.

2.2. L'IMPORTANCE DE L'ACOUSTIQUE DANS LES LIEUX DE CULTES.

Les lieux de culte offrent un vécu particulier en rapport avec leur importance dans les sociétés concernées. Malgré la diversité des formes, des styles et des techniques constructives, ces espaces sont riches en symbolisme, généralement, ressentis de manière anonyme par tous les humains.

L'acoustique des lieux de culte constitue une expérience spirituelle unique, qui invite le visiteur à y revenir. L'acoustique ; pour ces espaces, peut être abordée selon les deux angles de vue ; d'une part celui du confort sonore (concevoir une bonne

intelligibilité) et d'autre part, un émerveillement des usagers à travers l'approfondissement de ce confort physique en satisfaction morale et émotionnelle.

L'importance de l'usage en matière d'acoustique des lieux de culte peut être expliquée par l'examen des différentes exigences liées aux diverses activités (Baumann et al, 2008). Pour Baumann, les formes spatiales et les détails architecturaux et constructifs ont été développés afin d'impressionner les usagers avec une qualité acoustique appropriée aux lieux de culte. Ces formes et/ou détails architecturaux ont été imposés par la nature des activités (prière, lecture des textes sacrés, prédication du serment ou khotba, ...etc). Il est recommandé, dans les églises, de partager l'espace intérieur de l'église en espace principal (nef centrale) et espaces secondaires (galerie narthex, chapelles absidiales, chœur, ...etc), afin de mettre en valeur l'autel et valoriser la symbolique du lieu. La mosquée quant à elle, veille à l'unification de l'espace. Il s'agit d'un concept fondamental, provenant d'un seul et unique Dieu. Par conséquent, les exigences et les préférences acoustiques de chaque lieu (à savoir, Eglise et Mosquée) ne sont pas identiques.

Parfois l'acoustique des lieux de culte est appréhendée au même titre, quelque soit le culte. Notamment, l'acoustique des mosquées est assimilée à l'église par certains nombre de chercheurs, surtout en l'absence de normes spécifiques aux mosquées (à l'exemple de Baumann et Kleiner). En fait, il est possible d'assimiler les deux environnements sonores lorsqu'il est question de les comparer aux espaces de fonctions différentes ; tels que les théâtres, les salles de classes. Cependant, lorsque l'intention est de généraliser les mêmes recommandations acoustiques ; les mosquées et les églises prouvent des différences importantes selon les travaux publiés ces dernières années (Fausti et al, 2003 ; Elkhateeb et al, 2021).

La conception acoustique pour une église peut parfois mettre en conflit l'architecte ou le concepteur en raison de certaines exigences contradictoires. C'est souvent le cas des églises traditionnelles qui sont caractérisées par plusieurs espaces interconnectés (la nef, les allées latérales, le transept et le chœur). Or ; la source sonore se retrouve à chaque fois à un emplacement différent, et peut entraîner des confusions, à cause des réflexions tardives provenant des sous-espaces (Baumann et al, 2008), et/ou de nature différentes (chant, musique, ...etc). Par ailleurs, les exigences de la clarté diffèrent entre le discours (la parole) et la musique (Baumann et al, 2008). Pour les lieux de culte chrétiens ; les chants (les voix humaines) et la musique sont indispensables à leurs pratiques religieuses ; ils

sont considérées comme porteurs du message divin (Kleiner et al, 2010). Mais le défi est de taille afin d'obtenir une acoustique optimale dans ces espaces (églises) (Engel et Kosała, 2004 ; Kleiner et al, 2010).

Dans les mosquées, dont la principale source de son est la voix de l'Imam, la conception fait appel à des solutions plus adaptées à l'acoustique. La littérature suggère que les choix architecturaux ; à savoir la coupole centrale couvrant un espace unifié chez les Ottomans, ou la surélévation de la hauteur des salles de prières (le principal iwan) en fonction de la couverture de la cour (cour couverte/découverte) chez les Mamlouks, sont une réponse aux besoins sonores.

L'étude de l'acoustique des lieux de culte nécessite un investissement considérable et une importante base de données afin de pouvoir se prononcer sur la qualité acoustiques des espaces en question (Magrini et al, 2003).

2.3. PRATIQUES RELIGIEUSES : POSITIONS DES SOURCES/RECEVEURS.

Les lieux de cultes présentent une richesse aussi bien en termes d'architecture que d'ambiance. En fait, il est sûr de relever des différences entre les cultes, mais parfois, il peut exister aussi des différences dans un même culte, cela relève des différences de région, de période (historique). Des divergences peuvent être observées entre bâtiments authentiques et bâtiments ayant subis des rajouts, voir même des transformations et/ou reconversion.

Pour les églises, différentes expériences acoustiques peuvent avoir lieu dans la salle de prière ; relativement à la diversité des activités religieuses (Soeta, Y et al, 2012). Cette diversité nécessite des sources sonores différentes, dans des emplacements particuliers. Sur le plan architectural ; l'église traditionnelle est une combinaison de plusieurs espaces adjacents. Le chœur avec l'autel et le lutrin, placés dans le sanctuaire, puis la chaire située à l'extérieur du sanctuaire, qui sert à renforcer le son (avant l'ère des systèmes électroacoustique), puis l'orgue, et enfin l'assemblée des fidèles. Tous ces espaces peuvent être considérés générateurs de son, bien que les plus principales sources ce sont le chœur et l'orgue (Martellotta, F et al, 2009). Il s'agit donc, de sources de natures différentes (paroles, discours, musique et chants) ; chacune est située dans une position différente à l'intérieur de l'église. Par conséquent, la combinaison de **style architectural- sources-utilisateurs** génère une atmosphère acoustique très particulière, d'où la difficulté de

déterminer les conditions optimales pour une meilleure qualité acoustique (Martellotta et al, 2009 ; Soeta, et al, 2012). La nature des activités impose une composition architecturale bien particulière, adaptée aux exigences acoustiques (Baumann et al, 2008 ; Martellotta, F et al, 2009 ; Kleiner et al, 2010). Des différences d'une région à une autre, et/ou d'une période à une autre, peuvent générer des ajustements spécifiques.

En ce qui concerne la mosquée, les deux activités principales sont la prière collective dirigée par l'Imam et la *khotba* (discours de l'imam lors des prières des vendredis et de l'Aïd). Donc, souvent deux positions principales de sources de son, qui sont le *Mihrab* et le *Minbar* (Elkhateeb et al, 2015 ; Abdou, 2003a ; Abdou, 2003b). En effet, il peut exister d'autres positions de sources relativement à l'importance de la mosquée et au rite pratiqué (rite = مذهب). Comme il peut exister dans de rares édifices, plusieurs sources sonores simultanées ; c'est le cas des très grandes mosquées, qui par le passé abritaient des activités d'enseignement effectuées par plusieurs enseignants/savants en même temps, il fut le cas des grandes mosquées telles que la mosquée *Azhar* au Caire, *Zitouna* à Tunis. Cette particularité existe à nos jours dans les deux grandes mosquées de la Mecque et Médine.

Parmi les activités générant du son, outre les deux précédentes, il y a la récitation du coran de manière individuelle, par un professionnel (récitant = مقرئ) ou collective (des petits groupes : حلقة). Il existe également d'autres formes de congrégations (actes de mariages, conseils de paix, ...etc.). Les différentes activités citées peuvent se dérouler dans l'espace de prière, souvent devant le *Mihrab* (sous la coupole centrale de l'édifice), ou elles peuvent avoir lieu dans un espace spécifique ; tel que le *Majlis* au M'zab (Ghardaïa).

Dans le cadre de cette thèse, l'accent sera mis sur les situations (scénarios) les plus fréquentes et conventionnelles ; à savoir la prière collective (la source est située au *Mihrab*) et la *Khotba* (l'Imam au *Minbar*).

Le *Mihrab* est une niche au milieu du mur de la qibla, en direction de la Mecque en Arabie Saoudite. Les fidèles se disposent en rangées parallèles derrière l'Imam. Seul l'Imam est autorisé à parler à voix haute; récitant le coran et/ou dictant les différents ordres de la prière. Quant au *Minbar* qui constitue la deuxième source sonore principale ; c'est un mobilier souvent en bois ou en marbre, surélevé de quelques marches, selon l'importance de la mosquée, d'où l'Imam prêche sa *Khotba*, en s'adressant aux fidèles (en face d'eux). En fait, la *khotba* est un discours donné par l'Imam à l'occasion des prières du vendredi et

de l'Aïd (Abdou, A.A, 2003a). Il ne peut donc y avoir deux sources sonores en même temps, contrairement à l'église.

2.4. PERCEPTION DU SON DANS LES LIEUX DE CHACUNE DES RELIGIONS.

La perception du son dans les espaces de culte est une expérience fondamentale dans les sociétés croyantes. Toute perception demeure relative à un groupe d'individus, ayant des conventions culturelles, leurs permettant d'assimiler le message de la même façon. Chaque acte de construction d'un lieu de culte est alimenté par le désir d'exprimer un message ; c'est l'intention principale du symbolisme religieux. En effet, les monuments historiques offrent des expressions symboliques fortes aux usagers, par l'intermédiaire d'impressionnantes ambiances lumineuses et sonores (Baumann et al, 2008). C'est pour ainsi dire que pour plusieurs lieux de culte, la coupole symbolise la voute céleste, du point de vue architectural mais aussi acoustique (Baumann et al, 2008).

L'évolution de l'architecture des lieux de culte, illustrent une richesse et une diversité des formes, de décorations et de matériaux. Cette diversité enrichie davantage les messages sonores. Toutefois, cette diversité émane de la nécessité de créer un environnement sonore propice à l'accomplissement des tâches à l'intérieur des lieux de culte (Martellotta, F, 2008).

La perception de l'acoustique des lieux de culte peut être appréhendée, de manière objective, à travers la présentation des préférences normalisées des principaux paramètres acoustiques.

2.4.1. LE TEMPS DE REVERBERATION.

L'acoustique de l'église est caractérisée par une dualité entre les exigences de la parole (discours) qui nécessite un court temps de réverbération, et celles des instruments de musique (nécessitant un long temps de réverbération) (Engel et Kosała, 2004 ; Kleiner et al, 2010). Si l'orgue met le même temps que la parole à se développer (environ 100ms) ; il mettra plus de temps pour l'apercevoir correctement, en raison du tempo de la musique. Ce décalage temporel entre les deux sons (parole et musique) doit être pris en compte lors de la conception des églises et cathédrales. Pour cela, il est nécessaire de prévoir un temps de réverbération encore plus long pour la musique et le chant (Kleiner et al, 2010). De même,

l'harmonie entre les deux sons procurera une atmosphère divine à l'église, décrite comme "un sens du mystère" par les clergés (Kleiner et al, 2010).

Selon les graphes proposés par Engel (Figure 2.2.) ; il est évident que la musique requiert un temps considérablement plus long que le discours du clergé. A titre d'exemple ; pour un volume de 1000 m³, la parole nécessite 0.7 s alors que la musique nécessite un temps d'environ 2.1s.

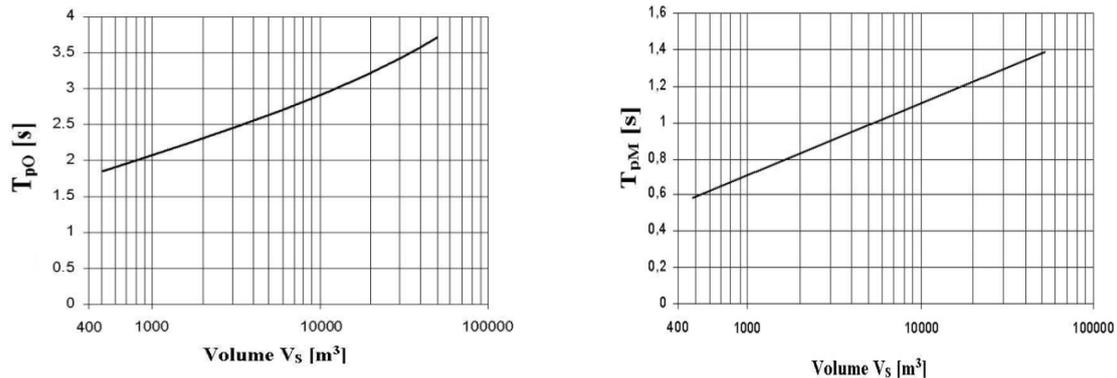


Figure. 2.2. Comparaison du temps de réverbération nécessaire dans l'église entre discours et Orgue : à droite : le discours, à gauche : Musique d'orgue. (Source : Engel, Z. and K. Kosała, 2004)

Quant aux mosquées, Kleiner ne recommande pas un long temps de réverbération pour l'accomplissement des différentes activités contrairement à Baumann, Prodi, Kayili et El-Khateeb. En fait, Kleiner considère la mosquée comme une salle de parole (*Speech room*) ; à l'image des salles de conférences.

Sauf qu'une comparaison faite sur les environnements sonores des églises et mosquées, témoigne d'un très long temps de réverbération en situation inoccupée pour les deux types de bâtiments (Fausti et al, 2003). D'après la même source, il s'agit d'une volonté d'offrir aux usagers une sensation de majesté, un symbolisme divin, qui caractérise souvent ces lieux de culte. La comparaison entre les églises et les mosquées dévoile un temps de réverbération plus long en faveur des mosquées Ottomanes et Mumlouks (Karabiber, 2002) (Figure 2.3).

Selon karabiber, aucune valeur optimale du temps de réverbération ne s'applique aux mosquées (Karabiber, 2002). Sauf qu'il admettait que les mosquées se caractérisent par un long temps de réverbération en basses fréquences. Cependant, en hautes fréquences, toutes les mosquées ont le même temps de réverbération.

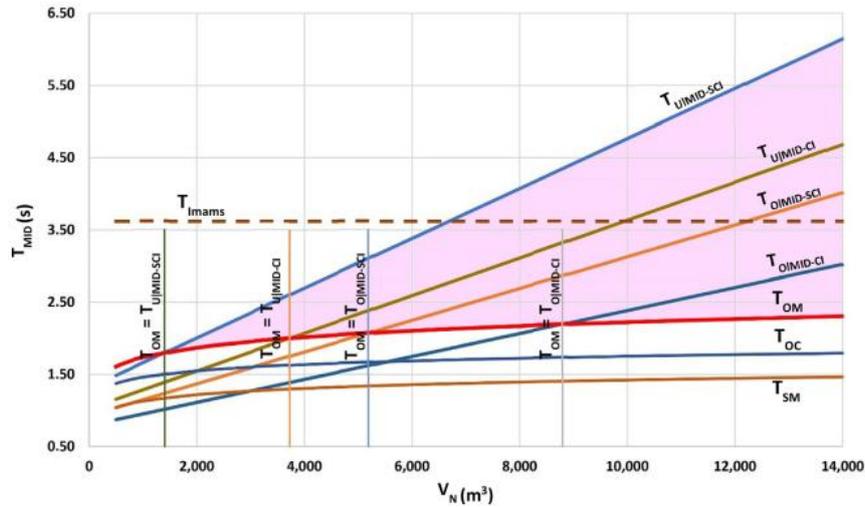


Figure 2.3. Comparaison du temps de réverbération entre : les Mosquées Mumlouks ($T_{U|MID-SCI}$, $T_{O|MID-SCI}$, $T_{U|MID-CI}$, $T_{O|MID-CI}$), Optimal proposé par Kayili (T_{OM}), Auditorium de musique symphonique (T_{SM}) et les églises (T_{OC}). (El-Khateeb, 2021)

En outre, selon d'autres chercheurs (Kayili, 1989, 2005 ; Orfali, 2007), il serait possible de prédire un temps de réverbération pour les mosquées en situation d'occupation (Figure 2.4). En fait, Kayili a défini la courbe du temps de réverbération à partir de l'analyse des environnements sonores des mosquées ottomanes conçues par Sinan (Kayili, M, 1989). Il a tracé cette courbe à partir des résultats jugés en faveur d'une intelligibilité satisfaisante, et ceci a été observé dans les mosquées historiques (Rüstem Pacha, Sokollu Mohamed Pacha, la mosquée Mihrimah et la mosquée Çenabi Ahmet Pacha). Kayili a considéré que le temps de réverbération dans les mosquées était supérieur aux valeurs recommandées pour la conversation (speech room).

A l'opposé de Kayili ; Orfali propose une autre courbe du temps de réverbération en fonction du volume. Cette étude se base sur les normes des salles destinées à la discussion (speech room) pour déterminer un $T_{optimal}$, en donnant la formule suivante :

$$RT = \left(\frac{0.163\gamma L}{16\pi r_R^2} \right) \times V \quad (\text{Orfali, W.A, 2007})$$

Avec :

γ_L : indice effectif de front-to-random de la source sonore

r_R : Distance critique (m)

V : Volume de l'espace (m^3)

Avec les conditions :

- Le graphe est dessiné à partir d'un volume de 1440m^3 .
- Une distance critique $r_R=2.82\text{m}$.
- Le facteur front-to-random $\gamma_L=2$ (à la fréquence 1kHz)
- Le ratio : volume/T= $800\text{m}^3/\text{s}$.
- Le changement du volume sur le graphe est opéré en augmentant la distance critique r_R , à savoir :

$$r_R^2=r_H^2 \times \gamma_L^2 \Gamma_L^2(\vartheta) \quad (\text{Orfali, W.A, 2007})$$

Avec:

Γ_L : l'indice de directivité de la source sonore.

r_H : le rayon de réverbération.

La comparaison de ces deux références, nous permet d'observer une forte divergence pour les petits volumes ($\leq 5000\text{m}^3$). En revanche, plus les volumes augmentent, plus les valeurs de T_{optimal} se rapprochent (Figure 2.4).

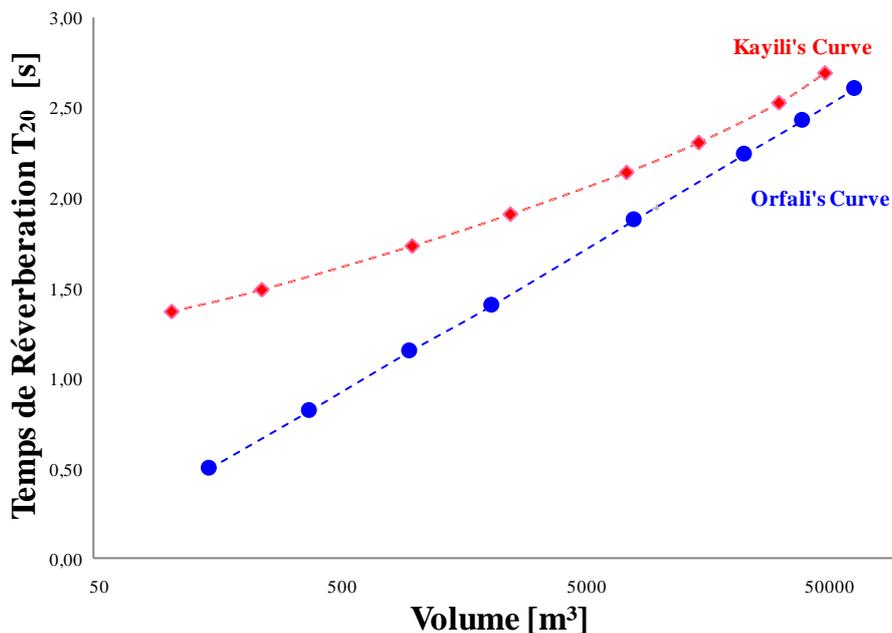


Figure 2.4. Valeurs optimales du temps de réverbération en fonction du volume (proposées par Kayili, 1989, 2005 ; et Orfali, 2007). (Source : Benferhat et al, 2022)

Il est difficile de considérer l'une des deux propositions par manque d'informations supplémentaires. A cet égard, une autre recherche plus récente vient remettre en cause la courbe proposé par Orfali et renforce celle de Kayili (Elkhateeb et al, 2015, 2016).

Elkhateeb a mené son travail sur deux étapes ; la première étape consiste à se servir d'un enregistrement sonore (récitation du coran). Cet enregistrement fut entendu par des usagers afin de calculer le nombre de mots/seconde récités dans la salle de prière, et par conséquent, le nombre des syllabes/seconde. La deuxième étape, consiste à collecter les réponses sur un questionnaire auprès d'un groupe d'usagers (*Imams*) (Elkhateeb et al, 2015). Les questions portent sur les préférences de ce groupe d'individu en matière de réverbération, après avoir écouté des enregistrements sonores caractérisées par des temps de réverbération différents. Les résultats de cette recherche confirment que les mosquées nécessitent un temps de réverbération plus long que les salles de discours (*speech room*). Cette recherche recommande la courbe de temps de réverbération en fonction du volume, proposée par Kayili (Elkhateeb et al, 2015, 2016). Ce travail, vient consolider l'impression de majesté nécessaire pour les mosquées ; recommandé ultérieurement par Prodi, en 2001. D'après Elkhateeb, le temps de réverbération pour les mosquées en situation d'occupation peut être calculé comme suit :

$$T_{OM}=0.822V^{0.1080}(S) \quad (\text{Elkhateeb et al, 2015})$$

Cette formule montre que le temps de réverbération pour les mosquées est presque le double de celui des salles de conversation [$T_{OS}=0.3 \log \frac{V}{10}(S)$], et même encore plus long que celui des églises [$T_{OC}=0.1537 \ln V + 0.4606(S)$] (Elkhateeb et al, 2015). (voir la figure 2.5).

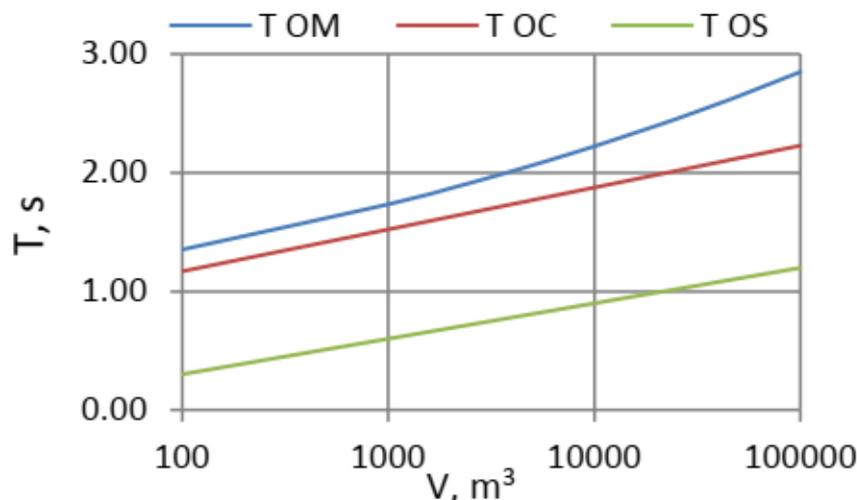


Figure 2.5. Comparaison du temps de réverbération (en situation d'occupation) entre Mosquées, Eglises et les salles de conversation. (Source : Elkhateeb, 2015)

2.4.2. L'ABSORPTION TOTALE DE L'ÉNERGIE SONORE.

Outre le temps de réverbération, la comparaison entre une mosquée contemporaine et une mosquée classique, se fait en analysant l'absorption totale de l'énergie sonore. La comparaison entre la mosquée Sisli Merkez (réalisée en 1949, avec un volume= 4750m^3) avec la mosquée Sokullu pacha (réalisée en 1572, d'un volume= 5700m^3) ; ne dévoile pas une grande différence entre les deux mosquées, sachant que la mosquée traditionnelle (Sokullu) présente une meilleure qualité acoustique (Karabiber et Erdogan, 2002 ; Eldien et Al Qahtani, 2012).

Dans les mosquées la présence de la moquette et/ou tapis influence énormément la perception du son à l'intérieur des espaces de prière. L'impact de la moquette sur le niveau de pression sonore est de 2 dB jusqu'à 3dB (Marsilo et al, 2001). L'humidité domine l'absorption du son en hautes fréquences (Kleiner et al, 2010).

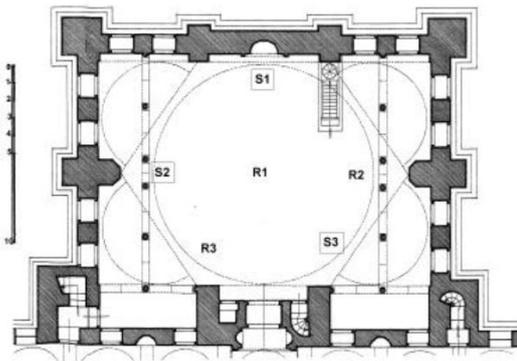


Figure 2.6. Plan de la mosquée Sokullu. (Source : Karabiber, 2002)

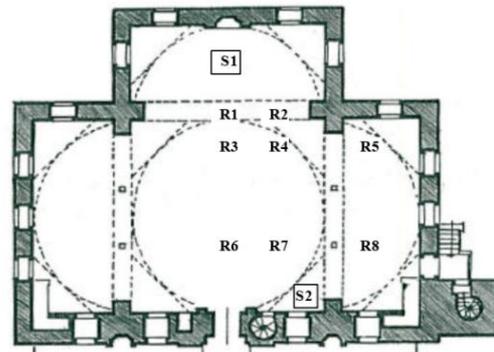


Figure 2.7. Plan de la mosquée Sisli. (Source : Karabiber, 2002)

2.4.3. VOLUME PAR PERSONNE (V/N).

Un autre paramètre de grande importance pour la qualité acoustique des mosquées est le volume par personne (V/N), car il fournit une mesure "architecturale" de l'acoustique ; en supposant une utilisation typique des matériaux (Benferhat et al, 2022). En fait, toutes les recherches stipulent le volume par siège, dans les espaces, tels que les églises, théâtres, ...etc, car les utilisateurs s'assoient sur des sièges ; contrairement aux mosquées, où les usagers s'assoient sur un moquette.

Pour obtenir une qualité acoustique optimale, il faut s'assurer que le volume/personnes (volume/sièges) est conforme aux normes relatives à la fonction de l'espace. Alors, les

chercheurs se réfèrent aux normes proposées par Maekawa et Lord. Selon eux, la gamme habituelle pour le discours devrait se situer entre 4 et 6 m³/pers (Benferhat et al, 2022). Ces valeurs sont jugées très inférieures par rapport aux édifices existants, notamment pour les mosquées Ottomanes étudiées par Karabiber (Karabiber, Z, 1999). En fait, le calcul du volume/personne dans les mosquées ottomanes célèbres confirme la position du Karabiber, avec les valeurs suivantes : la Suleymaniye : 27m³/per, la Selimiye : 30 m³/per, Sokkulu : 18 m³/per, Rustem Pacha : 10 m³/per et Mihrima Sultane : 14.3 m³/per (voir figure 2.8.). Elkhateeb, après avoir étudié les mosquées Mumlouk au Caire, a suggéré de réviser la fourchette proposée par Maekawa et Lord, pour le cas des mosquées. Alors, il suggère un minimum de 7 m³/pers, car c'est la gamme observée dans toutes les mosquées historiques (tant ottomanes que mameloukes) (Benferhat et al, 2022).

Tableau 2.1. Les Volume par siège : Comparaison entre les propositions de Doelle en 1972 (Kleiner et al, 2010) et Maekawa et Lord (1994).

Type de salles	Volume par siège : capacité (volume par siège)	
	Doelle	Maekawa et Lord
Salle pour discussion (speech room)	2.3-4.3	4-6
Salles de Concerts	6.2-10.8	8-10
Salles d'Opéra	4.5-7.4	6-8
Eglises/ Synagogues	5.1-9.1	/
Salles multi-Fonctions	5.1-8.5	6-8
Théâtre (Motions-picture Theaters)	2.8-5.1	4-6

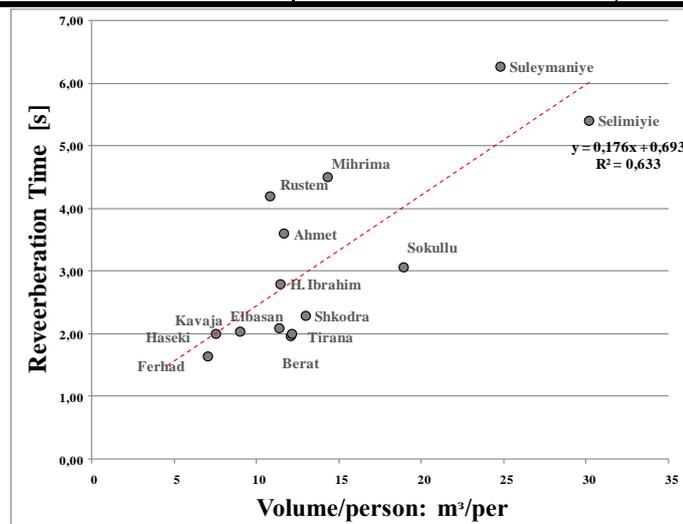


Figure 2.8. Volume par personnes (V/N) pour les mosquées Ottomanes. (Source : Auteur)

2.4.4. LE NIVEAU DE PRESSION ACOUSTIQUE SPL.

Les autres paramètres acoustiques sont liés au temps de réverbération ; et c'est aussi le cas du niveau de pression acoustique. Pour cela, un temps de réverbération plus long signifie un haut niveau de pression acoustique (SPL). Ceci, assurera une bonne intelligibilité du discours de l'Imam (Elkhateeb et al, 2007) avec un faible niveau de bruit de fond (BGN).

2.4.5. L'INDICE DE TRANSMISSION DU SON (STI).

L'intelligibilité de la parole ; comme expliqué au premier chapitre (1.6.5. Indice de transmission de Son) est dépendante du temps de réverbération (T), du bruit de fond (BGN). La distance source-receveurs, le temps de réverbération et le bruit de fond sont influencés par la conception architecturale de l'espace. L'intelligibilité de la parole est le paramètre le plus important dans la conception acoustique des mosquées, en raison de la nature des activités qui se déroulent à l'intérieur (prière, leçons, khotba et récitation du coran) ; la conception des salles de prière acquiert une attention particulière (Abdou, 2003b). L'indice de transmission de la parole (STI) est un paramètre pratique et commode pour estimer l'intelligibilité de la parole en raison de sa nature "à un seul chiffre" et de son échelle simple de zéro à un (Benferhat et al, 2022).

Même si une bonne intelligibilité est associée à des valeurs STI supérieures à 0,6, une certaine tolérance peut être acceptée dans les espaces de culte pour mieux correspondre au sens du sacré de l'espace. Les mosquées étudiées dans la littérature, présentent souvent des valeurs de STI inférieures à 0.6. A cet effet, Yilmazar et Acun concluaient qu'un STI à 0.56 (mesurée sans utilisation d'amplification) est appropriée dans le cas des mosquées, ce qui permet une écoute claire (Benferhat et al, 2022). Dans la madrasa et mosquée Sultan Hassan, les résultats montrent que 68% des valeurs de STI sont entre 0.45-0.60 (bon), 4% des résultats satisfaisants, 21.5% très bons et 6.5% excellents. Or une moyenne de 0.51 a été trouvée à la mosquée sokullu (Istanbul) par karabiber (Karabiber, 2002). Des résultats pas très satisfaisants (entre mauvais=*Bad* et pauvre=*Poor*) à la mosquée Abu-bakar en Malaisie (Kassim et al, 2015). Dans la majorité des travaux de recherches sur l'acoustique et en particulier l'intelligibilité (STI), on décèle une relation contradictoire entre le volume et la moyenne des valeurs du STI, comme il est le cas avec les résultats des mosquées étudiées en Malaisie, avec des valeurs allant de 0.48 (pour un volume de 12200m³) à 0.69-0.71 (pour des volumes situés entre 1687m³ et 809m³) (Othman et al, 2012).

2.5. L'ACOUSTIQUE DES MONUMENTS HISTORIQUES : DISPOSITIFS ARCHITECTURAUX ET ARCHITECTONIQUES.

L'architecture contemporaine (moderne) s'est libérée d'un riche héritage architectural, pour se retrouver contrainte de créer de nouvelles solutions acoustiques adéquates aux nouvelles formes spatiales ; notamment le rectangle (en remplacement des formes spatiales complexes caractérisant les anciennes églises). Si les architectes contemporains ont eu recours aux formes simples et/ou modernes, en conséquence, il incombe aux acousticiens de développer des solutions acoustiques. En fait, la technologie a permis l'émergence des solutions nouvelles et impressionnantes dans le domaine de l'acoustique (Baumann et al, 2008).

Baumann proclame l'abondance progressive de ces traditions acoustiques, au profit d'une recherche plastique d'une œuvre architecturale dépourvue d'expériences sensorielles sonores, car la perception de l'aura est reléguée au subconscient (Baumann et al, 2008). En conséquence, la création d'une acoustique architecturale devient de plus en plus difficile à entreprendre.

Contrairement à l'architecture contemporaine ; les solutions acoustiques en architecture traditionnelle proviennent des éléments architecturaux-architectoniques ; à savoir la coupole, la décoration, et aussi les matériaux de revêtement, tels que le marbre, la céramique ...etc.

Actuellement, avec l'abstraction du dôme, Baumann recommande de prévoir un temps de réverbération suffisamment long pour répondre aux mêmes exigences acoustiques. Ce long temps de réverbération n'affectera pas la clarté de la parole, s'il est aligné (linéaire) sur toutes les fréquences (Baumann et al, 2008). En revanche ; auparavant, la coupole est employée en tant qu'amplificateur du son au moment de l'invocation, la prière, pour le chant et la musique. Cependant, la création de formes architecturales caractérisées par une complexité due à la présence d'un grand nombre de coupoles est en faveur de performances musicales plus qu'aux lieux de culte (Magrini et al, 2003). Les résultats de l'étude acoustique de plus de 24 lieux de culte chrétiens (chapelles, églises, monastères cisterciens) en Italie révèle que le nombre et le volume des coupoles affecteront considérablement la réverbération à l'intérieur de lieux de culte. Les églises avec un plan central couvert par une coupole présentent des résultats plus harmonieux ; en

fonction de la distance source-récepteurs, que les églises de forme rectangulaire et sans coupole (Magrini et al, 2003).

En plus des formes architecturales et architectoniques, l'architecture classique avait développé des dispositifs intégrés à l'architecture du bâtiment et disposés en conformité avec l'organisation spatiale en réponse aux pratiques religieuses à l'intérieur de l'espace. Les dispositifs les plus utilisés sont les pots (jarres, vases) acoustiques, nommés ultérieurement « *les résonateurs de Helmholtz* » en référence à Helmholtz qui fut le premier chercheur à étudier le rôle de ces cavités dans son livre « *The theory of sound* » en 1862 (Kayili, M, 2002). Elles sont en terre cuite ou en bronze (les *echea*) ; les vases acoustiques évoqués par l'architecte romain Vitruve, dans son livre *De Architectura*, ont été employés par les grecs et les romains afin de répandre le son dans les théâtres antiques en plein air (Leipp, E, 1980 ; Valière et al, 2013). Elles étaient placées dans des niches, pour les libérer, tout en assurant une vibration du son (une amplification) (Palazzo-Bertholon et al, 2009).

Cependant, en moyen âge, les pots acoustiques ont été réappropriés pour corriger le temps de réverbération en améliorant ainsi l'intelligibilité du son. Constatés par les archéologues à travers toutes les églises réalisées en Europe ; ces vases ont été placés dans les parties hautes des murs, et sur les voûtes et/ou les boiseries (Leipp, E, 1980 ; Valière et al, 2013 ; Palazzo-Bertholon et al, 2009). Un emplacement les prive des vibrations ; car ils ont été fixés dans les murs et voûtes par un mortier de ciment, ce qui explique l'usage différent des vases employés antérieurement par les grecs et les romains. Il semble que l'objectif n'est pas le même entre les poteries acoustiques « *echea* » des grecs et ceux utilisés en moyen âge. Ça implique aussi une différence en position dans l'espace. Dans les églises elles se trouvent regroupées dans la partie orientale proche du chœur liturgique (Palazzo-Bertholon, B, 2013) ; donc proches de la source du son. Une différenciation majeure des poteries médiévales de celles des grecs et romains en matière de nombre. En fait, selon Vitruve, le nombre des vases acoustiques (*echea*) est déterminé, cependant, il est très variable dans les églises médiévales (Valière et al, 2013).

Les vases acoustiques (*Helmholtz resonators*) ont suscité l'intérêt de beaucoup de scientifiques entre 1830 et 1900 (Valière et al, 2013). L'intérêt est en rapport à leurs tailles, formes et matériaux. En fait, elles présentent une panoplie de modèles employés dans les

différentes églises. Les résultats des travaux de recherches ont montré que le nombre des vases augmente en fonction du volume de l'église (Valière et al, 2013).

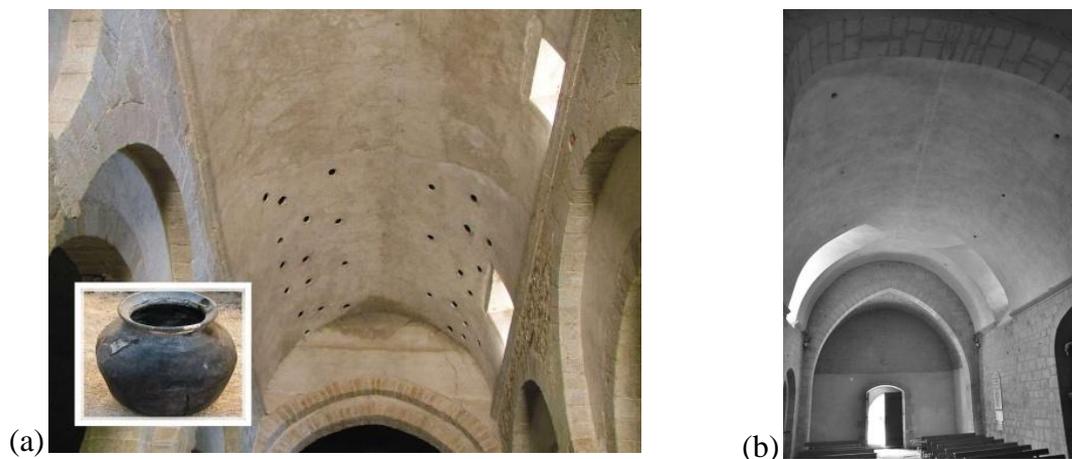


Figure 2.9. Vases acoustiques dans des églises en France : (a) Eglise Saint-Julien de Pommiers-en-Forez, Auvergne, (b) Eglise Saint-Martin, le-Redon. (Source : Valière, 2013)

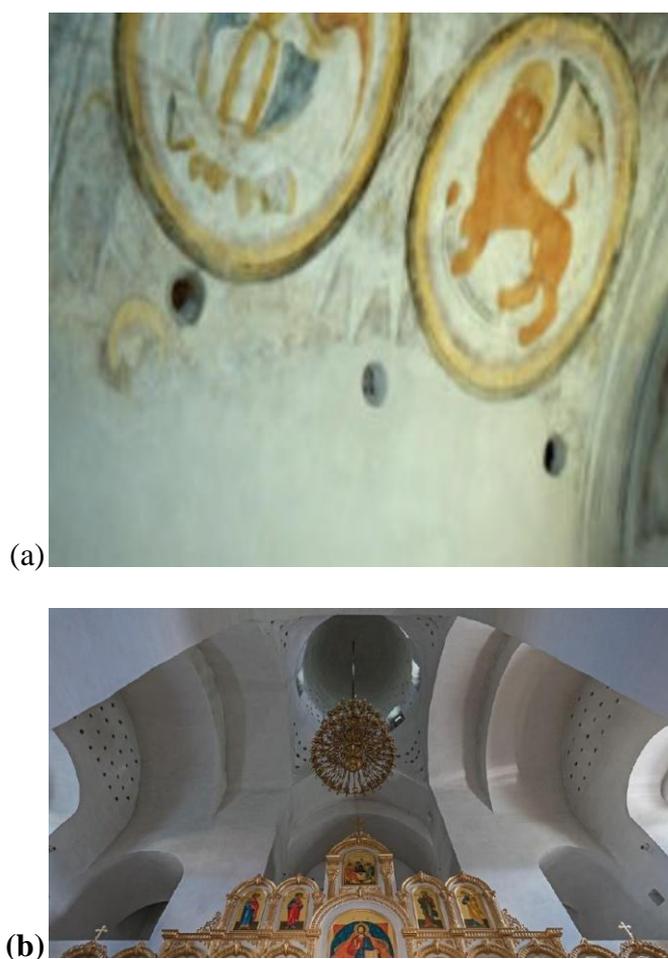


Figure 2.10. Les vases acoustiques des églises médiévales : (a) église Villetta (Suisse). (b) Église de l'Épiphanie, Pskov (Russie). (Source : Desarnaulds, 2001)

Le même dispositif a été employé dans les mosquées Ottomanes. Les historiens de l'art et de l'architecture considèrent la Suleymaniye comme le chef d'œuvre du grand architecte Sinan, toutefois, la Selimiye constitue l'apogée de sa conception acoustique. En fait, l'architecte a réussi à unifier l'intérieur de la salle de prière en un seul grand volume (79300 m³) (Kayili, M, 2005). Et pour y parvenir à renforcer la puissance de la source sonore, il plaça une mezzanine (*Mahfil*) en dessous du centre de la coupole centrale (Figure 2.11.c). Cette dernière est dotée de vases acoustiques pour participer à l'amplification du son en provenance de l'Imam ; en le répondant à travers toute la salle de prière (Kayili, M, 2005).

Dans les lieux de culte, le matériau joue toujours un rôle déterminant. Selon ses qualités d'absorption, le matériau est appliqué pour corriger des problèmes sonores en basses, moyennes et hautes fréquences, en fonction de la conception de l'espace et des intentions du concepteur, afin d'aboutir à une expérience acoustique optimale. En fait, les matériaux absorbants permettent la réduction des problèmes d'échos, par l'atténuation de l'intensité des sons réverbérés, ainsi que la réduction de l'énergie accumulée dans les salles de prières.

Les lieux de culte (surtout les églises et les mosquées) sont caractérisés par une conception basée sur une salle de prière centrale (principale) connectée à des espaces secondaires (galeries, absides, balcons,etc) adjacents. Pour une expérience sonore favorable il est impératif, pour ces espaces secondaires, d'utiliser des matériaux plus absorbants que ceux utilisés dans l'espace central (Baumann et al, 2008).

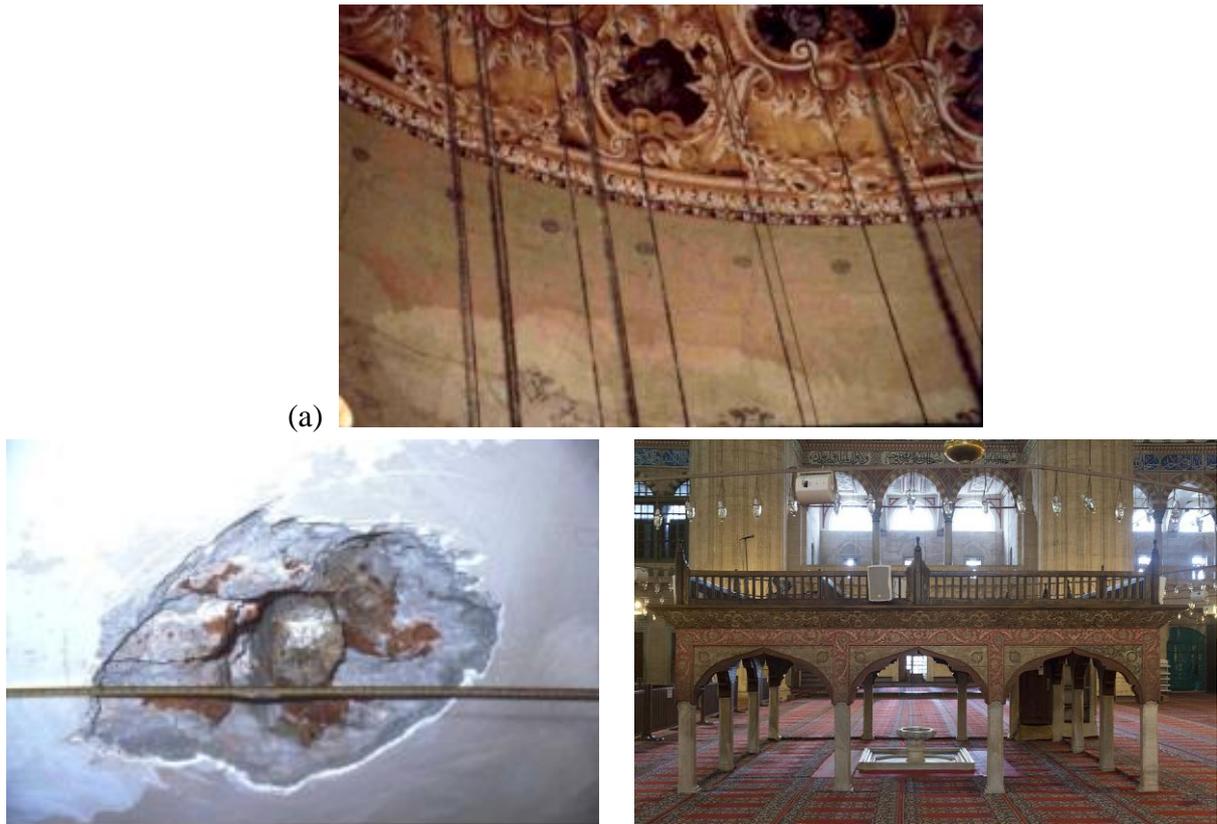


Figure 2.11. L'emploi des vases acoustiques dans les mosquées Ottomanes : (a) Répartition des vases acoustiques sur la coupole centrale de la mosquée Süleymaniye ; (b) Détail d'un vase acoustique inséré dans la coupole de la mosquée Ahmed Pacha. (c) Le Mahfil au centre de la mosquée Selimiye_Edirne (Turquie). (Source : Benferhat et al, 2022).

2.6. L'ACOUSTIQUES DANS LES MOSQUEES.

2.6.1. PERIODE PRECEDANT AVANT L'ARCHITECTE SINAN.

L'empire Ottoman est considéré comme l'une des trois principales dynasties (empires) qui ont occupé le monde islamique durant les trois derniers siècles de l'apogée de l'architecture islamique (16^{ème}, 17^{ème} et 18^{ème} siècle). Historiquement, l'empire Ottoman tient ses fondements à partir du 13^{ème} siècle (fragmentation de l'empire Mongole). Mais, essentiellement, c'est après la conquête de Constantinople (1453) par les Ottomans, que l'Empire a connu son âge d'or. Le premier siècle (16^{ème} siècle) a connu un développement architectural remarquable grâce au célèbre architecte Sinan. Mais avant de présenter les principales contributions des Ottomans il est jugé indispensable de passer en revue les contributions des scientifiques musulmans dans le domaine acoustique.

Il est rare de trouver des témoignages historiques (livres, écrits, travaux..) sur la genèse de l'architecture islamique, et encore moins sur l'acoustique architecturale.

L'acoustique contemporaine a vu le jour avec les travaux de plusieurs scientifiques, dont le plus connu est Sabine. Cependant, l'acoustique architecturale était bien présente avant l'ère moderne.

Au moyen âge, parmi les rares ouvrages sur l'importance de l'acoustique dans le monde musulman, nous citons ceux d'*Afridi* (Alfridi, M.A, 2013), de *Kadri de Toufane* (Toufane, K.H, 1960) et ceux d'*Ahmed Foued Bacha* (Bacha, A.F, 1998). Les musulmans ont contribué profondément dans l'histoire du développement de l'acoustique. Ils étaient derrière la découverte de la propagation du son dans l'air qui s'effectue sous forme d'ondes circulaires. Comme ils avaient évoqués l'influence des usagers sur l'acoustique, en attestant l'absorption du son par les corps des usagers (Alfridi, M.A, 2013). Les savants musulmans étaient les initiateurs de la théorie des différents types du son; « *les musulmans concluaient que le son diffère d'un animal à l'autre en rapport à la longueur de leurs cous (cols), la largeur de leurs gorges et la structure de leurs larynx* » (Alfridi, M.A, 2013). En l'absence d'amplificateur ils ont développé l'ingénierie du son (avant l'avènement de l'acoustique moderne). En évoquant la ressemblance de la réflexion du son à la réflexion de la lumière ; ils ont démontré le rôle des surfaces concaves dans la réflexion du son (Bacha, A.F, 1998). En fait, l'optimisation de l'usage des surfaces concaves par l'intermédiaire des calculs mathématiques précis permettaient de focaliser les ondes sonores provenant d'une source connue, et les orienter dans des directions précises pour assurer une clarté et une intensité du son (Bacha, A.F, 1998). Ces calculs sont en rapport avec la position et les dimensions des surfaces concaves par rapport aux sources sonores (Bacha, A.F, 1998). Une négligence de ces calculs provoquera des problèmes d'intelligibilité à cause de l'écho (Bacha, A.F, 1998). Les scientifiques musulmans étaient les précurseurs à expliquer le phénomène d'écho comme étant une réflexion de l'air par un haut mur (Alfridi, M.A, 2013). En fait, l'écho a été étudié par *Al-Jaldaki* (14^{ème} siècle) dans son ouvrage « *Al-Borhane fi Asrar Ilm Al-Mizan : أسرار علم الميزان* ». Dans cet ouvrage, l'auteur se basait sur ses prédécesseurs, à savoir, *Ibn Al-Haitham*, *Al-Tossi* et *Al-Chirazi*. Il définit le phénomène de réverbération par la réflexion des ondes sonores par la présence d'un obstacle dans leur chemin de propagation (Toufane, K.H, 1960).

Une affirmation de ces prouesses scientifiques peut être illustrée à partir des travaux destinés à l'analyse de l'acoustique dans la Mosquée de Sultane Hassan au Caire datant du 14^{ème} (1356-1362) à la même époque qu'*Al-Jaldaki* (dynastie des Mamlouks). L'auteur conclut que les concepteurs de cet édifice devaient avoir des connaissances dans le

domaine de l'acoustique ; vu les performances sonores de l'édifice en question (Elkhateeb et al, 2007).

2.6.2. LA CONTRIBUTION DE L'ARCHITECTE SINAN.

L'architecture Ottomane a largement enrichie l'héritage architectural Islamique. Certes, ils ont produit une architecture influencée par un immense héritage byzantin, mais ingénieusement réappropriée au répertoire de l'architecture Islamique. Elle fut rapidement répandue à travers les provinces conquises du moyen orient jusqu'au Maghreb. Contrairement aux dynasties les précédents, les archives des Ottomans témoignent des noms des architectes, des plans et des descriptions des principales intentions des concepteurs. L'un des plus célèbres architectes de cette époque, et l'auteur des principales réalisations de cet empire fut le Grand Mimâr Sinan (1490-1588).

Etant l'architecte principal du sultan, Sinan était chargé de l'aspect plastique des œuvres architecturales, en plus de la conception de villes, d'ouvrages d'art, ...etc. Plusieurs architectes, ingénieurs et ouvriers travaillaient sous ses ordres. Toutefois, la qualité acoustique des constructions constituaient son point fort et il la décrivait lui-même dans ses écrits. Ce qui va suivre mettra en exergue les principales contributions de Sinan dans le domaine de l'acoustique.

2.6.2.1. ORGANISATION SPATIALE.

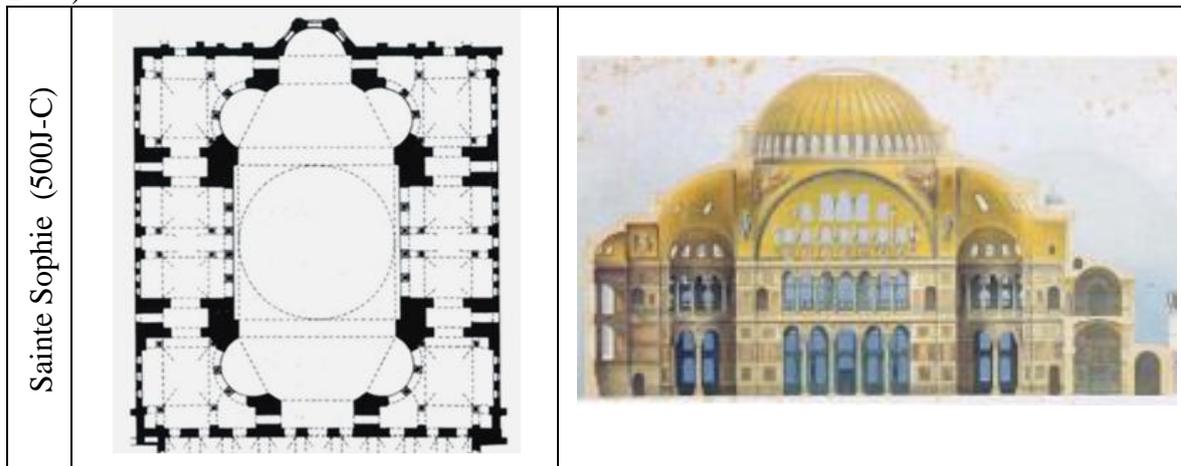
Les historiens s'accordent sur l'influence de l'architecture de la sainte Sophie sur le développement du style architectural ottoman. Etant considérée comme un modèle ; certains historiens expliquent que Sinan avait tenté de dépasser sa prouesse technologique (la Sainte Sophie) à travers l'architecture de la Souleymanyne à Istanbul et de la Sélimye à Edirne. Certes, mais une analyse minutieuse des différentes réalisations de Sinan montre une nette évolution de l'architecture Ottomane, en s'inspirant de l'architecture byzantine pour produire une autre architecture en harmonie avec l'histoire et l'usage de l'architecture musulmane dans le monde.

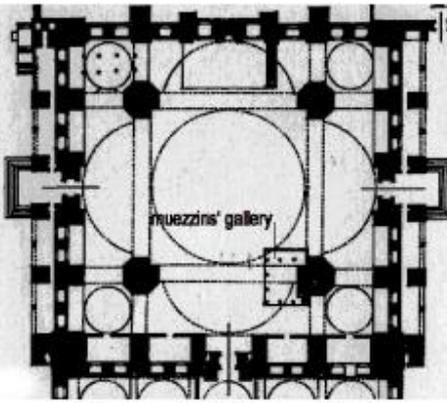
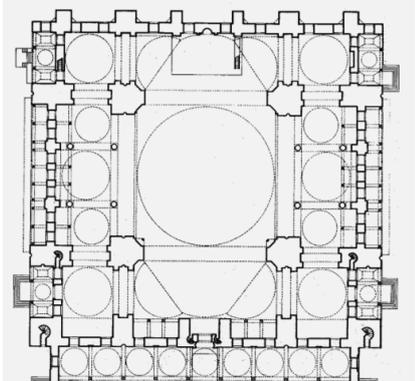
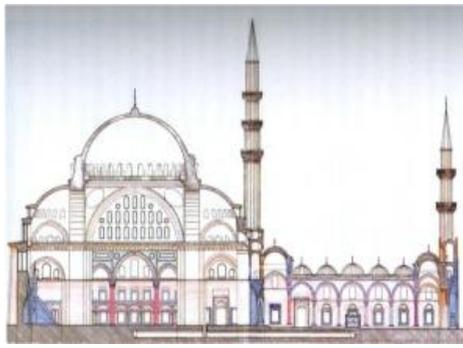
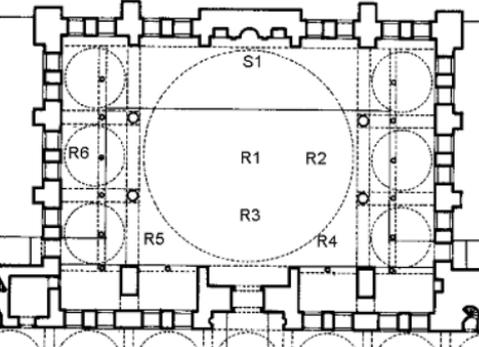
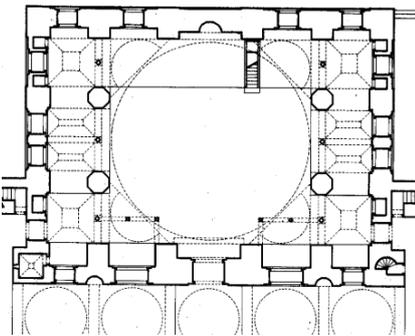
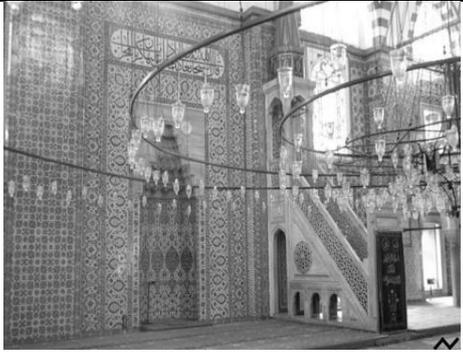
Les plans des principales mosquées de l'empire Ottoman peuvent être ordonnés chronologiquement comme suit : la Sainte Sophie (cathédrale byzantine transformée en mosquée), puis ; les mosquées : Shehzade (1548 J-C), Souleymanyne (1557 J-C), Mihrima (1560 J-C), Rustem Pacha (1561 J-C) et enfin Selimiya (1574 J-C). Les trois principales grandes mosquées étant: Shehzade, Souleymanyne et Selimiya ; avec des volumes acoustiques respectivement de 50.000m³, de 115.000m³ et de 79.000m³. La lecture des

différents plans des mosquées par Kayili (Kayili, M, 2002) dévoile une volonté d'optimiser l'intelligibilité du son à l'intérieur des lieux de prière. Cette optimisation se traduit par la simplification des plans (organisation spatiale) en un volume cubique unifié couvert par une grande coupole, en remplacement du volume longitudinale constitué de plusieurs espaces et couverts par des demi-coupoles de contrebutement, sous la coupole centrale caractéristique de la Sainte Sophie (Tableau 2.2). Sinan avait déployé toute son expérience, de plusieurs années, de conception de mosquées, afin de corriger l'acoustique de ces espaces (comme il a précisé dans ses écrits ; le livre 88 de) ont valu à Sinan la concrétisation de la mosquée Sélimeya, considérée par son architecte comme son chef d'œuvre.

De ce qui précède, il semble que du point de vue acoustique, la conception idéale de la mosquée ottomane ; consiste en un grand volume cubique unifié et non divisé (pas de petits volumes), couvert par une grande coupole centrale entourée par de petites coupolettes. L'objectif est d'amplifier le son et d'avoir un temps de réverbération relativement plus long pour répandre le son dans tous l'espace ; même au moment des principales congrégations lorsque la salle de prière est entièrement occupée par les prieurs (Kayili, 2002 ; Eldien, et Al Qahtani, 2012).

Tableau 2.2. Evolution des mosquées conçues par Sinan (forme du plan et de couverture) : (a), (b), (f) (Source: Sü Gül, Z, 2015) ; (c) (Kayili, 2005), (g), (h), (i), (j), (k) (Topaktaş, 2003)



<p>Shehzade 1548</p>		
<p>Sulaymaniye 1550-1557</p>	<p>(e)</p> 	<p>(f)</p> 
<p>Mihrima Sultane (1560)</p>	<p>(g)</p> 	<p>(h)</p> 
<p>Rustem Pacha 1561</p>	<p>(i)</p> 	<p>(j)</p> 

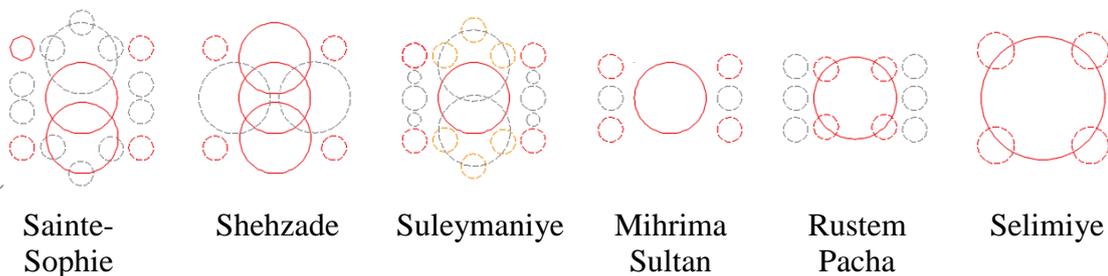
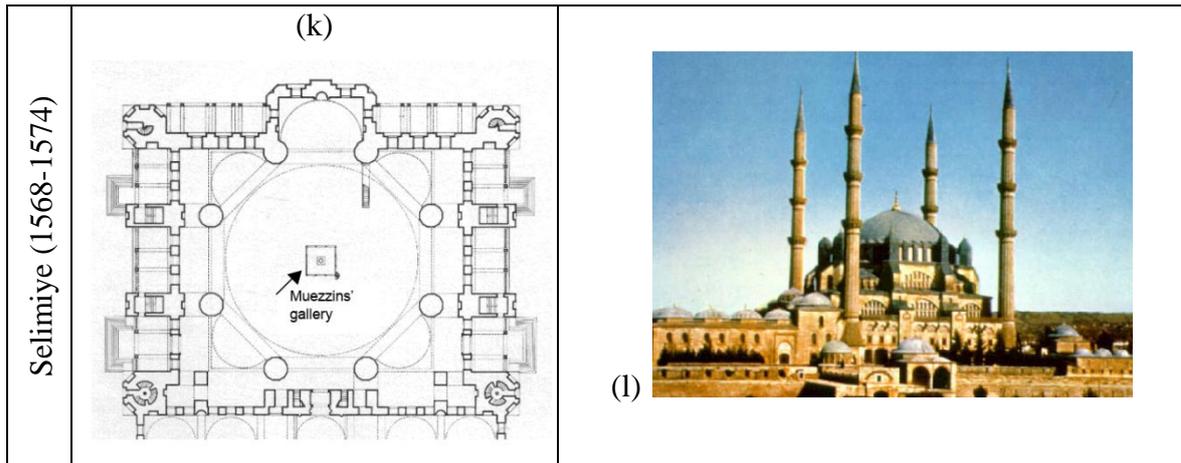


Figure 2.12. Schémas de l'évolution des plans des mosquées conçues par Sinan. (Source : Auteur)

2.6.2.2. LE MAHFIL.

Le système acoustique développé par Sinan est beaucoup plus complexe. En fait, en plus de la forme de l'espace et de sa couverture qui ont été adoptées par le Mimâr Sinan, un autre dispositif va être mis en place, appelé le *Mahfil*. Il s'agit d'un mobilier comme un balcon, souvent en bois dans les mosquées sobres et en marbre dans les mosquées les plus importantes. Le *Mahfil* ou le balcon réservé au *Muezzine* (Mouadhine : المؤمن), existait bien avant Sinan. Grâce à son génie ; Sinan a su le réapproprier pour en faire un dispositif acoustique indispensable. Il l'utilisa pour optimiser la qualité du son ; en assurant une bonne intelligibilité et une clarté du son pour tous les utilisateurs (quelques soit la position). Plus précisément, pour contrecarrer le problème d'inintelligibilité due aux réflexions tardives. Sinan a étudié l'emplacement de ce mobilier réservé au *Muezzine* pour répéter les ordres de l'Imam en une voix plus forte entendue dans toute la salle au moment de la prière. Sa position devait permettre au *Muezzine* d'observer l'Imam au moment de la prière.

L'analyse des œuvres de Sinan démontre que l'usage du *Mahfil* n'a été de manière uniforme ; mais il se présente sous différentes dimensions, positions et nombre ;

parfois dans la même salle de prière. Il semble que le nombre et la position de *Mahfil* était en rapport avec la forme du plan et de la toiture.

Formellement, les *Mahfils* étaient placés(s) aux alentours de la coupole centrale (adossés à l'un des piliers). Lorsque la salle de prière est très grande ; l'architecte avait préconisé un nombre important de *Mahfil* ; mais de différentes tailles (dimensions).

L'analyse de la position, la taille et le nombre de *Mahfil* selon un ordre chronologique, démontre qu'il était adossé au deuxième pilier (à l'arrière) à la droite, sur lequel s'appuie la coupole centrale (mosquée Shehzade). Puis en raison de la grandeur de la mosquée Suleymaniye, Sinan avait implanté trois *Mahfils*. Le premier adossé au premier pilier (à l'avant) à droite, c'est le plus grand, les deux autres de la même taille, positionnés de manière symétrique, adossés aux deux piliers postérieurs. Quant à la mosquée Mihrima Sultane, l'observation des plans, coupes et photos d'intérieures ne permet pas de localiser un *Mahfil*. La mosquée Rustem Pacha contient deux *Mahfils* de tailles similaires positionnés symétriquement par rapport à la coupole centrale, adossés aux deux piliers postérieurs. A la mosquée Selimiye, caractérisée par un plan radio-concentrique (une symétrie radiale), il se trouve que la position idéale de l'unique *Mahfil* est exactement sous le centre de la coupole centrale. La figure 2.13 illustre un schéma simplifié des différents *Mahfils* dans les mosquées réalisées par Sinan.

A partir de la lecture des différents plans, la synthèse principale est en faveur d'une recherche d'une forme caractérisée par une symétrie radiale, car vu l'étendue de la mosquée Suleymaniye (forme longitudinale) Sinan avait besoin de plusieurs *Mahfils* réparties sur le long de la salle de prière. En revanche la volonté ressentie de vouloir unifier la salle de prière par la suppression de la nef narthex (en supprimant les deux coupoles de contrebutement situées sur l'axe de mihrab : voir les plans des deux mosquées Mihrima Sultane et Rustem Pacha), puis la suppression des galeries latérales observées dans la mosquée Selimiye, témoignent de l'éloignement du modèle inspiré par la Sainte-Sophie en faveur d'un plan radio-excentrique (symétrie radiale) pour unifier l'espace intérieur de prière. Cette volonté est renforcée par la position du *Mahfil* qui gagne une position centrale dans la salle de prière.

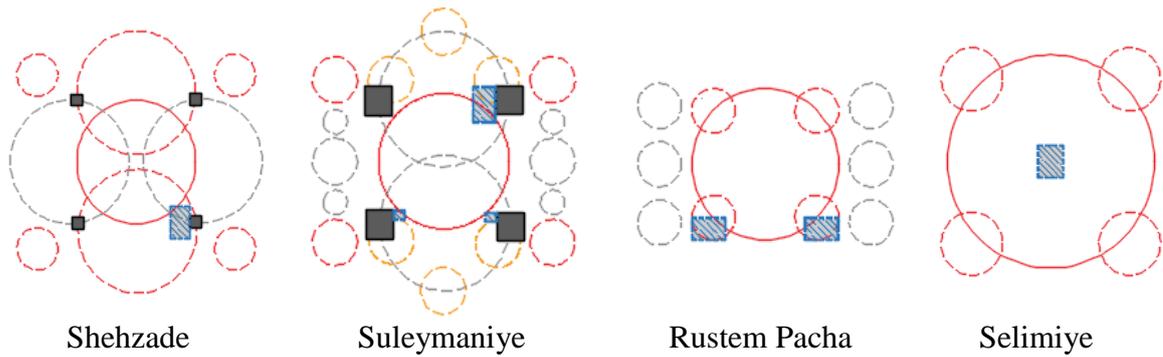


Figure 2.13. Evolution de la position du *Mahfil* selon l'évolution des plans des mosquées conçues par Sinan. (Source : Auteur)

2.6.2.3. DETAILS ORNEMENTAUX.

D'après Sü Gül (2015); les muqarnas (stalactites) employées par Sinan n'avaient pas de rôle constructif, car elles sont réalisées en plâtre. Ces stalactites avaient un impact sur la qualité acoustique à l'intérieur de la salle de prière. Elles sont souvent employées pour assurer le passage des charges à partir de la circonférence de coupole vers le tambour qui est de forme octogonale. Pour assurer cette transmission de charges, les stalactites doivent être réalisées en matériaux rigides tels que la pierre. Bien au contraire, l'usage du plâtre au lieu de la pierre laisse penser qu'elles étaient employées pour mieux répandre le son dans la salle de prière grâce aux petites surfaces des stalactites (Sü Gül, Z., 2015).

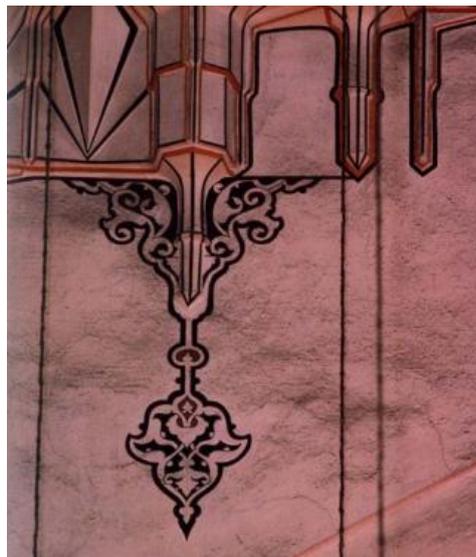


Figure 2.14. Détails de Muqarnas (stalactites). (Source : Sü Gül, 2015)

2.6.2.4. CAVITES RESONANTES.

Les cavités résonantes ou jarres ou *sebu* (en turque) ; ainsi appelé les résonateurs de Helmholtz, est un dispositif employé depuis l'antiquité dans les théâtres grecques et romains. Il faut rappeler que les cavités résonantes étaient connues en Anatolie ; les prédécesseurs des Ottomans qui sont les Seljukides les ont employés d'ores-y-déjà dans leurs mosquées (Kayili, 2002, 2005 ; Saoud, 2004). Cependant l'usage des cavités résonantes dans les mosquées (depuis les seldjoukides) n'était pas répandu de la même manière que dans les théâtres antiques (expliqué précédemment dans : la partie 2.5. L'acoustique des monuments historiques, page : 49).

En fait, ce dispositif avait été mentionné par Sinan dans le livre 88, où il précisait le nombre de cavités (144 dans la mosquée Shehzade, 255 dans la Suleymaniye). D'après Mutbul Kayili, les cavités résonantes ont été employées pour corriger le temps de réverbération et pour contrecarrer l'écho provoqué par les multitudes réflexions engendrées par les coupoles (Kayili, M, 2005), en transformant la salle de prière en un champ diffus.

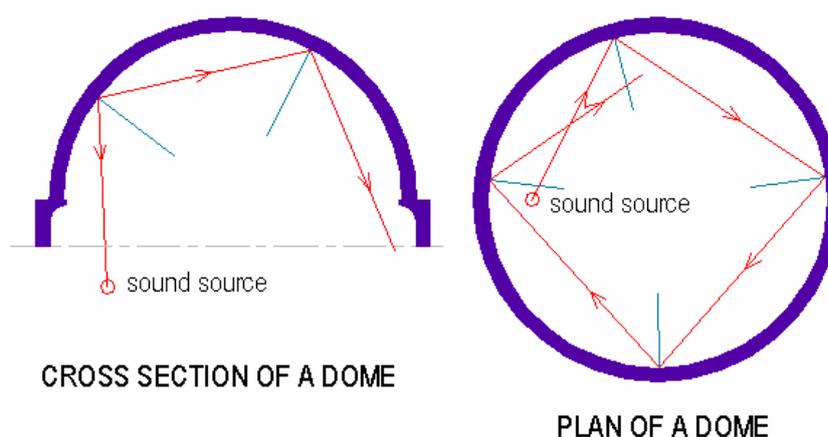


Figure 2.15. Réflexions du son par la coupole selon Kayili, M. (Source : Kayili, 2005)

Cependant plusieurs chercheurs évoquent l'apport positif de la coupole au phénomène sonore (Baumann et al, 2008), comme expliqué dans le chapitre I. Il est certain que les cavités résonantes placées dans les coupoles dans les mosquées Ottomanes participent à l'amélioration de l'acoustique dans les salles de prière. Leur rôle est d'améliorer le son en basses fréquences, les petites cavités fonctionnent sur les fréquences entre 100-120 Hz, alors que les cavités les plus grandes assurent une amélioration du son en fréquences entre 180 et 200 Hz (Kayili, M, 2002).

Les mosquées ottomanes, en Turquie, ont fait l'objet de plusieurs opérations de restauration ce qui a provoqué la fermeture de plusieurs cavités. Lors des travaux de

restauration entrepris par **Beyhan Ercag** ; une découverte de 75 cavités dans la mosquée bleue car elles étaient obstruées par des couches de plâtre. Au fur et à mesure, les travaux de restauration s'enchaînent dans d'autres mosquées, pour découvrir 144 cavités à la mosquée Shehzade, 64 cavités à la Suleymaniye entre 1961-1967, alors elle devait contenir pas moins de 255 *sebus* (cavités), en référence au livre 88 de Sinan. Plutard, le nombre de cavités s'élève à 224 au lieu de 255 (Kayili, M.2002 ; Atay, G. et Gül, S.Z., 2020).

Le même problème a été constaté dans la mosquée Selimiye à Edirne. Dans cette dernière, le nombre des cavités n'est pas reconnu car elles ont été remplies avec du plâtre.

En fait, avant la restauration des cavités ; il a été observé un long temps de réverbération en basses fréquences, dans les mosquées ayant subi des restaurations engendrant la fermeture d'un grand nombre de cavités résonantes ; à savoir la Selimiye. Le problème d'écho ressenti dans ces mosquées avant leurs restaurations, démontre l'importance de ce dispositif dans l'amélioration de la clarté et de l'intelligibilité dans les mosquées ottomanes.

Il existe plusieurs types de cavités résonantes (voir tableau ci-dessous), elles sont toutes construites en terre « *terracotta vessels* ». Il faut noter que les informations à propos de ce dispositif restent incomplètes, en raison des transformations, des restaurations successives opérées durant des siècles (telles est le cas de la Selimiye). Autrefois, dans certains édifices un scanner par laser a été exploité pour détecter la présence des cavités sous les revêtements (le cas de la mosquée Sokullu). Les informations concernant le nombre, la position et les dimensions des cavités résonantes sont mentionnées dans le tableau suivant ; à partir de l'article publié par Mutbul Kayili (Kayili, M, 2002) et du Gülnihân Atay et Zühre Sü Gül (Atay, G et al, 2020).

Tableau 2.3. Nombre et position des résonateurs en fonction des volumes des mosquées.

Mosquées	Volume (m ³)	Cavités résonantes			
		Nbre	Position	Dimensions (cm) : diamètre*profondeur	Type des pots
Shehzade (1548)		144	- Dome central. - Murs d'entrée.	20*40	Clay pipe "künk"
Suleymaniye	115000	224 (255)	- Dome central.	30*50	Neckless /

)			Amphora
Sokullu	5700	163	- Dome central. - Domes de contrebutement.	(semblables à Suleymaniye	Inconnu
Selimiye	79300	/	- Dome central.	/	Inconnu
Sultane Ahmet (Bleue)		75	- Dome central.	50cm height	Clay pipe "künk"
La mosquée Yeni (1663)		15	- Pendentifs sous le dôme central et les coupoles de contrebutement	Profondeur variable : 20-90cm	Neckless / Amphora

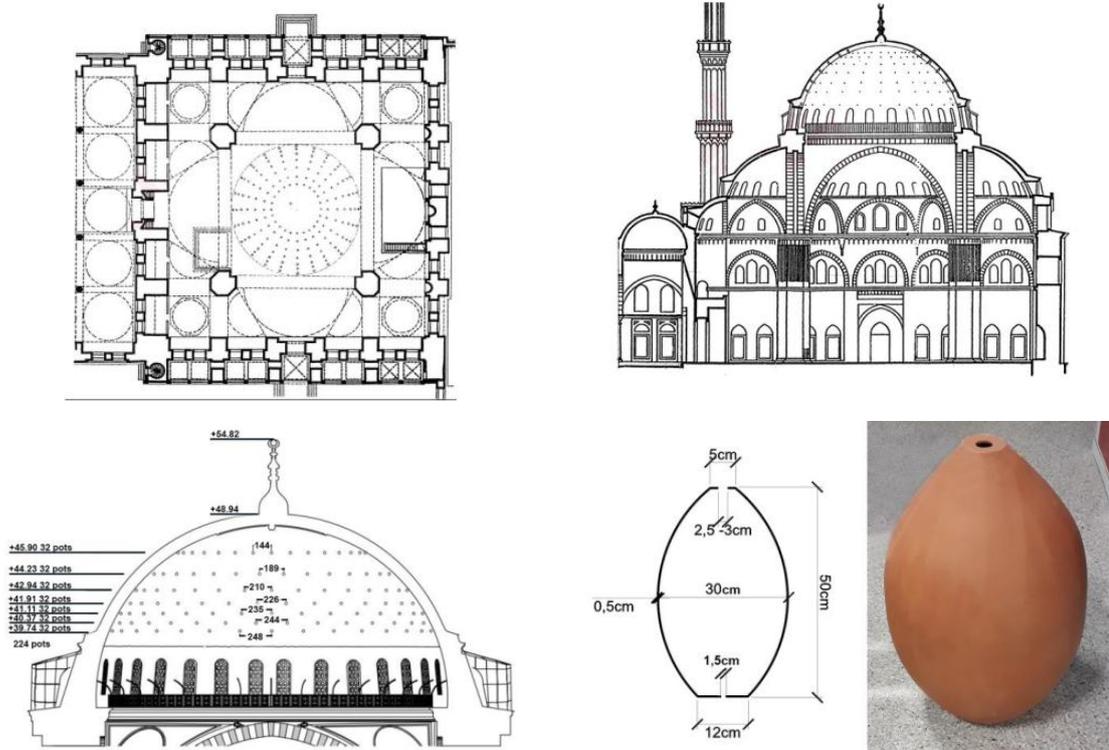


Figure 2.16. Forme, emplacement et dimensions des résonateurs trouvés dans la mosquée Sehzade. (Source : Atay, G. and Z.S. Gül, 2020)

2.6.2.5. MATERIAUX DE CONSTRUCTION.

La beauté des mosquées Ottomanes, néanmoins réalisées par *Sinan*, est admirable. Elles sont toutes belles et riches en matériaux nobles, ramenés des quatre coins du monde. Un décor élégant, avec un usage très raffiné des différentes techniques de décorations ; de la peinture florale, à la céramique de différentes couleurs notamment le rouge et le bleu, ainsi que la calligraphie.

De point de vue acoustique, il est important de répertorier les matériaux employés, car les choix devraient avoir un impact indéniable sur la qualité acoustique des mosquées.

A l'image de la Suleymaniye, les deux principaux matériaux de construction pour l'ossature des édifices furent la pierre et la brique en terre cuite. En fait, la pierre de calcaire, taillée a été utilisée pour construire les murs porteurs et les arcs supportant la coupole centrale, les contrebutelements et les petites coupoles. En revanche et en raison de sa légèreté, la brique en terre cuite (différents types), a été utilisée dans la construction de coupoles (Sü Gül, Z, 2019).

Du point de vue acoustique, les matériaux de revêtement jouent un rôle décisif. L'examen des différents édifices dévoile une diversité de matériaux de revêtement. A l'exemple de la suleymaniye, Selimiye, Mihrimah et bien d'autre édifices, les murs intérieurs restent à l'état nu (en pierre de calcaire), alors dans les mosquées Shehzade et Ahmet, elles sont richement décorées avec de la faïence (céramique) de différentes couleurs ; bleu, rouge. Parfois des surfaces sont peintes en conglomérat et/ou couvertes en marbre Proconnésien (Sü Gül, Z, 2019).

Le plafond est peint d'une peinture coloriée, ainsi que la coupole centrale et ses pendentifs. Les petites coupoles en brique sont coloriées avec des couleurs de style doré (Sü Gül, Z, 2019).

Le marbre est aussi l'un des matériaux de revêtement le plus employé. Du marbre blanc pour le mihrab et minbar, du marbre porphyre égyptien (œil de moineau rouge) pour les colonnes. En plus des vitraux sur les deux cotés du mihrab (Sü Gül, Z, 2019).

Les mêmes matériaux étaient utilisés dans tous les types de constructions de l'époque, en revanche, Sinan avait le génie d'inventer un revêtement en plâtre avec des performances acoustiques remarquables. Lors des différentes opérations de restaurations, le plâtre initial a été remplacé par un autre ordinaire, ce qui a provoqué des problèmes d'acoustiques. Le recours aux écrits de Sinan (le livre 108) révèle la composition de ce plâtre, notamment celui qui a été utilisé dans le revêtement du dôme (Sü Gül, Z, 2019). Il s'agit d'un mélange de chaux, de sable fin, de gypse, de lin et de la paille, appliqué en plusieurs couches afin d'assurer la couverture de la pierre en calcaire. Même les joints ont été effectués avec la même composition de plâtre. Le lin est appliqué dans les revêtements en plâtre des coupoles. Selon le livre 108 ; une quantité de 134 quintaux de lin ont été achetés pour les travaux de réalisation de la Suleymaniye (Sü Gül, Z, 2019).

Quant au bois, son utilisation se limite aux portes, fenêtres, plafonds plats et quelques mobiliers, à l'exception des fenêtres sur les cotés du mihrab qui ont été fabriquées en volets en bois *kündekari* (Sü Gül, Z, 2019).

Et finalement le sol est couvert par une moquette dotée de structure en paille (Sü Gül, Z, 2019).



Figure 2.15. Décoration de la coupole de la mosquée Suleymaniye. (Source : Sü Gül, 2019)

CONCLUSION.

Ce deuxième chapitre, vient détailler l'acoustique en fonction de la nature de l'usage de l'espace. Après ce bref exposé ; l'architecture des lieux de culte s'adapte parfaitement aux exigences acoustiques spécifiques à chaque culte.

En fait, l'acoustique diffère d'un usage à l'autre, en référence à la forme du bâtiment, à la nature de sources sonores et aux pratiques à l'intérieur de l'espace (position des auditeurs, pratiques, ... etc).

Les lieux de culte étant riches en symbolisme, généralement, ressenti de manière anonyme par tous les humains ; en impressionnant les usagers avec une qualité acoustique appropriée. Ce symbolisme est le résultat de la combinaison de **style architectural-sources- utilisateurs**.

Il se trouve, que certains chercheurs (Baumann en 2008 ; Kleiner en 2010), assimilent l'acoustique des mosquées à celui des églises. Cependant, ces espaces prouvent des différences importantes selon Prodi, et Elkhateeb. Parfois, il existe même des

différences dans des bâtiments appartenant au même culte, cela relève des différences de régions, de périodes (historique).

Il faut rappeler que la qualité acoustique des mosquées ottomanes n'était pas le fruit du hasard. En fait, les scientifiques musulmans, avaient contribué à l'histoire de l'acoustique. Ils leur revient la découverte de propagation du son dans l'air sous forme d'ondes circulaires. Comme ils comprirent l'influence des usagers dans l'absorption des ondes sonores.

Comme ils ont démontré le rôle des surfaces concaves dans la réflexion du son. Ils ont optimisé l'usage des surfaces concaves en utilisant des calculs mathématiques précis ; afin de focaliser les ondes sonores d'une telle source, et les orienter dans des directions précises pour assurer une clarté et une intensité du son (Bacha, A.F, 1998). Comme ils étaient les précurseurs à expliquer le phénomène d'écho comme étant une réflexion de l'air par un haut mur (Alfridi, M.A, 2013)

Plusieurs solutions architecturales ont été développée, par les ottomans, afin d'assurer une meilleure qualité acoustique. Sinan, avait développé une conception acoustique appropriée aux mosquées. Son système prévoit une organisation spatiale centrale. Ainsi que l'emploi de dispositifs spécifiques, comme l'introduction du *Mahfil*, l'utilisation des détails ornementaux, à l'exemple des muqarnas en plâtre. Ainsi que l'emploi des cavités résonatrices pour la correction du temps de réverbération. Le choix précis des matériaux pour renforcer l'harmonie du système acoustique.

En ce qui concerne les mesures acoustiques ; il n'existe pas une valeur optimale du temps de réverbération spécifique aux mosquées en situation d'occupation, hormis les propositions faites par Kayili (1989, 2005) et Orfali (2007), restent toutes les deux sans validation des comités scientifiques. En fait, l'acoustique des mosquées nécessite un temps de réverbération ; relativement long, pour l'accomplissement des différentes activités (Kleiner et al, 2010).

L'assimilation du temps de réverbération des mosquées à celui des salles de conférences (*Speech room*), en se basant uniquement sur le seul critère de « la parole » est infondée, car il en résulte des salles de prière dotées d'une ambiance plutôt sèche (*dry*), inappropriée aux mosquées.

Pour l'analyse de l'acoustique d'anciennes mosquées ; Prodi conclut de la volonté d'offrir aux usagers une sensation de majesté, un symbolisme divin. La comparaison entre les églises et les mosquées ottomanes en particulier, dévoile un temps de réverbération plus long en faveur des mosquées Ottomanes et Mumlouks (Karabiber, 2002).

Comme il faut mettre l'accent sur l'une des solutions architecturales importantes pour l'acoustique ; dont les anciens concepteurs avaient conscience, il s'agit du ratio « volume par personne (V/N) ». Les chercheurs se sont aperçus que les mosquées ottomanes présentent des taux au-delà de 10 m³/per. Elkhateeb recommande un minimum de 7 m³/personne (Benferhat et al, 2022) ; toujours supérieur au ratio défini par Maekawa et Lord (4 et 6 m³/pers).

Le STI est souvent considéré comme bon à partir de 0.6 ; alors que Yilmazar et Acun concluait qu'un STI à 0.56 (mesuré sans utilisation d'amplification) est approprié dans le cas des mosquées, ce qui signifie une écoute claire (Benferhat et al, 2022).

Chapitre III. APPROCHE ET CONTEXTE D'ETUDE

INTRODUCTION.

Le présent chapitre sera consacré à la désignation de l'approche d'étude et à la délimitation du territoire et de la période concernée par cette étude.

Avant d'apporter les précisions méthodologiques, il est impératif de se positionner par rapport à l'approche qui sera adoptée. Etant donné que l'Acoustique relève du domaine de la physique, alors notre corpus est constitué de mosquées anciennes ; dont certaines sont classées comme patrimoine national ; une approche dite *hybride* va être adoptée.

Le présent chapitre tente aussi d'aborder ; de manière succincte, l'évolution de l'architecture ottomane des mosquées. Le but est d'énumérer les principales caractéristiques architecturales de mosquées afin de les comparer avec celles réalisées en Algérie, durant la présence ottomane. Sachant que l'architecture des mosquées en Algérie est différente ; la fusion des deux styles, est rendu possible, vu l'étendue temporelle de la présence ottomane en territoire algérien. De cette fusion découle un style ottoman conjugué avec le savoir faire local. Il est question d'aborder les conditions d'émergence de ce style.

Quant au corpus d'étude ; qui devrait couvrir une superficie très importante du territoire national, et qui reflète un héritage ottoman de trois siècles d'existence (entre le 16^{ème} et le 19^{ème} siècle) ; le présent chapitre vient pour cerner le contexte à la fois géographique et temporel pour une récapitulation des mosquées ottomanes réalisées auparavant en Algérie. Il s'agit de mettre le point aussi sur l'état de cet héritage ; selon des critères scientifiques ; définis lors de la charte de Venise, et la Déclaration de NARA. Il s'agit donc, d'une méthodologie d'identification des édifices constituant le corpus, soient les critères de sélection des édifices et le nombre des édifices à analyser.

3.1. APPROCHE HYBRIDE POUR UNE PRISE EN CHARGE DES MONUMENTS HISTORIQUES : VERS UN HERITAGE INTANGIBLE.

3.1.1. GENESE DU PATRIMOINE.

Si aujourd'hui la définition commune du *Patrimoine* est celle adoptée à partir de 1969 par l'UNESCO¹, étant l'organisation intergouvernementale qui gère le patrimoine de l'humanité ; la notion de patrimoine se dit très ancienne, voir même ancrée dans l'histoire. Les appellations ont évolué avec le temps ; autrefois, antiquité, *monument* (*monumentum=souvenir*) puis *patrimoine* (*patrimonium*) (Desvallées, A, 2003).

Avant l'adoption du terme *Patrimoine* ; l'expression la plus répandue fut « *Monument historique* » employé pour la première fois par "Millin de Grandmaison" lors de la démolition de la Bastille (Desvallées, A, 2003). Cette expression resta la plus conventionnelle jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle. A cette époque, le mot *patrimoine* n'est pas encore très répandu ; vu sa connotation plutôt juridique ; qui relève de la propriété privée (transmission d'héritage personnel). Ce n'est qu'après la révolution française que le terme patrimoine changera de signification, en passant du domaine juridique privé, au domaine public (universel) pour désigner biens et propriétés communes. A partir de ce moment ; une sensibilité s'est développée pour tout bien matériel, ayant une valeur historique et/ou artistique. L'emploi du terme *Patrimoine* resta très rare, dont on trouve différentes expressions « *Patrimoine de tout le monde* » par Guizot, ou « *Patrimoine de l'univers* » évoqué par Chateaubriand, ainsi que « *Patrimoine du genre humain* » utilisée par Romain Rolland. Vers 1889 une autre expression fait apparition dans un ouvrage de Droit ; dont l'auteur "De Calvo" utilise « *Patrimoine commun de l'humanité* ».

L'évolution de l'usage du mot Patrimoine continue jusqu'à son affirmation en 1931, lorsque le Secrétaire de l'Office International des Musées (l'OIM), *Euripide Foundoukidis* employa le terme *Patrimoine* dans un discours en langue française lors de la conférence internationale sur l'Archéologie ; tenue à Athènes.

A partir de 1945 ; le concept « patrimoine » va encore se développer en adoptant une loi sur la préservation de livres, et autres monuments d'intérêt historiques et scientifiques. A cette époque ; c'est le terme *Patrimoine* qui s'imposa en langue française ; alors en

¹ Définition de l'Unesco : « l'ensemble de tous les biens naturels ou créés par l'homme sans limite de temps ni de lieu »

anglais ; son équivalent est plutôt « *Héritage* ». C'est dans cette période (1930-1945) que le patrimoine fera entièrement partie de la dimension culturelle (Vecco, M, 2010). Le terme *Patrimoine* offre une vision horizontale ; intégrant un vaste domaine d'application ; contrairement au terme « *Héritage* » qui offre plutôt une vision verticale ; limitée à la transmission des biens (Vecco, M, 2010).

3.1.2. EXPANSION DU CONCEPT PATRIMOINE.

L'expression « *Patrimoine culturel* » a été adoptée en 1959, par André Malraux (Ministre de la culture Français), dans l'arrêté 59-889. Jusqu'à la fin des années 1970s, cette expression fut limitée à « *la propriété nationale* » et « *la propriété artistique* » (Vecco, M, 2010).

En 1962 ; la notion de patrimoine (héritage en anglais) s'élargie pour englober la sauvegarde des paysages naturels et/ou créés par l'homme, qui portent un intérêt culturel ou esthétique, et qui constitue un ensemble harmonieux. Pour englober davantage les « *zones humides* » en 1971, et la « *terre* » comme héritage de l'humanité en 1972 ; considérée comme une ressource fragile et limitée.

Avec l'indépendance d'anciennes colonies occidentales; plus précisément durant les années 1970 ; ces pays émergents avaient contribué aux différentes conférences l'ICOM sur le patrimoine. À l'occasion de la neuvième conférence générale de l'ICOM, tenue à Grenoble en 1971, ces pays avaient contesté la vision occidentale en revendiquant la relativité du patrimoine à sa société ; donc à l'humanité. En conséquence, une nouvelle définition de l'humanité a été nécessaire. Une réponse à ce problème a été apportée par René-Jean Dupuy ; qui proposa la définition suivante : « *l'humanité est un concept dynamique. Pas seulement interspatial, mais intertemporel. [Elle] rassemble les contemporains, mais aussi les générations à venir. L'humanité se pense au-delà des vivants* » (Desvallées, A, 2003).

3.1.3. DU MATERIEL A L'IMMATERIEL.

Le caractère dynamique et changeable du terme humanité, va permettre un nouveau regard envers la prise en charge du Patrimoine humain. En conséquence ; une nouvelle définition du patrimoine fut proposée par l'architecte Pedro Ramirez-Vasquez (Ministre de la culture en Mexique) à l'occasion de la conférence générale de l'ICOM, en 1980. Une définition assumant un caractère dynamique au terme de patrimoine : « *Le patrimoine*

peut donc se comprendre comme un processus de création et de renouvellement, assurant la continuité entre la matière, la vie, l'espace et le temps. » (Desvallées, A, 2003) ; il s'agit effectivement d'une mutation de la signification du terme *Patrimoine*, partant d'une logique purement objective vers une logique plutôt subjective (Vecco, M, 2010).

Cette nouvelle définition va préparer l'émergence d'un nouveau concept : «*Le Patrimoine Immatériel* ». En fait, contrairement à la vision européenne sur le *Patrimoine*, à cette époque ; l'orient et/ou l'Afrique avaient une vision plutôt évolutive ; sous forme de rituel cyclique (à l'exemple des opérations de réhabilitation du temple d'Ise au Japon, le temple vaudou en Afrique). Outre, le patrimoine culturel matériel africain ne représente que 20% de l'ensemble du patrimoine culturel en Afrique (Vecco, M, 2010).

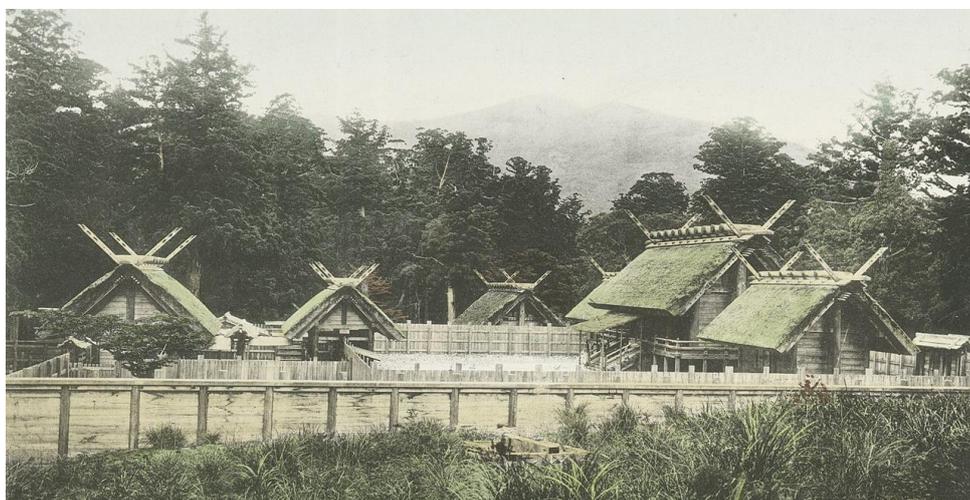


Figure 3.1. Le sanctuaire d'Ise au Japon. (Source : Swali, G, 2021)



Figure 3.2. Le Temple Vaudou au Togo. (temple Phyton). (Source : Lando, P, 2013)

A partir de la Charte de Burra (ICOMOS 1982), une autre étape commence, avec la protection de et la sauvegarde des sites culturels en raison de valeur esthétique, historique,

scientifique ou sociale. En 1996 (déclaration de San Antonio), une nouvelle modification importante concernant la protection et la conservation du patrimoine. Il s'agit de l'adoption de la Déclaration de NARA, qui consiste à un prolongement conceptuel de la définition de l'authenticité² fixée auparavant dans le Charte de Venise en 1964. Une nouvelle définition consiste à élargir les critères d'authenticité, autrefois liées à la cohérence physique (*la conception, les matériaux, la qualité d'exécution et le cadre*), pour englober, en plus, les spécificités culturelles des sociétés. Cette modification étant une réponse aux aspirations des sociétés orientales (notamment japonaise), reflète une différence du point de vue avec les sociétés occidentales, qui s'attachent plutôt au matériel. L'immatériel est au cœur du patrimoine des sociétés orientales, dont ils étaient les précurseurs ; à l'instar des japonais, dont la législation adoptait dès 1955, permettant la protection des biens culturels, des biens immatériels (théâtres, musique, danse), en plus des professions artisanales ; ainsi que les individus dotés d'un savoir faire dont ils sont chargés de le transmettre aux générations futures (Vecco, M, 2010).

A partir de la Charte de Cracovie (2000), le monument historique n'est plus considéré comme une entité physique uniquement, mais bien plus, porteur de valeurs ; nécessaires à la mémoire collective. Cette dernière définition est de nature évolutive avec le temps, comprenant ainsi les aspects liés aux actes et aux pensées des individus (Vecco, M, 2010).

3.1.4. L'ACOUSTIQUE POUR UNE CONSERVATION DU PATRIMOINE.

L'évolution du concept du patrimoine d'une simple connotation juridique à la fin du 18^{ème} siècle, jusqu'à nos jours ; étant une démarche de prise en charge des différents aspects liés aux monuments historiques. Dès lors, le vécu des populations ; sous ses diverses formes commence à être investi pour une réhabilitation des expériences sensorielles ; notamment spirituelles.

Une nouvelle conduite se concrétise pour une évaluation des environnements physiques dans les monuments historiques ; tel que les environnements lumineux, sonores, olfactives, ...etc. C'est ainsi que l'acoustique (étant le domaine scientifique destiné à évaluer les environnements sonores) ; devient l'un des outils pour une réhabilitation des expériences sensorielles des populations.

² Charte de Venise, 1964 : « satisfaire au test d'authenticité en ce qui concerne la conception, les matériaux, la qualité d'exécution et le cadre »

Plusieurs projets de recherche sont lancés à travers le monde. L'un des premiers projets ambitieux, lancé entre 2000 et 2005 fut le projet *CAHRISMA* (*Conservation of the Acoustical Heritage by the Revival and Identification of Sinan's Mosque's Acoustics*), qui investit le concept de l'héritage architectural **Hybride** (Elkhateeb, A.A, 2007). Un nouveau système d'identification pour examiner les environnements physiques ; à savoir l'acoustique et les caractéristiques visuelles ; il s'agit d'une approche nouvelle pour appréhender le patrimoine.

L'étude d'un monument historique nécessite le recours à un travail interdisciplinaire et transdisciplinaire avancé, pour l'identification et la conservation du patrimoine architectural. Il est toutefois à noter, que les informations écrites et graphiques nécessaires pour une réelle connaissance des édifices objet d'étude ne sont pas toujours disponibles. Dans ce chapitre, une approche historique a été adoptée pour examiner les monuments historiques à travers les écrits, cartes postales, tableaux de peinture, afin de comprendre l'évolution des anciennes mosquées ottomanes en Algérie et contester leur authentification.

3.2. DELIMITATION DU TERRITOIRE DE LA REGENCE TURQUE EN ALGERIE ENTRE 1555 ET 1830.

Avant de procéder à l'inventaire des mosquées ottomanes encore existantes en Algérie à nos jours, ou même disparues, une délimitation du territoire de la régence turque est plus qu'impérative.

Sans trop s'attarder sur les conditions de l'occupation des terres algériennes par les ottomans, et sans aucune précision sur la nature de cette occupation, l'objectif est de connaître les régions concernées par la construction de mosquées durant la domination ottomane.

En fait, en plus de la capitale Alger ; l'Algérie fut divisée en trois départements appelés en turque *Beylek*. A savoir le *Beylek Titteri* ; représenté par le centre de l'Algérie, essentiellement la région de Médéa. *Beylek al-Ghareb*, ou l'ouest, avec sa capitale Oran, et *Beylek le levant* ou l'Est, et sa capitale Constantine (figure 3.3).



Figure. 3.3. Les limites entre les trois départements (Beylek) pendant la régence turque. (Source ; HAFSI Fatma Zohra, 2012)

Chaque Beylek est géré par un Bey. Les autres villes, appartenant à ces trois départements ont été appelées *Outanes* (territoires), ces derniers à leurs tours, regroupent des *ferqas* (fractions) ou des tribus, *organisés en khalifaliks ou en aghaliks*. Les *commandements étaient confiés soit à des khalifas, aghas, caïds nommés par le bey de la province soit par les cheikhs ou les chefs des tribus* (Bouchareb, A, 2006). Cette organisation, reflète les rapports entretenus entre les ottomans et les populations locales. Cette gestion ne laisse pas penser à des réalisations somptueuses par les ottomans dans les différentes régions de l'Algérie (Bouchareb, A, 2006). Sans oublier que les ottomans adoptaient le rite hanafite, tandis que, les autochtones adoptaient le rite malékite ; ce qui implique aussi une ségrégation dans les lieux de prière.

La lecture des cartes aide à mieux cerner les villes concernées par la présence d'une communauté ottomane. La carte ci-après, montre le territoire de la régence turque avant la colonisation française.

Les ottomans choisirent Alger comme Capitale de la régence, vu sa situation stratégique. A leur arrivée, la ville ne comptait pas plus de 20.000 habitants. Le nombre d'habitants est passé, vers la fin du 17^{ème} siècle, à cinq fois plus, c'est-à-dire à 100.000 habitants (Raymond, A, 1979). La capitale de la régence turque en Algérie, fut une ville nouvelle, très développée (Raymond, A, 1979).

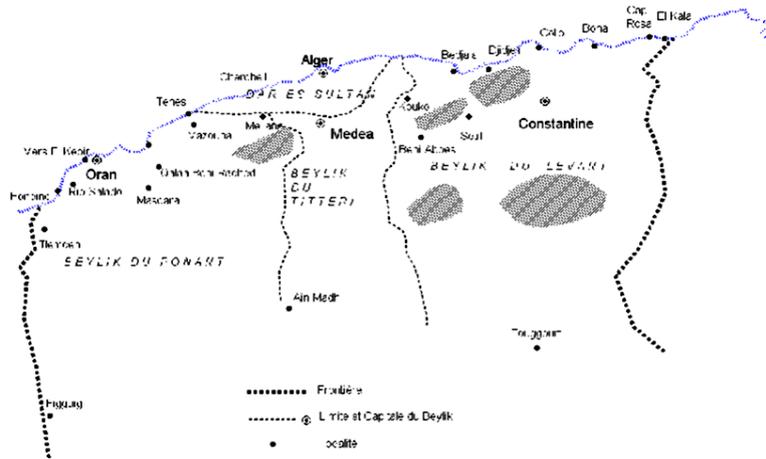


Figure 3.4. Territoires (villes) sous la dominance Ottoman avant l’invasion française. (source : Bouchareb, 2006, page 101)

Le Beylek Est, qui avait comme capitale Constantine, qu’elle faisait partie du territoire des Hafsides, avant l’arrivée des ottomans. Ensuite, elle a été annexée par le gouverneur ottoman à Alger (Raymond, A, 1979).

Les limites du Beylek du levant, d’après *E. Vaysettes*, s’étendaient de la Méditerranée au Nord, jusqu’au Touggourt au Sud, et des frontières tunisiennes à l’Est, jusqu’aux limites du Beylek du Titterie (Sidi Hadjres et Sidi Aissa) (Bouchareb, A, 2006). Toutes les régions de Bejaïa, Jijel Skikda jusqu’à El Kala, et le Sud (Zibans, Touggourt, ... etc), ainsi que toutes les hautes plaines (Tébessa, Mila, Zemoura et M’sila) et les Aurès, représentées le Beylek levant (voir figure 3.5) (Bouchareb, A, 2006).

Cette organisation était purement administrative, en conséquence, il était fort possible de ne pas trouver d’ottomans à l’intérieur de ces territoires, comme fut le cas de Souk-Ahras, qui avait connu plusieurs soulèvements contre le Bey (Hafsi, F.Z, 2017).

Quant au Beylek de l’Ouest (Penant), il est resté sous la dominance espagnole ou sous le protectorat espagnole, dont Tlemcen, Cherchel, ...etc, jusqu’à 1791, contrairement au Beylek Titterie ou Beylek l’Est. C’est à partir de 1791 que le Beylek penant fut annexé par le Bey Mohamed El-Kebir ; devenu le gouverneur de la région Ouest (Arrar, M, 2014).

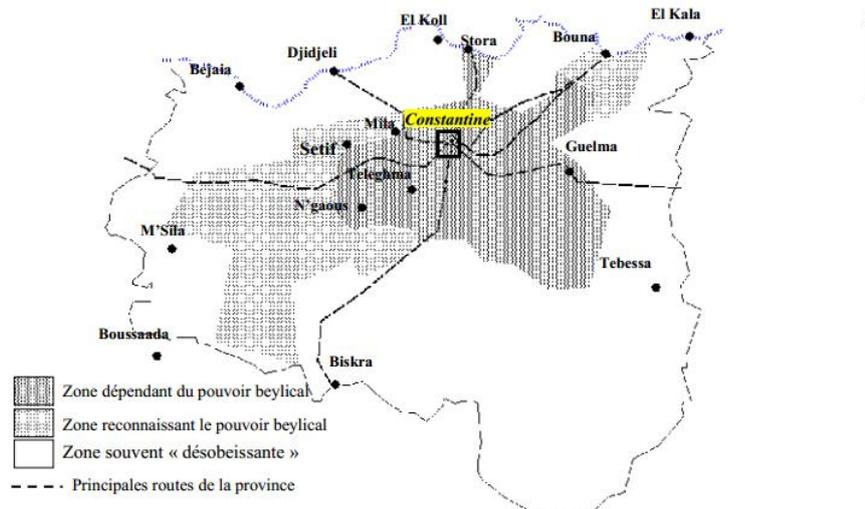


Figure 3.5. Territoire du Beylek Est pendant la présence Ottomane en Algérie. (source : Bouchareb, 2006)

En fait, la domination ottomane sur l'Ouest algérien s'est faite de manière progressive. La ville de Mazoune fut la première capitale de Beylik El-Gharb (Beylik l'Ouest) jusqu'à 1701 (Arrar, M, 2014). A partir de cette date, le transfert de la Capitale vers Mascara a été établi, suite à la décision du Bey Mostafa Bouchelagham (Arrar, M, 2014). Plus-tard la Capitale va être transférée encore une fois vers Oran, après la conquête turque, après un fort séisme en 1791 qui a frappé la ville, obligeant ainsi les espagnols de partir. Par conséquent, la ville a été reconstruite à partir de 1792, sous le règne du Bey Mohamed El-Kebir.

Le Beylek el-Gharbi comptait toutes les villes de l'ouest algérien ; à savoir Tlemcen, Oran, Mazoune, Cherchel, Mostaganem, Chlef, Saïda et Mascara.

Après avoir délimité le territoire occupé par les ottomans en Algérie, il est possible d'inventorier les mosquées construites dans ces villes entre le 16^{ème} et le début du 19^{ème} siècle. Rappelant que la population locale avait continué de construire les mosquées selon le style local (maghrébin). Les rares mosquées construites en style ottoman se trouvent dans les grandes villes, où étaient installés les notables des ottomans et les Beys.

3.3. GENESE DE L'ARCHITECTURE OTTOMANE EN ALGERIE.

La naissance de l'architecture islamique, et plus particulièrement des mosquées, remonte au 8^{ème} siècle, sous le règne des omeyyades. L'édifice témoin de la toute première réalisation est la grande mosquée Omeiyade de Damas. En fait, les musulmans, à cette

époque, n'avaient aucun complexe envers l'usage de style étranger. La mosquée de Damas est d'une d'influence byzantine sur le plan architectural ; cependant elle maintient la même organisation spatiale de la mosquée du prophète à Médine. L'art islamique a obtenu son originalité ; à travers la fusion du savoir faire local avec les richesses, tant artistiques que techniques, de chaque région nouvellement conquise. Il véhicula, à travers le temps, une souplesse et une ouverture envers les différentes cultures.

C'était la formule qu'a fait générer plusieurs styles, à travers le monde islamique de l'époque. Certains figurent parmi les grandes puissances politiques de l'époque, reflétant une stabilité sur plusieurs siècles, d'autres, figurent entre les lignes dans les ouvrages de l'histoire de l'art islamique, probablement, à cause de la courte durée dictée par l'instabilité politique.

Pour le cas de l'Algérie, l'histoire de l'architecture des mosquées est richement investie, à travers les travaux des historiens (Marçais, Louis Golvin, Rachid Bourouiba, Ernest Mercier). La lecture des différents travaux était déterminante pour identifier et définir le cadre historique, le territoire géographique des ottomans en Algérie, ainsi que l'évolution de chacun des édifices en matière de transformations.

Avant de procéder à la présentation des édifices constituant le corpus, nous jugeons important d'exposer les legs de l'art Maghrébin avant l'arrivée des ottomans. Deux grandes mosquées ; la grande mosquée de Tlemcen et la mosquée d'Alger, témoignent à nos jours, de la beauté de cet art.

D'après Golvin, la population locale, de rite malékite, est restée fidèle aux traditions architecturales locales, approuvant la continuité de l'architecture mauresque. Le style architectural adopté reflète beau et bien le rite de la population locale (rite malékite) (Golvin, L, 1985) ; reflétant ainsi le mode de production de mosquées locales en Algérie.

Tandis que les édifices de style ottomans, exprimant le rite hanafite, furent réservées aux turques. Il faut attendre la fin du 18^{ème} siècle ; sous le règne de Hassan Pacha, pour sentir une volonté d'imprégner les villes algériens, notamment Alger, d'une touche ottomane. Une volonté qui se manifeste dans les travaux de restauration, de modifications et/ou reconstruction d'anciennes mosquées, selon un style ottoman accentué (l'exemple des mosquées : Safir, Essayida, ...etc).

Donc, il est possible de distinguer deux catégories ; la première catégorie, concerne les réalisations des autochtones ; étant majoritaire, ils continuent de réaliser suivant leur savoir faire. Le résultat ; des mosquées de type maghrébin (figure 3.7) ; avec une salle hypostyle, couverte par une toiture en double versant de tuiles. Cependant, la deuxième catégorie, présente un autre style de mosquées ; souvent réalisées par une décision du gouverneur, ou l'un des hauts fonctionnaires de l'état, ou bien encore des riches notables. Pour cette catégorie, une volonté d'exprimer le pouvoir ; en choisissant de manière méticuleuse les artisans, les matériaux.

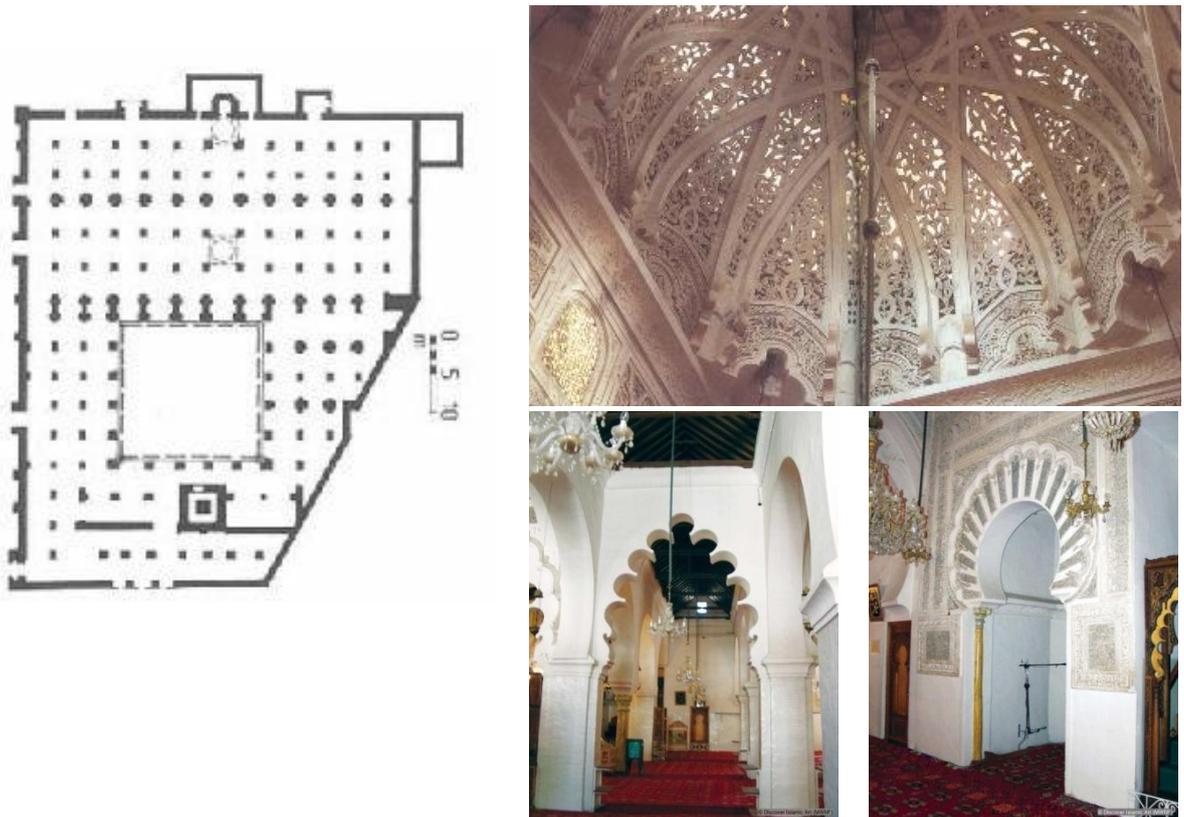


Figure 3.6. La grande mosquée de Tlemcen. Plan (Source : Bourouiba, 1986), Photos (Source : Auteur).

3.4. STYLE ARCHITECTURAL DES MOSQUEES OTTOMANES D'ALGERIE.

Comme il a été présenté dans le précédent chapitre (chapitre II) ; les œuvres architecturales de Sinan témoignent d'un don remarquable, dévoué d'une volonté de réaliser la mosquée la plus somptueuse de toute l'histoire de la civilisation islamique ; pour devancer la Sainte Sophie. Golvin considère que Sinan a pu magnifier l'art religieux à travers la Grande Mosquée d'Edirne ; celle de Sultan Selim (Golvin, L, 1985).

À travers ce chef d'œuvre, son principale intention consiste en la création d'un grand espace cubique, couvert par une grande coupole centrale ; en référence aux anciennes traditions ottomanes (Burkhardt, T, 1985). Outre, les intentions de Sinan remontent à plusieurs années avant la réalisation de la mosquée Selimiye (1568-1574), plus précisément, avec la réalisation des deux mosquées Shezadeh (1548) et Mihrima (1555) ; il semble, qu'il lui a fallu plusieurs expériences pour pouvoir atteindre son objectif.

Une lecture des principales caractéristiques de l'architecture ottomane à travers son évolution, va permettre une incarnation des principaux traits stylistiques apparus avec la régence ottomane en Algérie.

L'ouvrage de **Haëdo** de 1612, intitulé « *Topographie de la ville d'Alger* », apporte une description détaillée des différentes mosquées d'Alger. Dans cet ouvrage, l'auteur offre des informations précises sur les constructeurs de mosquées ; dont il cite trois catégories ; les Maures, les Turcs et les renégats (HAËDO, 1612). En fait, il se basait sur les origines des ordonnateurs de la construction de mosquées ; en mettant l'accent de manière implicite sur l'appartenance au rite, car les Maures étaient de rite malékite, tandis que les turcs et les renégats étaient de rite hanafite. Comme il apporte avec précision, les rentes attribuées à chaque édifice. Selon lui, les mosquées ottomanes d'Alger étaient « *très élégamment fabriquées en briques et en plâtre* » (Haëdo, 1612).

Or, plusieurs Historiens critiquent les œuvres architecturales des ottomans. Selon Devoulx, les mosquées d'Alger étaient plutôt sobres, en comparaison avec les belles mosquées de Tlemcen. Il les considère comme des œuvres de maçons ; dépourvues de touche artistique (Devoulx, A, 1870). Selon le même auteur, Tlemcen, étant la capitale de l'ancien royaume des Zianides, est loin d'être comparée à Alger ; qui fut une bourgade à l'époque des Zianides, et qui n'a gagné d'importance que sous la présence des ottomans

(Devoulx, A, 1870), ses mosquées se trouvaient dans des ruelles étroites, projetées sur des parcelles exigües (Devoulx, A, 1870).

Georges Marçais critique aussi les mosquées ottomanes d'Algérie, en raison de l'emploi de matériaux ramenés de différentes régions du monde ; reflétant ainsi une caricature de style européen. En l'occurrence, les marbres taillés sont importés d'Italie, les faïences ramenées de Marseille, *les vitres de Venise, les verreries de Bohème, les pendules d'Angleterre*. Il en résulte plus l'influence européenne qu'ottomane, partout dans « l'Algérie turque » (Golvin, L, 1985).

Golvin dans son étude consacrée aux mosquées ottomanes en Algérie et en Tunisie, indique que la contribution des ottomans fut restreinte à quelques édifices, ne reflétant pas les trois siècles de présence ottomane dans la région, et ce, en référence à la prédominance du style maghrébin, pendant la régence turque (figure 3.6).

Dans une étude récente dédiée aux mosquées ottomanes Algéroises, Driouèche confirme que la mosquée ottomane d'Alger est une variante du modèle adopté par les architectes ottomans ; une variante plus modeste que celles de la Turquie (Driouèche, 2001).

Les principales différences concernent en particulier le système de couverture de la mosquée. Ce système est composé d'éléments invariants, à savoir, la grande coupole centrale, et les coupolettes (Driouèche, 2001). Les éléments variant, ou bien, les différences, concernent l'utilisation des coupolettes ; elles sont posées directement sur le plancher. Il est constaté aussi l'absence de galerie narthex, ainsi que les murs tympan (Driouèche, 2001).

D'après Driouèche, considère que le modèle de mosquées ottomanes fut transporté en Algérie, à l'instar des toutes les villes arabes de l'empire. L'une des principales mosquées construite selon ce modèle est la mosquée Ali-Bitchine « *Identifiée comme étant le premier modèle de mosquée ottomane apparu dans le paysage de la ville du XIX^{ème} siècle* » (Driouèche, 2001). Ce modèle ottoman n'a pas été projeté de manière intégrale, il a été adopté au contexte local, selon le savoir-faire en matière des pratiques constructives dans cette ville (Driouèche, 2001).

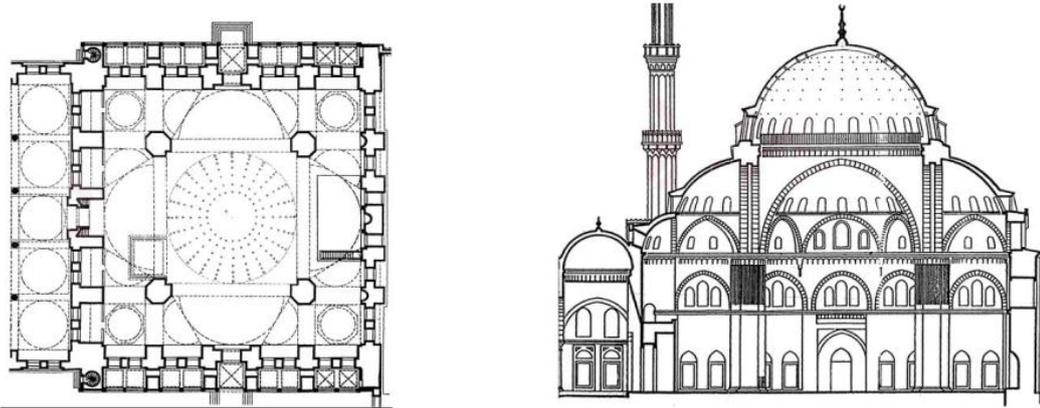


Figure 3.7. Mosquée Chahzade, Istanbul, Turquie. : à gauche : le plan, à droite : la coupe.
(Source : Atay, 2020)



Figure 3.8. Mosquée de Pacha, Oran, Algérie. (Source : Ravoisié, A, 1846)

Malgré les critiques des mosquées ottomanes réalisées en Algérie entre la fin du 16^{ème} et le début du 19^{ème} siècle ; il se trouve que la mosquée Djedid présente un style différent. Son architecture éveille beaucoup de questionnements ; en rapport avec sa volumétrie et son organisation spatiale.

La mosquée est régie à des principes très bien respectés. Deux hypothèses sont à retenir. Les deux s'accordent sur l'origine de l'architecte ; qui est chrétien. Mais les hypothèses, concernent les causes derrière ce choix.

En effet, Devoux, en se basant, sur les propos de personnes exerçant le pouvoir à l'époque des ottomans, lança une première réflexion, en rapport avec confession chrétienne, de l'architecte, qui est d'origine italienne. Selon Devoux, l'architecte avait exploité son imagination et son savoir faire, en se référant à ses traditions (Devoux, A, 1870).

Outre, Driouèche revient à la période dans laquelle la mosquée fut édifiée. C'était la période du règne des Aghas. Les janissaires voulaient exprimer leurs suprématies à

travers une architecture différentes (Devoulx, A, 1870), étant donné que le financement des travaux de réalisation provient d'une association (institution affiliée à l'état) appelée « *Subul al khayrat* ». l'hypothèse se base sur l'origine chrétienne de l'architecte, d'où le recours à une forme de plan et de toiture sous forme de croix, qui résulte du croisement de deux nefs (Devoulx, 1870 ; Golvin, 1985 ; Driouèche, 2001).

Rappelant que la mosquée la Pêcherie représente l'une des premières réalisations d'un style extrinsèque au Maghreb, si ce n'était pas la toute première. Les ottomans ont été peut être en quête d'établir un style reflétant leur domination, d'où le recours aux artisans et maçons chrétiens et non pas musulmans.

Enfin, il semble que Koumas et Nafa (Koumas; A, 2003) avaient remarqué que l'intérieur de la mosquée reflète plutôt une inspiration ottomane vu la forte ressemblance de la mosquée la pêcherie avec les mosquées de Brousse ; notamment *Ulu Cami* de Brousse, construite en 1400 J-C (figure 3.10). À partir des images (figure 3.9), il s'avère que l'intérieur de cette mosquée est très similaire à l'intérieur de la mosquée de la Pêcherie, cependant l'extérieur est différent.



Figure 3.9. L'intérieur de la mosquée *Ulu cami* à Brousse (Turquie). (Source : Portail culturel Turquie, 2013)

Avec les ottomans, un nouveau modèle d'organisation spatiale fait son apparition en Algérie, en plus du type arabe préexistant (salle hypostyle). Après l'analyse des différents plans de mosquées de style ottoman réalisées en Algérie entre le 16^{ème} et 19^{ème} siècle, il est possible de distinguer les typologies suivantes :

- Plan à coupole centrale, de forme octogonale, surmontant un volume cubique, doté de galeries latérales, couvertes par de coupolettes. Suivant ce type, il y a la mosquée

Ali-Bitchnine, la mosquée ketchaoua (état original), la mosquée Essayida et la mosquée du Dey à la Citadelle (Driouèche, 2001).

- La deuxième, se caractérise par l'absence des galeries latérales. Il s'agit d'une salle carrée, avec une coupole centrale, reposant sur des trompes. Driouèche donne l'exemple de la mosquée Djami al-Safir (Driouèche, 2001).

- enfin, la troisième typologie de plan, se rapproche plus des plans des églises. Il s'agit de plan cruciforme, de type paléochrétien. Au croisement se trouve une grande coupole. Elle est de forme ovoïde, le seul exemple en est la mosquée de la Pêcherie, connue sous le nom de Djami Djedid (Driouèche, 2001).

Une autre caractéristique d'origine mauresque ; c'est les nervures entrecroisées. Cette technique trouve son origine dans la mosquée de Cordoue. Cependant, dans les mosquées ottomanes en Algérie, les nervures apparaissent à l'extrados des coupoles des mosquées ottomanes (Driouèche, 2001).

Une autre forme d'inspiration andalouse, toujours en rapport avec la coupole, réside dans la manière avec laquelle se raccorde le plan carré avec le tambour octogonal. Deux solutions ont été enregistrées. La première formule est sous forme d'arcs brisés insérés aux angles, créant des surfaces triangulaires pouvant recevoir un remplissage par des surfaces curvilignes ; c'est le cas de la mosquée du Dey à la citadelle d'Alger, ou par des coupolettes venant combler le vide, assurant un rôle purement ornemental (Driouèche, 2001)

3.5. CRITERES DE SELECTION DU CORPUS D'ETUDE.

Nous rappelons que la présente recherche vise à évaluer l'acoustique des mosquées ottomanes en Algérie. L'Algérie est devenue un territoire sous protectorat Ottomane à partir de la deuxième moitié du 16^{ème} siècle et fut colonisée par les français en 1830. A partir de cette date de nombreuses opérations de destruction et/ou grandes transformations ont touché d'importants ouvrages ; notamment les mosquées et les Médersas.

Dans ce chapitre nous présenterons les critères de sélection des édifices choisis pour notre étude ainsi que les informations architecturales les concernant (dimensions, volumes, matériaux de constructions, historiques).

Selon la charte de Venise, et en référence à Abdou (2003a), El-Khateeb (2021), les critères qui doivent être pris en considération sont : l'**authenticité** de l'édifice, le **style** architectural ; reflétant la période étudiée, ainsi que la **vocation** de la mosquée (mosquée de vendredi) (Abdou, 2003). Un quatrième critère est pris en compte par Elkhateeb ; la **continuité du fonctionnement** de l'édifice.

Il est évident que l'authenticité du bâtiment nécessite l'examen de documents historiques, qui relatent les différentes opérations de restaurations, rénovation, addition, démolition,... etc. Comme il est conventionnel, que les édifices datant de plus d'un siècle, devaient subir une superposition de strates dues aux changements opérés sur l'édifice. Comme il faut prendre en considération la détérioration des matériaux due au vieillissement des matériaux à cause de différentes conditions environnementales (climat, séisme, ...etc). Il reste toutefois fondamental de retracer toutes ces potentielles modifications avant de décider des techniques de recherches à mettre en œuvre.

Le deuxième critère concerne le style architectural. En se basant sur la notion de style (domaine des historiens) ; il s'avère que la Suleymaniye reflète les principales caractéristiques architecturales ottomanes. Tandis que, Sinan considère, la mosquée de Sultan Selim d'Edirne, comme l'apogée de sa réflexion, en fait, il la considère comme son chef d'œuvre (Golvin, 1985 ; Driouèche, kh, 2001 ; Saoud, 2004).

Le troisième critère est la vocation de la mosquée qui est en rapport avec la taille et la nature des activités se déroulant à l'intérieur de la mosquée, et dont l'aspect sonore est très significatif.

Nous rappelons que, cette période abritait trois types de mosquées :

- **Oratoire de prière (Mussallah= مصلى) ;**

Il s'agit d'oratoire de prières journalières, dans lequel se déroulent les cinq prières du jour. Généralement il est de petite taille, à proximité des habitants. Il existe plusieurs oratoires dans le même quartier, pour assurer un accès rapide à tous les habitants désirants accomplir la prière en groupe (جماعة), sans pour autant, se déplacer vers des mosquées lointaines. L'architecture de l'oratoire se caractérisait par sa simplicité, l'édifice était très sobre, et possédait un mihrab et sans Minbar.

- **Mosquée de vendredi (mosquée à *Khotba*) ;**

Il s'agit de mosquées de tailles variables (petite, moyenne ou grande). Elles sont dotées, essentiellement, de Minbar pour accomplir la prière du vendredi, comme elles assurent les cinq prières par jour. Souvent chaque quartier est doté d'une seule mosquée à *Khotba*, en revanche, il est possible de trouver plusieurs dans les quartiers importants et aux centres villes.

- **Mussallah Aïd ;**

Il s'agit d'espace vaste pour les deux prières de l'Aïd (deux fois par an). Généralement ce sont des espaces, ouverts et découverts, situés à l'extérieur de la ville pour pouvoir rassembler tous les habitants de la ville le jour de l'Aïd.

Pour cette étude, il ne sera pris en compte que les mosquées dans lesquels se déroulent les prières de vendredi.

3.6. CORPUS D'ETUDE.

Le but de cette partie est de présenter les principales mosquées réalisées par les Ottomans en Algérie ; en mettant l'accent sur leur authenticité et leur style architectural. L'exposé concerne uniquement les mosquées de vendredi ; mosquées à *Khotba*, construites selon un style ottoman. Les petites mosquées de quartiers (petits oratoires), ainsi que les Zaouïas ; ne seront pas présentées dans ce chapitre.

Il faut rappeler qu'un grand nombre d'édifices ont été détruits et/ou transformés complètement à partir de 1830, notamment à Alger, Constantine, Oran ou Annaba (Devoulx, 1870 ; Papier, 1890 ; Mercier, 1903 ; Driouèche, 2001 ; Redjem, 2014). Aubert renvoyait cela essentiellement à l'affectation de ces édifices religieux à d'autres fonctions, vu la spatialité qu'ils offrent ; à l'exemple de Constantine, dont la mosquée *Sidi Chadli* fut transformée en Fourrière publique, la mosquée *Sidi Affar* fut convertie en crèche, la mosquée *Sidi Makhlouf* a été démolie en 1856, pour établir un musée et une bibliothèque et une école ; même la mosquée *Sidi Derrar* fut démolie (Lallemand, C, 1891). La mosquée *Sidi Tlemçani* a été affectée au bon pasteur le 12/02/1857, puis aménagée en fourneaux économiques à l'usage des classes pauvres, puis en crèche (Lallemand, C, 1891). Il faut néanmoins rappeler que la documentation disponible a été établie par des historiens, écrivains et architectes français.

Certains auteurs donnent le nombre total de mosquées par ville, au moment du débarquement de l'armée française en Algérie ; sans pour autant préciser le style architectural de ces mosquées (Ottoman ou local). D'autres, tels que **Devoulx. A** (1871), Alexandre Papier (1890) ou encore Mercier Ernest (1903), apportaient des informations détaillées à propos des principales mosquées.

D'après **Devoulx. A** (1871), Alger comptait 13 grandes mosquées, 109 mosquées, 33 quobba et 13 zaouias. A Constantine, l'auteur de l'ouvrage « La Medina de Constantine » ; **B, Pagand**, comptait 107 édifices religieux (59 mosquées, 35 zaouias, 4 medersas et 9 marabouts) avant la conquête de la ville par les français (Belabed, S.B, 2007). Le nombre s'est réduit en nombre de quarantaine, d'après le recensement effectué par Aubert en 1852 (Belabed, S.B, 2007). Cependant, en se référant à Nouschi A (1983) ; il existait un nombre de 35 mosquées et 07 medersas (Bouchareb, A, 2006). Bône comptait 37 mosquées à la fin du 18^{ème} siècle (Mercier, E, 1903).

Selon l'ouvrage « Histoire de Constantine » de Ernest Mercier ; il existait quatre mosquées à khotba à Constantine ; à savoir : *Djama-Souk-El-Rezel* (reconvertie en Cathédrale pendant la colonisation française), *El-Djama-El-Kebir*, *Djama-Sidi-El-Kettani* et *Djama-Sidi-Lakhdar* (Siences, A.F, 1888). Plus loin à l'ouest algérien, spécifiquement à Tlemcen, la ville comptait soixante et une mosquée (61 mosquée) en 1846, réduit à une vingtaines (entre 26-28 mosquées) selon les notices de l'Association Française pour l'avancement des sciences (1888), intitulées : « **Oran et l'Algérie** ». La spécificité des mosquées de Tlemcen réside dans la continuité de construire selon le style mauresque, même durant la domination ottomane. Quant à Mascara, il existait plusieurs mosquées telles que la mosquée au Douar d'El Guethna, la mosquée d'Ain Beida, la mosquée *Djemaâ El-Kebir*. Seules les deux dernières présentaient une architecture digne, en revanche les autres ne sont que des bâtisses sobres (M'hiris, M, 2009).

Les mosquées ottomanes en Algérie se caractérisent par une particularité, qui mérite l'attention des chercheurs. En fait, chacune des mosquées possédaient des biens fonciers (*hobousse*), essentiellement des magasins à location. Grace à la location de ces magasins, les mosquées obtiennent des rentes nécessaires pour le paiement du personnels en charge de l'édifice (*Imam, Kaïm, Moadhine, ...etc*) ainsi pour couvrir les charges des différentes opérations d'entretien, d'embellissement, d'agrandissement, ...etc. **Devoulx. A** (1871) précisent les propriétés foncières de chaque mosquée (grande ou petite) à Alger, dans son ouvrage «**LES EDIFICES RELIGIEUX DE L'ANCIEN ALGER** ».

Cependant, les mosquées à faible revenu, ou encore sans revenu, seront abandonnées avec le temps ; voir même disparues, comme il fut le cas des mosquées de Bône (Mercier, E, 1903) de Constantine (Belabed, S.B, 2007). Alexandre Papier (1890) décrivait le statut insalubres des mosquées de Bône à l'époque ottomane. A l'encontre de Bonne, son chef lieu ; Constantine, quant à elle, a connu de grands travaux de construction de nouveaux édifices et/ou de restructuration d'anciens bâtiments de la ville, durant les dernières décennies de la présence ottomane, dans le but est de rendre cette ville digne du Chef-lieu d'une province importante (Siences, A.F, 1888). *Salah Bey* (le dernier Bey de la ville) s'est montré déterminé pour continuer les travaux entrepris par ses prédécesseurs (Siences, A.F, 1888).

Il n'est pas évident de présenter toutes les mosquées ottomanes réalisées en Algérie, en revanche, le tableau suivant énumérera toutes les mosquées selon un ordre chronologique. Une mention sera faite sur l'état de transformation des édifices (transformations légères, transformations importantes, reconstruction partielle, reconstruction entière, démolition). Par la suite, les mosquées ayant préservées le plus leurs authenticités seront présentées en détails, dans le prochain chapitre.

Tableau 3.1. Récapitulation des mosquées Ottomanes de Vendredi (à Khotba)

Mosquées	Dates	Ville	Style / Transformations	Statut
Garni' Safir	1534	Alger	- Style ottoman.	Authentique
Essayida	1564	Alger	- Style ottoman - Reconstituée entre 1765-1791, par Mohamed Pacha	Démolie en 1837
Kechach	1579	Alger	De style local. Elle fut reconstituée en grande partie	Démolie.
Ketchaoua	1612	Alger	- Style ottoman. - Reconstituée par Mohamed Pacha entre 1794-1795 . - Transformations par les français en 1845, 1857, 1890 - Restaurée en 2016 par le gouvernement Turque.	Reconstruction entière pendant la colonisation française.
Mosquée El Sidi Mohamed ibn Charef	1619-1620	Mazouna (Relizen)	- Style ottoman. - Aucune transformation.	Authentique
Ali-Bitchine	1620	Alger	- Style ottoman - Restaurée en 2000	Authentique

Mosquée de l'extérieur de la Qasbah	1653-1654	Alger	- Style local - Reconstituée en 1818.	Authentique
Pêcherie (Djedid)	1660	Alger	- Style ottoman - Restaurée en 1855, puis en 1999	Authentique
Mosquée Satti Maryam	1660-1681	Alger	/	Démolie pendant la colonisation française
La mosquée Chaâbane khoudja (Bab Djazira)	1693-1694	Alger	- Agrandie en 1795-1796	Démolie pendant la colonisation française
La mosquée al-barania (Bni-Ameur)	1708	Oran	- Démolie par les espagnoles en 1732. - Reconstituée en 1801 par Bey Othman. - De grandes transformations par les français en 1844. - Restaurée en 1980	/
Abdi Basha	1726	Alger	Style ottoman.	Démolie en 1925
Mosquée de Souk El Ghezal (Hassan Bey)	1730	Constantine	- Style local - Transformée en cathédrale en 1838, ensuite une série de transformations en 1845, 1852, 1859.	Transformations entières.
La grande mosquée de Mascara	1747	Mascara	- Deux élargissements en 1966, puis pendant les années 1980.	Transformations majeures.
La mosquée de Sidi Lakhdar	1753	Constantine	- Style local	Authentique (style maghrébin)
Mosquée Rahbat Essouf	1766-1773	Constantine	- Transformée en 1845	Transformation entière.
La mosquée de Sidi El-Kettani (Sala h Bey)	1776	Constantine	- Style local (Maghrébin)	Transformation entière
Mosquée El Moubaiia (Mohamed el-Kebir)	1781	Mascara	- Style ottoman. - Aucune transformation	Authentique
Salah Bey ou Djama Djedid	1792	Annaba	- Style ottoman. - Embellissement et extension 1855.	Authentique

Mosquée de Pacha	1792	Oran	- Style ottoman. - Actuellement en restauration.	Authentique.
La mosquée Imam Houari	1793	Oran	- Style local (Maghrébin). - En restauration depuis 2009	Authentique (local)
Mosquée de Dey : la Citadel	1818-1819	Alger	- Style ottoman - Restaurée en 2001. - Actuellement en restauration.	Authentique

Parmi ces mosquées de vendredi réalisées pendant la régence ottomane en Algérie (1551-1830), seules 17 édifices ont survécu ; dont seulement 09 ont été réalisées selon le style architectural ottoman ; l'un d'eux a été complètement transformé (la mosquée Ketchaoua). Il nous reste huit mosquées à *Khotba*, qui feront l'objet d'étude descriptive dans le présent travail de thèse (Chapitre IV) ; à savoir : la mosquée du Bey à Annaba, la mosquée Sidi Mohamed Ben Charef à Mazouna (Relizane), la mosquée Safir (*Çafar*) à Alger, la mosquée Ali-Bitchine à Alger, la mosquée du Dey à Alger, la mosquée la Pêcherie (*Djedid*) à Alger, la mosquée al-Moubaïa à Mascara, la Mosquée de l'extérieur de la Qasbah (*Barani*) et enfin la mosquée de Pacha (*Bacha*) à Oran.

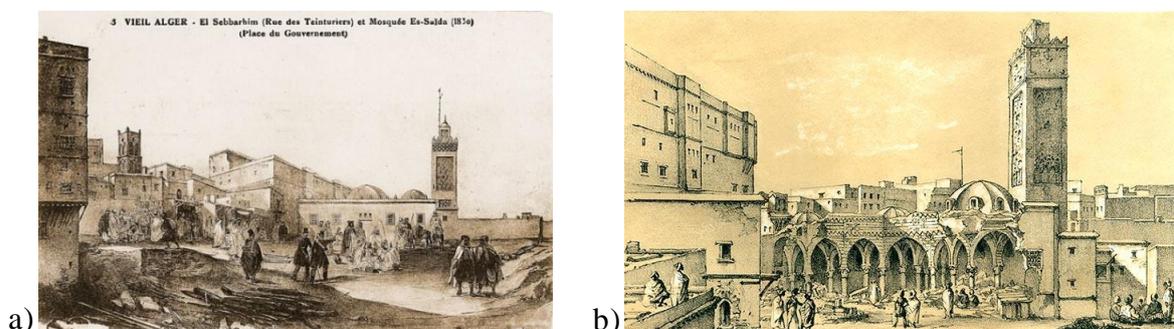


Figure 3.10. La mosquée *Essyida* : a) Avant la démolition, b) Après la démolition. (Source : Ravoisié A, 1846-1850)

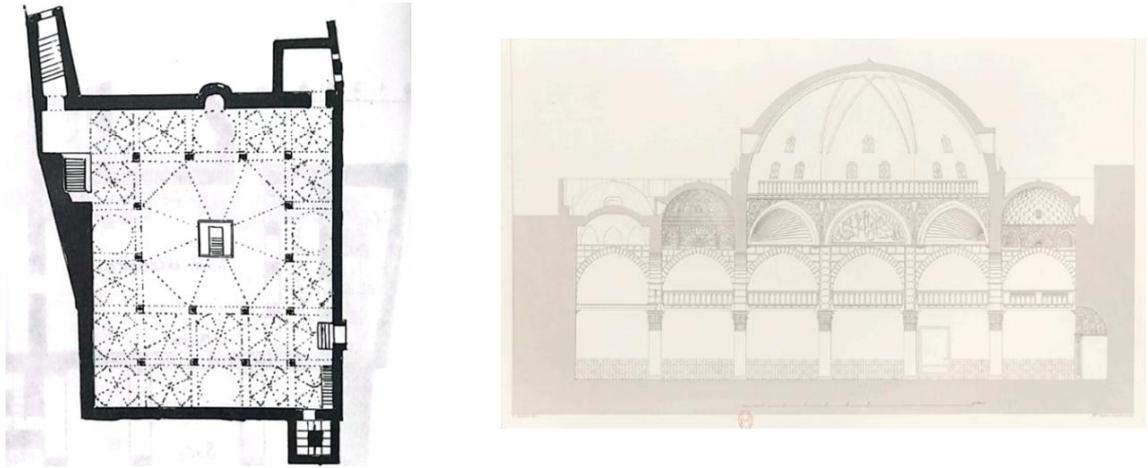


Figure 3.11. La mosquée Ketchaoua à son état initial. (Source : le plan ; Bourouiba, R, 1986, et l coupe : Ravoisié A, 1846-1850)

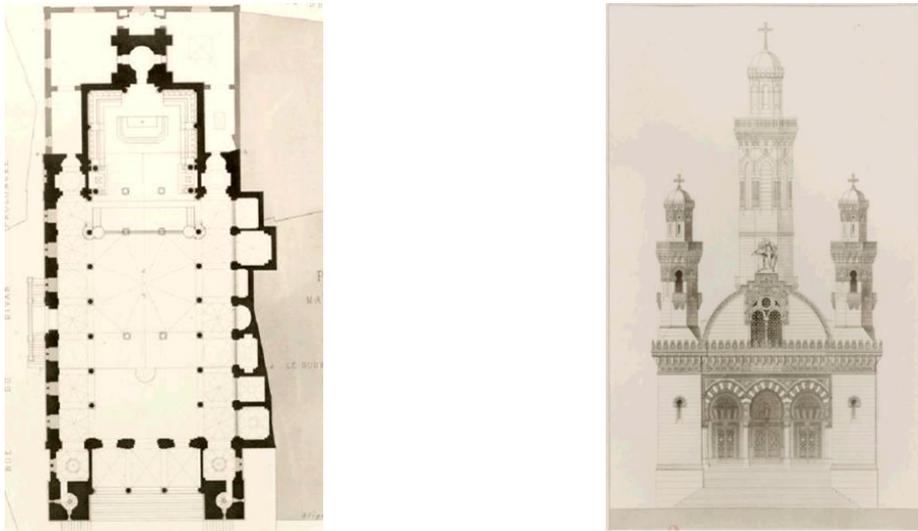


Figure 3.12. La mosquée Ketchaoua après les transformations opérées pendant la colonisation française. (Source : Ravoisié A, 1846-1850)

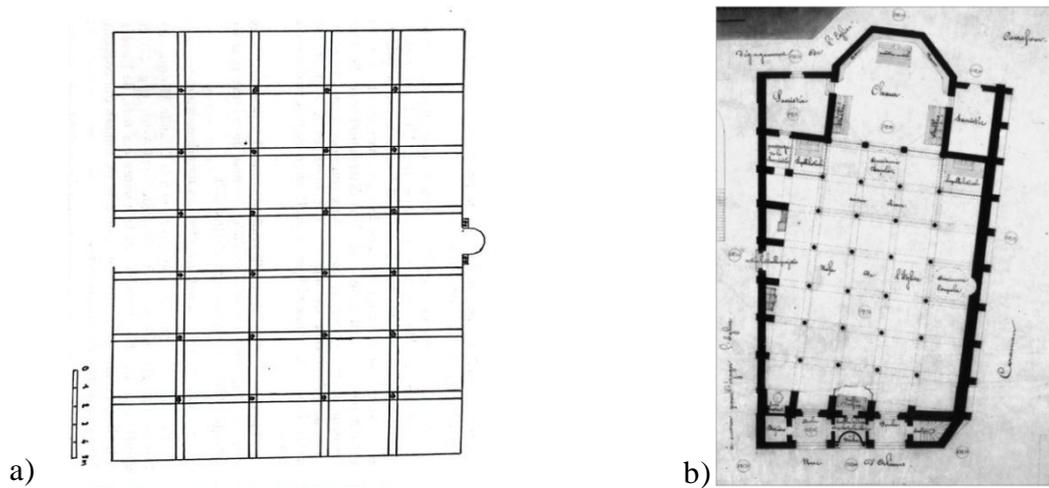


Figure 3.13. La mosquée Sûq al-Ghazal : a) Plan hypothétique de l'état initial (Bourouiba, R, 1986), b), le Plan après sa conversion en cathédrale par les français. (Source : Boudjada, Y, 2007)

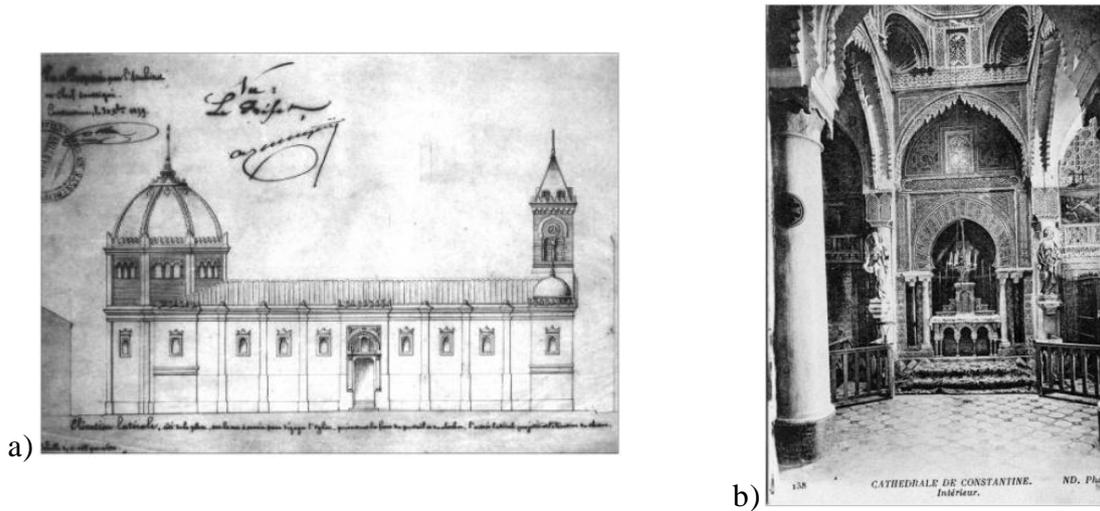


Figure 3.14. La mosquée Sûq al-Ghazal après sa conversion en Cathédrale par les français: a) Façade, d) vue d'intérieur. (Source : Boudjada, Y, 2019)

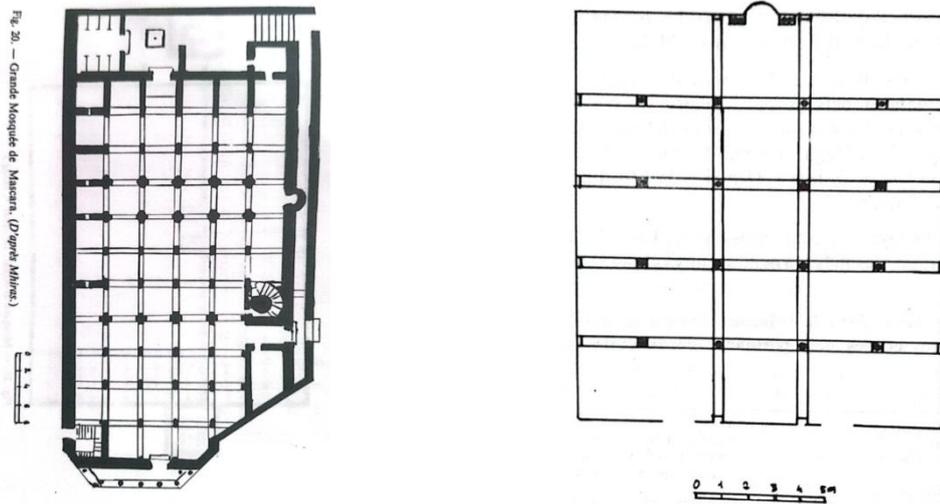


Figure 3.15. Plan de la grande mosquée de Mascara. (Source : Bourouiba, R, 1986)

Figure 3.16. Plan de la mosquée Sidi de Mascara. (Source : Bourouiba, R, 1986)

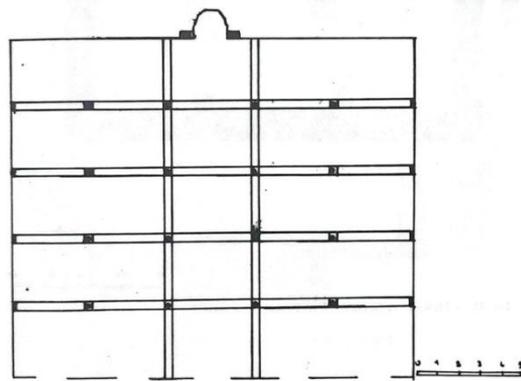
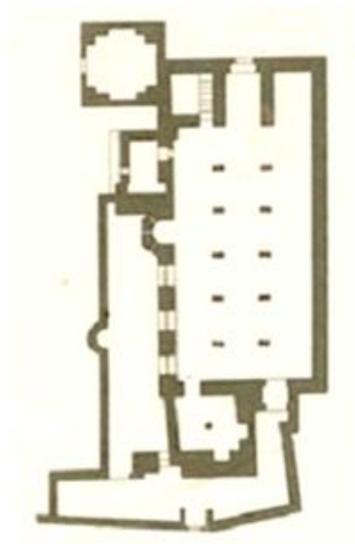
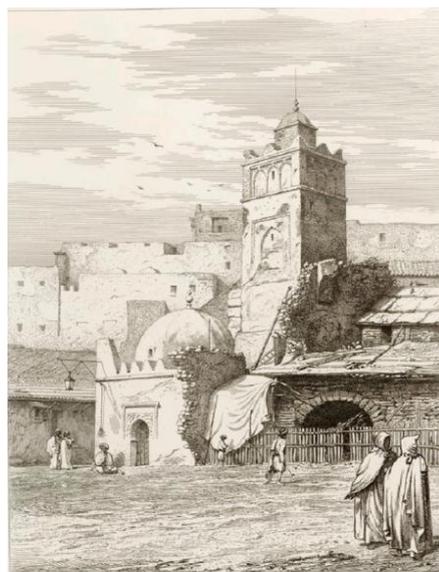


fig. 44. — Mosquée de Sayyidi 'l-Kattâni. Salle de prière.

Figure 3.17. Plan de la mosquée Sidi al-Kattani à Constantine. (Source : Bourouiba, R, 1986)



-Plan-



-Vue sur la mosquée-

Figure 3.18. Mosquée Sidi Houari à Oran. (Source : Ravoisié A, 1846-1850)

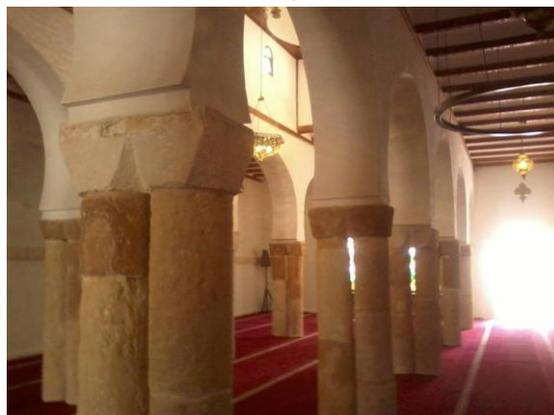


Figure 3.19. Intérieur de la Mosquée Sidi Houari à Oran. (Source : Auteur)

CONCLUSION.

Le concept patrimoine a connu une évolution avec le temps. Aujourd'hui, il est recommandé d'étudier les monuments historiques sous une approche hybride. Cette dernière consiste à examiner notre héritage architectural non seulement comme étant figé (aspect matériel) mais aussi immatériel. Il s'agit d'une réhabilitation de ses environnements physiques. Dans cette thèse il est question d'étudier les environnements sonores caractéristiques des mosquées ottomanes.

Quatre critères ont été définis pour sélectionner les mosquées ottomanes constituant le corpus d'étude ; à savoir : l'**authenticité**, le **style** ottoman, la **vocation** ; qu'il s'agit de mosquée à *khotba* (mosquée de vendredi). Et enfin, la **continuité du fonctionnement** de l'édifice.

L'authenticité des monuments doit faire l'objet de l'examen de différents documents écrits et/ou graphiques pour identifier les différentes modifications effectuées depuis l'achèvement des monuments.

Les mosquées ottomanes réalisées en Algérie sont plutôt conçues selon le type de la mosquée Selimiye d'Edirne.

Le troisième critère consiste en la vocation des mosquées. Le choix dans cette thèse est porté sur les mosquées à *khotba* (mosquée de Vendredi). Elles sont de deux ordres, les principales mosquées à *khotba* ; et d'autres mosquées secondaires.

Le quatrième critère va être investi après examen de l'authenticité des mosquées restantes, qui sont de style ottoman.

Il a été nécessaire de délimiter le territoire de la régence turque en Algérie, et ce afin de limiter l'espace géographique de cette enquête. En fait, l'Algérie fut divisée en trois régions principales dites : *beylik le levant* dont la capitale fut Constantine, *beylik titteri* ; avec sa capitale Médéa et enfin *beylik l'ouest* dont la capitale fut en premier temps Mazouna, puis Mascara et à partir du 1792 la capitale fut Oran.

L'Algérie étant une petite province dans le vaste Empire Ottoman, elle n'engorge pas des édifications somptueuses, s'élevant au rang de mosquées des sultans Ottoman ; telles que la Suleymaniye, ou la Selimiye, ...etc. Mais, plutôt elle a connu des mosquées de tailles moyennes et petites.

Il faut souligner que les mosquées réalisées au premier siècle de la présence des Ottomans étaient plutôt modestes, dont la plupart ont été les œuvres des dons des richissimes ottomans.

La première mosquée de taille importante fut la mosquée Djedid (1667) ; à la deuxième moitié du 17^{ème} siècle. Il fallait attendre le règne du Hussain Pacha (vers la fin du 18^{ème} siècle et le début du 19^{ème} siècle) pour que de grands chantiers de rénovation et d'embellissement des mosquées aient été entrepris.

Quant au style ; Driouèche confirme que la mosquée ottomane d'Alger est une variante du modèle adopté par les architectes ottomans ; une variante plus modeste que celles de la Turquie (Driouèche, 2001). Les principales différences concernent en particulier la couverture de la mosquée. Le système de couverture se compose d'éléments invariants, à savoir, la grande coupole centrale, et les coupolettes (Driouèche, 2001). Les éléments variant, ou bien, les différences, concernent l'utilisation des coupolettes ; elles sont posées directement sur le plancher. Il est constaté aussi l'absence de galerie narthex, ainsi que les murs tympan (Driouèche, 2001).

Au moment de la prise de l'Algérie par les français, Alger comptait 13 grandes mosquées, 109 mosquées, 33 quobba et 13 zaouias. Constantine comptait 107 édifices religieux, dont 59 mosquées, 35 zaouias, 4 medersas et 9 marabouts. Annaba comptait 37 mosquées à la fin du 18^{ème} siècle (Mercier, E, 1903). A l'ouest algérien, la ville de Tlemcen comptait 61 mosquées. Toutefois, il n'y a pas de précision exacte concernant le style des mosquées (style ottoman ou Magrébin).

Durant l'occupation française ; beaucoup de ces mosquées ont été démolies ; telles que la mosquée Essayida à Alger, la mosquée *Sidi Makhlouf* et la mosquée *Sidi Derrar* à Constantine. D'autre, ont subi d'importantes transformations ; telles que la mosquée Ketchaoua à Alger, les mosquées de Constantine : la mosquée *Sidi lakhdar*, la mosquée *souk Leghzel*, la mosquée *Sidi el-Kettani*, la mosquée *Sidi Chadli*, la mosquée *Sidi Affar*, la mosquée *Sidi Tlemçani*.

Le prochain chapitre fera l'objet de description des mosquées de style ottoman, ayant conservées leurs authenticités ; à savoir : la mosquée *Safir (çafar)* à Alger, la mosquée *Sidi Mohamed Ben Charef* à Mazouna, la mosquée *Ali-Bitchine* à Alger, la mosquée l'extérieur de la Casbah d'Alger (*Djamâa Barani*), la mosquée la Pêcherie

(*Djamâa Djedid*), la mosquée Ain Baida (*Moubayâa*) à Mascara, la mosquée *Salah Bey* à Annaba, la mosquée de Pacha à Oran et enfin la mosquée de Dey (l'intérieur de la Casbah) à Alger.

Chapitre IV. CORPUS D'ETUDE

INTRODUCTION.

Après la délimitation du contexte d'étude, aussi géographiquement que temporellement ; vient le présent chapitre pour étudier de près les mosquées potentiellement constituantes du corpus d'étude.

Les différentes mosquées qui vont être présentées dans ce chapitre se caractérisent par un style architectural de la période ottomane, qui préservent encore une authenticité non redoutable.

En fait, il s'agit de huit mosquées réparties sur le territoire national d'Est en Ouest. La fin de ce chapitre sera dédiée à la description en détail de toutes ces mosquées ; notamment concernant les transformations opérées et/ou les différentes dégradations causées par la main humaine et/ou le temps.

4.1. LA MOSQUEE SAFIR A ALGER.

Elle se situe sur les hauteurs de la Casbah, à l'intersection des deux ruelles « Frères Bechara » et « Rouen Abdelhamid ».

4.1.1. DATE DE REALISATION.

Réalisée en 941H/1534 J-C, par un chrétien converti à l'Islam, il s'agit d'un esclave libéré par le célèbre *Khair-Eddine Barberousse* ; en lui accordant le nom de *Caïd Safar (Çafar) ben Abdallah* (القائد صفر بن عبد الله) (Devoulx, 1870 ; Golvin, 1985). En fait, il a accédé à la classe des notable de la société ; grâce aux connaissances qu'il avait acquies en sciences arabe et religieuse, notamment le coran (Devoulx, A, 1870).

S'accordant à une inscription placée sur la porte principale ; les travaux se sont étalés sur neuf mois, pour achever la mosquée le 2 de *Rabie* 1^{er} 941 (11 septembre 1534) (Devoulx, A, 1870).

Mais la mosquée fut reconstruite en 1242 de l'hégire, entre 1826 et 1827 par le Dey *Hussain*, selon une inscription, qui se trouve aussi sur la porte principale de l'édifice à coté de celle du 16^{ème} siècle (Devoulx, A, 1870). Selon Klein, la mosquée a été reconstruite d'abord selon le modèle de la mosquée de Ketchaoua, par Baba *Hassan* vers 1791, ensuite le Dey *Hussain* l'a rénové en 1826-27 (Benbella, KH, 2008) ; cette hypothèse est peu probable, car la plaque de marbre datant de 1826-1827 confirme, de par son texte (جدد الرسم), que la mosquée fut reconstruite à cette époque-là, par le Dey *Hussain*.



Figure 4.1 La première plaque de l'édification de la mosquée Safir, datant de 2 Rabié 1^{er} 941 (11 septembre 1534 J-C). (Source : Auteur, 2023)



Figure 4.2. La plaque de la réédification de la mosquée Safir, datant 1242 H (1826-1827 J-C). (Source : Auteur, 2023)

4.1.2. Caractéristiques architecturales.

4. 1.2.1. LA SALLE DE PRIERE.

Il s'agit d'une petite mosquée, de forme presque carrée, qui mesure (10.00*9.50) m², surmontée d'une grande coupole avec des trompes d'angles. Elle fut très élégante à l'époque de Devoulx, sans pour autant égaler le charme des belles mosquées d'Alger à l'époque (telle que, Ketchaoua, Essyida). Actuellement, l'édifice est très sobre.

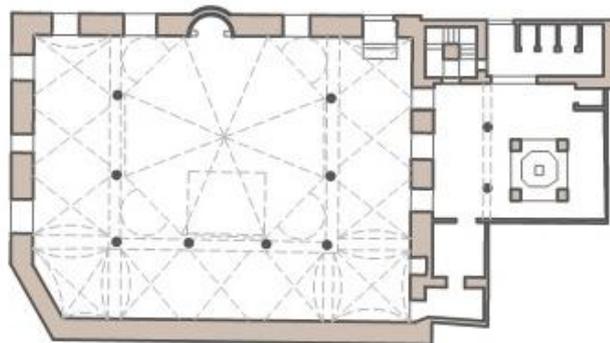


Figure 4.3. Plan du RDC de la mosquée Safir. (redessiné à partir du plan des archives). (source : auteur, 2022).

4. 1.2.2. COUVERTURE.

Une coupole octogonale domine l'édifice, conformément au style des mosquées ottomanes. Dans le cas de la mosquée Safir, la coupole est supportée par huit basses et grosses colonnes, quatre en marbre et les quatre autres sont en pierre (Devoulx, A, 1870). La coupole est entourée par trois galeries, sur les trois cotés de la salle de prière (à l'exception du mur de la qibla) ; elle reprend le même système organisationnel constaté au niveau de la mosquée *Ali-Bitchine* à Alger, et/ou la mosquée du Bey à Annaba, ou encore la mosquée de la Citadelle (Alger) et la mosquée de Mascara (Devoulx, A, 1870).

Il s'agit de galeries en arcades brisées, chacune présente une largeur équivalente à un tiers ($1/3$) du diamètre de la coupole ; elles sont couvertes par de bas-côtés sous forme de voutes d'arrêtes (voutes croisées) (Driouèche, 2001), couvrants ainsi des mezzanines en bois (en 1^{er} étage). Il est important de signaler l'absence des coupolettes dans cet édifice (Driouèche, 2001).

La coupole présente un profil légèrement surbaissé. Posée sur un tambour de forme octogonale. Le passage de l'octogone à la base carrée (plancher) est assuré par l'intermédiaire des trompes d'angles, sous forme de quart de sphère (figure 4.7). La coupole, avec son tambour et les trompes d'angles sont dépourvus de toute décoration.

La coupole est traversée par huit ouvertures (figure 4.6, figure 4.8). Le tambour, quant à lui, est percé de quatre ouvertures rectangulaires (figure 4.9). Deux corniches sont employées pour séparer le tambour des murs porteurs, d'un côté, et de la coupole de l'autre côté. Tout le système de transition avec le tambour sont apparents de l'extérieur.



Figure 4.4. Galeries latérales entourant la coupole centrales (source : auteur, 2023)



Figure 4.5. Couverture en voutes d'arrêtes des galeries latérales (source : auteur, 2023)



Figure 4.6. La coupole octogonale à huit pans de la mosquée Safir (Alger) et son tambour. (Source : Driouèche, 2001, page 192)



Figure 4.7. Trompes d'angle supportant la coupole centrale de la mosquée Safir. (source : auteur, 2023)



Figure 4.8. Fenêtres au niveau de la coupole. (source : Auteur, 2023)



Figure 4.9. Détail de la corniche. (source : Auteur, 2023)

4. 1.2.3. LE MIHRAB.

Le mihrab est une niche, en forme de demi-cercle, couvert par une demi-coupole nervurée, présentant un arc polylobé selon un tracé en plein-cintre, avec deux légères colonnes polygonales en marbre (figure 4.10). Le mihrab est richement décoré, avec des motifs géométriques et floraux, de couleurs vivantes ; à savoir le doré, le rouge et le vert. D'après Devoulx, le mihrab présentait, à son état initial, un décor en faïence, riche en couleurs bleue et blanche. Ce même système de décoration est employé au niveau de l'encadrement des fenêtres (figure 4.11) (Devoulx, A, 1870). De nos jours, cette faïence a été remplacée par un autre type de revêtement couvrant le mihrab et les différents murs d'intérieur, à l'exception de l'encadrement des fenêtres (figure 4.15).



Figure 4.10. Mihrab de la mosquée Safir, Alger. (Source : Auteur, 2023)



Figure 4.11. Encadrement des fenêtres par des carreaux de céramique blanc et bleu. (source : Auteur, 2023)

4. 1.2.4. LE MINARET.

Le minaret de la mosquée Safir est assez particulier, il est de section octogonale, mais avec une base large et peu élevée. Son ornementation se résume à une bande en tuiles vertes à sa partie supérieure (Devoulx, A, 1870). L'origine de la forme octogonale est peu connue en Algérie, mais c'est l'une des caractéristiques de l'architecture des mosquées ottomanes en Algérie (Moubaïa à Mascara, Dey à Alger, Pacha à Oran).

Au-delà du territoire algérien, des formes similaires se retrouvent en Tunisie (figure 4.12). D'après l'étude réalisée sur les minarets, par Chakroun (2016), les minarets de l'époque ottomane en Algérie et en Tunisie sont le fruit d'une fusion du style ottoman et du savoir faire local, traduite par l'ajout de certains spécimens (Chakroun, L, 2016).



a) Minaret de la b) Minaret de *La mosquée* c) Minaret de la Grande
 mosquée Safir (Alger). *Yussuf Dey à Tunis* (Tunisie). mosquée de Bizerte (Tunisie).
Figure 4.12. Ressemblance du minaret de la mosquée Safir à Alger avec des minarets
 Ottomans en Tunisie. (source : a) Benbella Kh, 2007-2008, b&c) Chakroun. L, 2016)

4. 1.2.5. FAÇADES.

L'édifice offre des façades très simples et sobres à la fois. Elles sont formées d'arcades aveugles. Sur la ruelle principale ; l'édifice offre une porte à encadrement en marbre et cinq fenêtres carrées grillées.



Figure 4.13. Façades de la mosquée Safir. (source : Auteur, 2023)



Figure 4.14. Auvent de la porte d'entrée principale. (Auteur, 2023)

Une autre porte, à encadrement en marbre se trouve aussi sur la ruelle secondaire. Il s'agit d'une porte dotée d'un contour en faïences et surmontée par deux inscriptions. Comme elle est surmontée par un auvent en bois. La deuxième façade de la mosquée Safir, compte six fenêtres, carrées et grillées aussi (Devoulx, A, 1870).

4.1.3. TRANSFORMATIONS.

D'après Devoulx, la mosquée n'a pas subi de modifications jusqu'en 1870. L'édifice n'a pas changé de vocation durant la colonisation française (Devoulx, A, 1870). Koumas et Driouèche n'ont signalé aucune transformation datant de la période de la colonisation française.

La mosquée a fait l'objet de travaux de restauration en 2000 (Driouèche, 2001) ; la comparaison entre les anciennes photos avec l'état actuel, montre un changement du revêtement mural initial (carreaux de faïences blanc et bleu), en les remplaçant par un revêtement en bois lors de la dernière opération de restauration (entre 1998 et 2000). Au fil des années, l'édifice avait perdu les arcades aveugles (évoquées par Devoulx) qui ornaient la façade de la mosquée. En absence des références, il est difficile de se prononcer sur la période de cette transformation.



Figure 4.15. Changement du revêtement du Mihrab et du soubassement des murs après les travaux de restauration en 2000 : a) avant (Source : Benbella, Kh, 2008), b) après. (Source : Auteur, 2023)

4.2. LA MOSQUÉE SIDI MOHAMED BEN CHAREF À MAZOUNA (RELIZEN).

La ville de Mazouna se situe au nord de la ville de Relizane. La domination ottomane de l'Ouest algérien s'est faite de manière progressive, à cause de la présence des espagnols sur le territoire algérien. Donc, jusqu'à 1701, Mazouna était la capitale du Beylik el-Gharb (Arrar, 2014). A partir de 1701, la Capitale du beylik de l'Ouest fut transférée vers Mascara, suite aux ordres du Bey *Mostafa Bouchelagham* (Arrar, 2014). Plus-tard, après la décolonisation espagnole de l'ouest algérien par les Ottomans, la Capitale fut transférée, pour une dernière fois, vers Oran en 1792.

La mosquée avec sa medersa ont joué un rôle important dans la région. Elle fut un centre d'apprentissage des érudits venus des différentes contrées de l'Algérie.

4.2.1. DATE DE REALISATION.

A partir de la plaque de marbre à l'intérieur de l'édifice, nous notons que la mosquée fut construite au début du 11^{ème} siècle de l'hégire. Arrar. M, apporte plus de précision quant à la date de réalisation de l'édifice ; elle précise que l'édifice a été réalisé en 1029 A.H équivalent à 1619 à 1620J-C.

D'après la version des descendants du *Sidi Cheref*, qui s'occupent de la gestion de la mosquée (de père en fils) ; l'édifice a prit sa forme finale de style ottoman, après les travaux de reconstruction ordonné par le Bey *Mohamed el-Kebir* sous forme de don en guise de reconnaissance à la mémoire de *Sidi Heni* : هني (fils de *Sidi Mohamed abou Talbe*, descendant du *Sidi Charef*), car il est mort en martyr contre les espagnols pour libérer Oran.

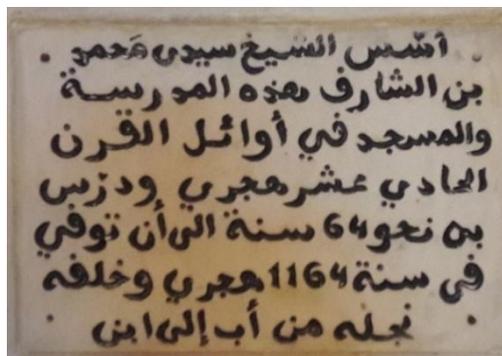


Figure 4.16. Plaque commémorative attestant la date de construction de la mosquée Sidi Mohamed Ben Charef, Mazouna (Relizen). (Source : Auteur, 2023).

4.2.2. CARACTERISTIQUES ARCHITECTURALES.

4.2.2.1. LA SALLE DE PRIERE.

La forme de la salle est carrée. Elle présente une double symétrie avec une centralité prononcée. Deux nefs couvertes de deux voûtes, se croisent au centre de la salle de prière pour donner naissance à la coupole centrale. Cette dernière, est de taille imposante, elle est supportée par quatre piliers en pierre ; subdivisant la salle de prière, pour donner naissance à quatre petits carrés (coins), dont chacun, à son tour, est couvert par une coupole. Nous constatons toutefois, l'absence de documents qui décrivent l'état initial de la mosquée.



Figure 4.17. Piliers supportant la coupole centrale.
(Source : Auteur, 2023)



Figure 4.18. Vue de l'intérieur sur une coupole.
(Source : Auteur, 2023).



a) L'entrée de la mosquée en face du Mihrab



b) Mihrab de la mosquée.

Figure 4.19. Vues d'intérieures sur la mosquée Sidi Mohamed Charef, Mazouna_ Relizan. (Source : Auteur, 2023)

4.2.2.2. LA COUVERTURE.

La couverture confère à la salle de prière un aspect cruciforme, à cause des deux voutes qui se croisent au centre renforce la double symétrie. Quatre coupoles aux angles, de forme polygonale, similaire à la coupole centrale, mais avec un diamètre plus réduit. La coupole repose sur un carrée, supportée par « quatre bras voûtés couverts avec des voûtes en berceau », supportés à leurs tour, par des colonnes en marbre.

4.2.2.3. LE MIHRAB.

Il se trouve en face à l'entrée de l'édifice, créant ainsi le premier axe de symétrie. Quant aux ouvertures, elles sont de petites tailles, de forme d'arc en ogive outrepassé, protégée souvent avec une grille en fer forgé.



Figure 4.20. Vue sur le mihrab de la mosquée de Sidi Charef, Mazouna. (source : Auteur, 2023).

4.2.3. TRANSFORMATIONS.

L'édifice a fait l'objet de plusieurs opérations de rénovation (Arrar, 2014), pour maintenir le confort des usagers, car avant la démolition de la madersa, la mosquée recevait des étudiants de différentes régions pour l'apprentissage du Coran et du *Fikh* (cours de théologie). Arrar évoquait des extensions ; alors que le bâtiment se présente comme un corps uni, il est difficile de distinguer la nature des extensions effectuées.

D'après un article paru au « *Journal des Débats Politiques et Littératures* » en Mardi 03 Février 1852, la mosquée était en état de ruine à cette époque et elle nécessita de travaux de restauration. Il semble selon le même article qu'il s'agit de « *presque une entière reprise* » aux dépenses des habitants de la ville (Article de presse, 1852). L'article

indique aussi, que les travaux devront terminer au printemps ; ce qui signifie une courte période (le texte de l'article fut envoyé le 1^{er} janvier 1852). Le journal n'offre aucune information supplémentaire sur la nature des travaux opérés, sauf la présence de quelques « *ouvriers militaires* » pour accompagner et orienter les habitants dans leurs travaux de restauration.



» La mosquée de Sidi-ben-Charef, aujourd'hui presque en ruine et l'un des rares établissements d'enseignement supérieur de la subdivision de Mostaganem, sera presque entièrement reprise et réparée aux dépens des fidèles. Quelques ouvriers militaires aident de leur concours et de leurs conseils les Mazouniens dans cette réparation, qui sera terminée au printemps.

Figure 4.21. Extrait du « *Journal des Débats Politiques et Littéraire* » sur l'opération de restauration de la mosquée Mohamed Sidi Charef à Mazouna (Relizan). (Source : Article de presse, 1852)

4.3. LA MOSQUEE ALI-BITCHINE A ALGER.

4.3.1. DATE DE REALISATION.

Fondait en 1620, par Ali-Bitchine, ou Ali Petchinini, ou en arabe "علي بچنين". Il s'agit d'un Italien convertit à l'Islam. La précision de son origine et de la date de la construction, a pu être faite par Devoulx.

Devoulx, dévoile la date à partir d'un acte du *cadi Hanafi*, dans lequel les commencements des travaux ont débuté le mois de *Redjeb* 1007 de l'hégire ; correspondant à la date comprise entre « le 28 janvier au 6 février 1599 » (Devoulx, A, 1870).

4.3.2. CARACTERISTIQUES ARCHITECTURALES.

4.3.2.1. LA SALLE DE PRIERE.

La mosquée à son état initial, couvrait une superficie d'environ 500 m² (Devoulx, A, 1870). Il s'agit d'une forme trapézoïdale. La salle de prière est surélevée d'un demi-niveau ; pour libérer le r-d-c aux commerces. La mosquée avait des annexes à son état original (la cour et les ablutions). Sa façade principale est de vingt cinq mètre non compris les annexes, Son mur de fond étant de vingt-un mètres (Devoulx, A, 1870).

La salle de prière, mesure 23.00x22.00 m² (Bourouiba, 1986), elle est dominée par une très grande coupole centrale à base d'octogone couvrant l'espace central. Ce dernier est entouré par une galerie sur les trois cotés, et une double galerie sur le quatrième coté (en face du mihrab).

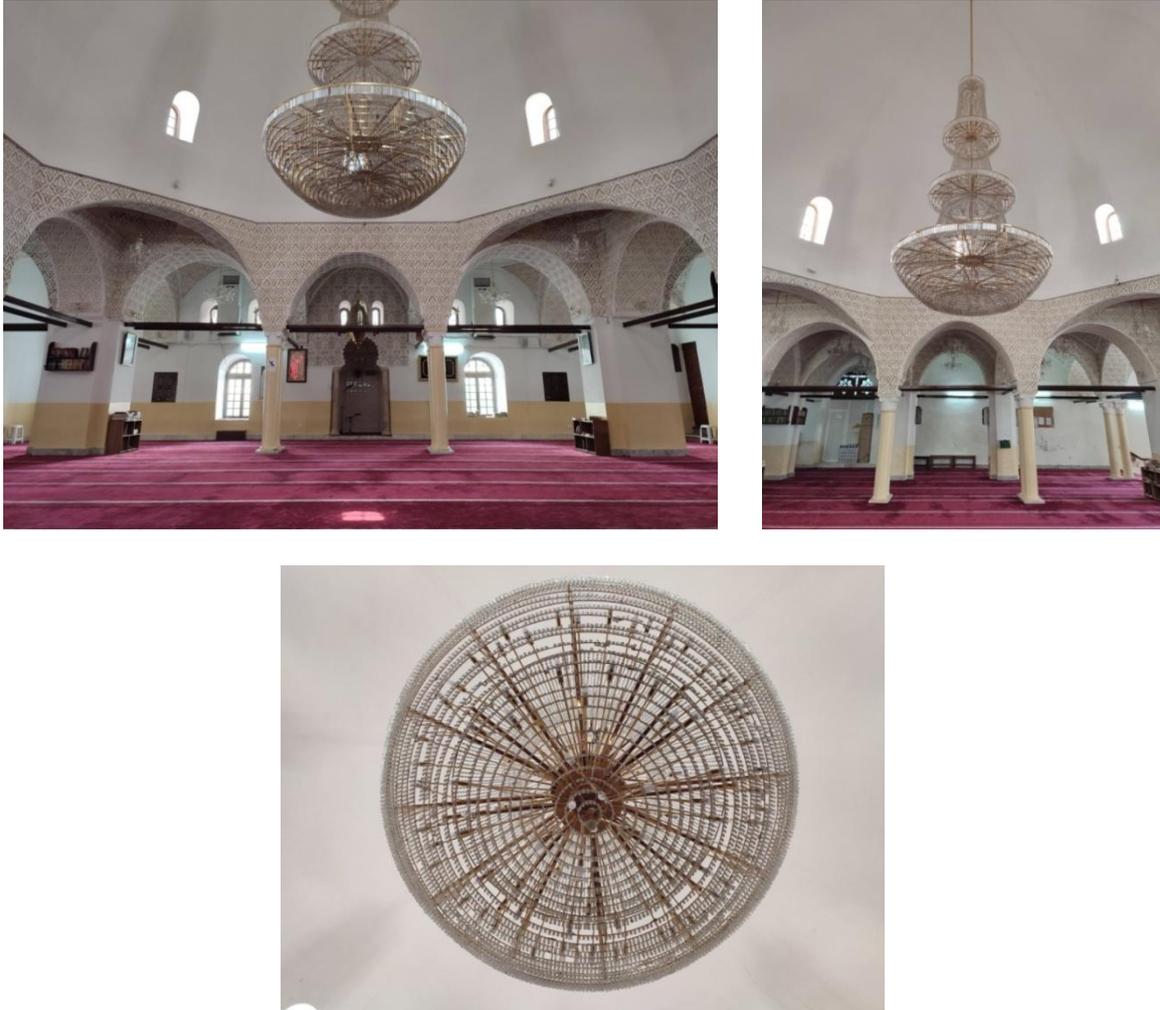


Figure 4.22. Différentes vues d'intérieures sur la coupole de la mosquée Ali-Bitcchine, Alger. (Source : Auteur, 2023)

4.3.2.2. COUVERTURE.

La salle de prière est dominée par une grande coupole octogonale, qui s'appuie sur des arcs en ogive, qui sont à leurs tours, supportés, d'une part par quatre gros piliers en maçonnerie placés aux angles de la coupole (Devoulx, A, 1870), d'autre part, huit autres piliers intermédiaires, sous forme de deux colonnes jumelles en pierre, qui complètent le carré supportant ainsi l'octogone de la grande coupole. La coupole centrale présente à l'extérieur *un extradors en seize (16) pans* (Driouèche, 2001). La coupole centrale est percée par huit fenêtres au niveau de sa partie basse (Driouèche, 2001).

La connexion entre la base octogonale de la coupole et le plancher est, en fait, assez particulière. Le vide triangulaire qui résulte au niveau des quatre angles est couvert par une petite coupole hexagonale. Ceci est rendu possible grâce aux arcs en ogive, de l'ordre de trois par angle (figure 4.22). Le même système constructif se reproduit à la mosquée du Dey à la citadelle d'Alger (Driouèche, 2001), qui semble une copie de la mosquée Ali-Bitchine.

La coupole centrale est entourée par des coupolettes, qui couvrent les galeries. Elles adoptent la même forme octogonale, mais avec des tailles différentes et plus petites (Driouèche, 2001). La différence de la taille des coupolettes est en fonction de leurs positionnements par rapport à la forme générale de l'édifice. Chacune de ces coupolettes, à huit pans, est percée par quatre fenêtres (un pan sur deux est percé, de manière alternée) (Driouèche, 2001).

Golvin évoque que le nombre des coupolettes dans la mosquée Ali-Bitchine, rappelle les mosquées *muradides* de Brousse (2^{ème} phase d'évolution de mosquée ottomane, aux alentours de l'an 1400). Les principales différences résident dans le profil et la distribution de ces coupoles secondaires (Golvin, L, 1985).

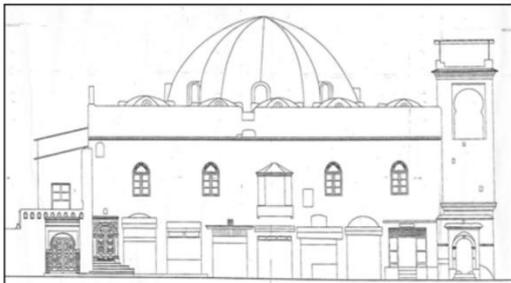


Figure 4.23. Façade nord de la mosquée Ali Bitchine. (Source : Driouèche, 2001(Driouèche, 2001))

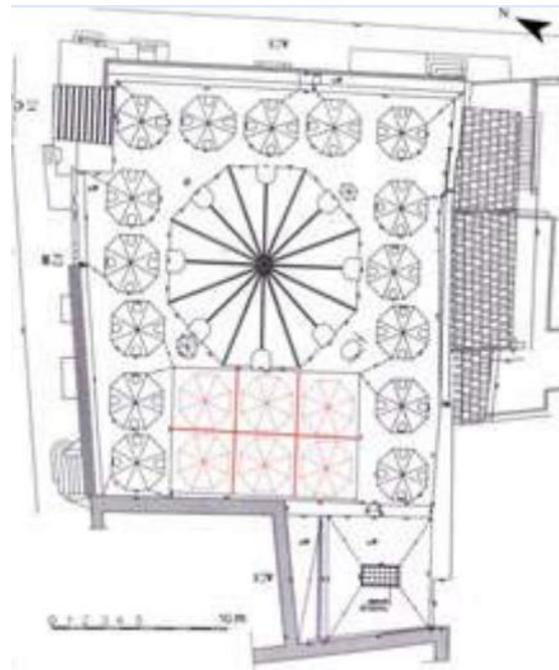


Figure 4.24. Plan de toiture de la mosquée Ali-Bitchine. (Source : Driouèche, 2001(Driouèche, 2001))

4.3.2.3. LE MIHRAB.

Une niche au milieu du mur de la qibla, se présente en un arc en plein cintre supporté par deux colonnes en marbre. Comme le reste de la salle de prière ; la partie inférieure est sobre avec une couleur blanche, tandis que la partie supérieure est riche en décor géométrique en plâtre. Etant la salle de prière à l'étage, la niche de mihrab sort vers l'extérieur en encorbellement soutenu par quatre consoles. Au dessus du mihrab trois petites fenêtres ; qui semble avoir un arc en plein-cintre. Sur les deux cotés du mihrab se trouve une fenêtre flanquée dans le mur, avec une forme en arc plein-cintre ; contrairement à ce que rapporte Devoulx, qui évoquait des fenêtres en ogive (Devoulx, A, 1870).



Figure 4.25. Mihrab de la mosquée Ali-Bitchin, Alger. (Source : Auteur, 2023).

4.3.2.4. LE MINARET.

La mosquée Ali-Bitchine est dotée d'un minaret carré, d'une hauteur d'environ 15 mètres ; donc, sans dépasser la hauteur de la grande coupole. Le minaret accentue l'angle des deux rues (Bab-el-Oued et la Casbah).

Le traitement du minaret peut être subdivisé en quatre parties. La partie basse est un peu détachée du corps de la tour. Il reste les trois parties constituant la tour du minaret, qui commence en bas par une partie aveugle, à part quelque niche, puis la deuxième partie décorée avec un grand arc aveugle en outrepassé inscrit à l'intérieur d'un rectangle. Et enfin, la partie la plus riche, qui se compose de trois petits arcs aveugles en outrepassé, supportés par deux colonnes avec chapiteaux, au-dessus se trouvent trois arcs en ogive. Le minaret termine avec un traitement de merlons, et un balcon à partir duquel se fait, dans le

temps, l'appel à la prière. La partie supérieure du minaret n'a pas échappé aux endommagements des premières années de la conquête française (Driouèche, 2001).

4.3.2.5. LES FAÇADES.

Comme la majorité des édifices qui seront étudiés dans ce chapitre ; les façades sont très sobres de l'extérieur. La façade Est (en face à la place des martyrs) se caractérise par la présence de la niche de mihrab qui sort en encorbellement. De part et d'autre, se trouvent deux grandes fenêtres pour illuminer la salle de prière. Au-dessus de chacune de ces quatre fenêtres se trouvent deux petites fenêtres de la même forme, mais de taille encore plus petite. A l'extrême gauche de cette façade, se trouve la porte secondaire de l'édifice, ornée par un arc en plein cintre en plâtre, couverte par un auvent en bois, décoré par de la tuile verte. Le décor rappelle davantage les mosquées locales (style mauresque). Tandis que la façade Nord (sur la rue de la Casbah), se caractérise par la présence de quatre fenêtres de grandes tailles, au-dessus de chacune d'elles, il y a une petite fenêtre. A son extrême droite se trouve la porte d'entrée principale de la mosquée, en double vantaux, elle est aussi ornée par un arc en plein cintre en plâtre, et couverte par un auvent en bois et de la tuile verte. Les deux façades sont certes simples, mais sont magnifiées par un joli minaret à l'angle de l'édifice ; qui en fait, constitue la pièce maîtresse des façades.



Figure 4.26. Façade Est de la mosquée Ali-Bitchine, Alger. (Source : Auteur, 2023)



Figure 4.27. Les deux façades de la mosquée Ali-Bitchine ; à droite la façade Nord, et à gauche la façade Est. (Source : Auteur, 2023)

4.3.3. TRANSFORMATIONS.

Avant d'aborder les différentes transformations opérées sur cette mosquée, il est indispensable de signaler qu'elle fut affectée, dès 1839 à la pharmacie centrale de l'armée. Remise ensuite à l'administration civile le 27 mars 1843, pour qu'elle soit livrée à la direction de l'intérieur, pour servir aux besoins du culte catholique (Devoulx, A, 1870). A cet effet, quelques transformations ont été opérées, mais grâce aux travaux de restauration opérés en 2000, l'édifice a presque récupéré sa forme d'origine. Quelques travaux vont être présentés ci-après.

L'une des principales transformations apportées par les français, dans un souci de consolidation, ce fut l'assemblage des colonnes jumelles en pierre, en un grand pilier en maçonnerie, en 1843(Devoulx, A, 1870).

Une transformation majeure a été entreprise par les français. Il s'agit de la construction d'une coupole à quatre pans (Devoulx, A, 1870), couronnée par une verrière rectangulaire (Driouèche, 2001), à la place des six (06) coupolettes couvrant la galerie doublée (en face du mihrab), pour installer le chœur (Devoulx, A, 1870).

A l'extérieur, la grande porte, a bénéficié d'un très joli encadrement sculpté, provenant de la mosquée de Ketchaoua, lors de sa conversion en Cathédrale par les français, en 1843. Chacun des deux battants de cette porte, est doté d'une rosace en forme de médaille, dont une inscription en relief, sous forme de sculpture, exprimant ainsi la phrase suivante : « ما شاء الله » ; « *que volonté de Dieu s'accomplisse* ». D'après Devoulx, ces sculptures sont l'œuvre du maître *Ahmed ben Lablabtchi*, qui fut depuis *Amine* de la corporation des menuisiers » (Devoulx, A, 1870).

Le minaret fut rasé en octobre 1869 pour cause de sûreté publique (Devoulx, A, 1870). Les latrines et l'espace d'ablution, comme faisant partie indépendante de l'édifice, ont été rasées aussi (Devoulx, A, 1870).

En l'an 2000, l'édifice a bénéficié d'un projet de restauration, dont l'objectif est de restituer la mosquée à son état initial, comme elle l'a été avant l'occupation française.

Ce projet de restauration, consiste à la destruction de la coupole à quatre pans, et la récupération des six coupoles initiales couvrant la galerie doublée (en face au mihrab). En plus, une restitution du minaret endommagé. Les opérations de restitutions sont rendues

possibles grâce à la coupe faite par *P.A. Guiauchain*, architecte en chef des bâtiments civils en Algérie (Driouèche, 2001).

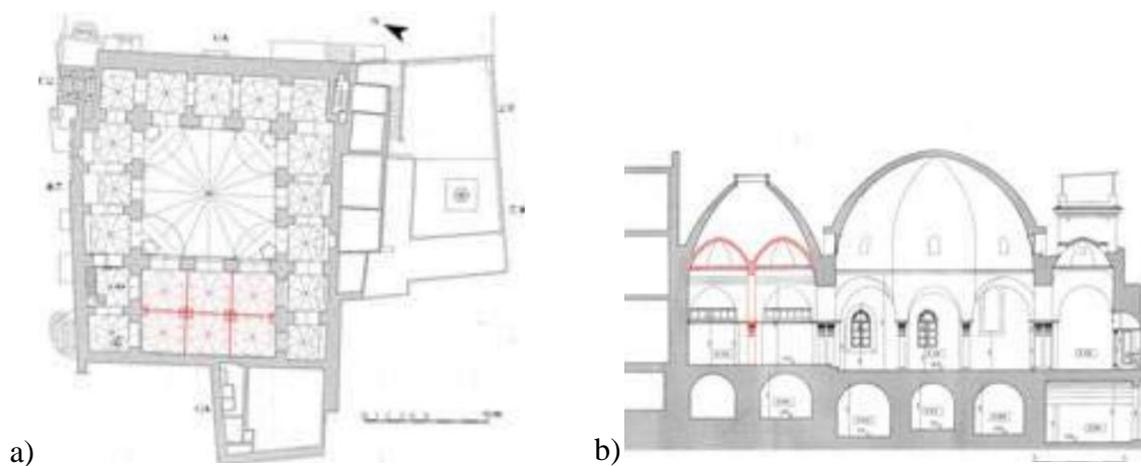


Figure 4.28. Restitution des coupolettes en plan (a) et en coupe (b), à la mosquée Ali-Bitchine. (Source Driouèche, 2001)

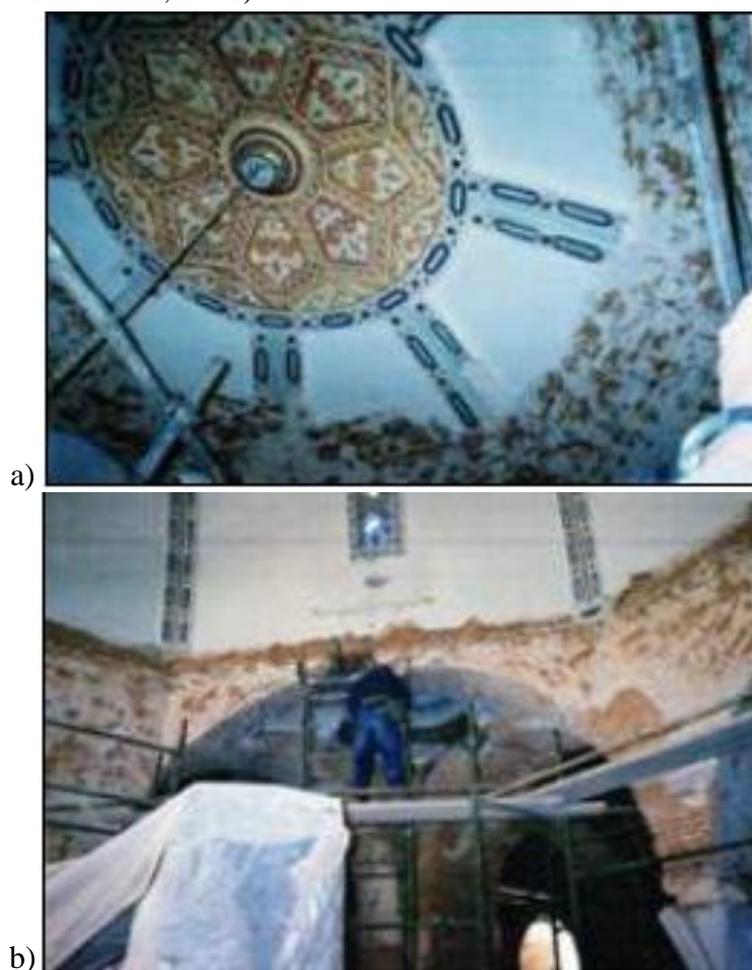


Figure 4.29. Le décor de la coupole centrale avec les travaux de restauration effectués en 2001. (le bureau d'étude chargé du suivi est « Atelier 3D. Source : Driouèche, 2001).

4.4. LA MOSQUEE DE LA PECHERIE (DJEDID) A ALGER.

4.4.1. DATE DE REALISATION.

La mosquée de la Pêcherie et/ou appelée aussi *Djamâa Djedid*, a été réalisée en 1070 de l'hégire, 1660 J-c.

4.4.2. CARACTERISTIQUES ARCHITECTURALES.

4.4.2.1. LA SALLE DE PRIERE,

La salle de prière est de forme rectangulaire qui fait (39.56-39.27x 24.57-23.18) m² non compris l'épaisseur des murs, qui est en moyenne d'un mètre, couvrant ainsi une superficie de 1371 m² (Bourouiba, 1986). L'accès à l'intérieur se faisait par l'intermédiaire de quatre portes ; dont l'une des portes (sur la façade Ouest/Sud-Ouest) a été supprimée, la deuxième fut déplacée un peu, et une troisième fut rehaussée suite aux travaux de remblais (Devoulx, A, 1870), raison pour laquelle un grand escalier en bois a été construit pour permettre l'accès à la salle de prière à partir du mur postérieur (en face au mihrab). Toutes ces modifications ont été effectuées durant la colonisation française.

4.4.2.2. LA COUVERTURE,

Une grande coupole, de forme Ovoïde domine l'édifice. Elle se trouve au croisement des deux voutes à berceaux (Koumas, A, 2003), placées au-dessus des deux nefs ; la principale en direction de la qibla, et la deuxième parallèle au mur de la qibla. Il en résulte de ce croisement ; quatre petits carrés, couverts par de petites coupoles octogonales, supportées par des pendentifs à un niveau inférieur. En effet, la couverture de l'édifice vient accentuer la forme de croix latine.

La coupole centrale est supportée par quatre gros piliers de deux mètres de cotés, formant ainsi quatre arcs en plein-cintre, permettant de séparer la nef centrale des bas-côtés (Koumas, A, 2003). La coupole principale est percée par quatre fenêtres, qui sont couvertes ; chacune, par un auvent en bois à l'extérieur. L'édifice à l'extérieur est orné en merlons ; reflétant ainsi les éléments de tradition maghrébine (Devoulx, A, 1870).

4.4.2.3. LE MINARET.

Le minaret est placé à l'angle N.-O., et mesurait 29 m de hauteur, avant les travaux de réaménagements opérés par les français aux alentours de la mosquée. La hauteur de ce dernier, suite à ses travaux, a rétréci jusqu'à 25 mètres. Il est de forme carrée, d'inspiration maghrébine, mais avec un ordonnancement beaucoup plus modeste. La tour est conçue en trois volumes, chacun possède un traitement décoratif différent, pour terminer à la fin avec un balcon orné de merlons, au-dessus duquel se trouve un campanile. Une corniche sépare les trois parties composant le minaret.

La Partie la plus basse du minaret est dépourvue de décoration, La seconde partie est dominée par une forme elliptique à l'intérieur de deux rectangles. Un décor en céramique couvre entièrement la forme ovale. La troisième partie, est la plus décorée et est dotée d'une horloge, installée par les français. Cette partie termine avec une bande ; richement décorée en céramique. Au-dessus de laquelle se dressent les merlons, pour orner le balcon. Enfin, le campanile, vient pour mettre en valeur le minaret. Ce campanile est de forme carrée, ornée sur chaque face par deux arcs supportés par des colonnettes. Comme le corps principal du minaret, le campanile est traité au niveau de sa partie supérieur par une bande en céramique.

Le minaret, certes simple, mais il reflète la simplicité des minarets maghrébins de la période Hafside.

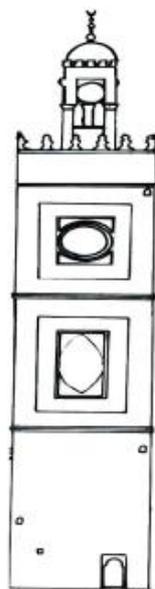


Figure 4.30. Minaret de la mosquée Djedid. (source : Benebella, 2008)

4.4.2.4. DECORATION.

La salle de prière offre un décor plutôt sobre, caractérisé essentiellement par un soubassement en faïence de couleur blanche et bleue, le long des murs de la salle de prière. Cependant un riche décor orne le mihrab, le minbar et la coupole centrale.

Contrairement au caractère austère de la salle de prière ; la coupole centrale présente une riche décoration. Il a été utilisé du plâtre ajouré, et des carreaux de faïences de céramiques de différents motifs ; couvrants les pendentifs (Driouèche, 2001). Une galerie en bois orne la partie supérieure des murs (sous les voutes) et la partie inférieure de la coupole.

Quant au mihrab, qui est doté d'un arc en plein cintre outre passé, richement décoré en plâtre, et encadré par une très jolie faïence polychrome, au dessus de laquelle se trouvent trois petites fenêtres en arc plein cintre, entourées par un carré en plâtre, richement décoré, encadré par une faïence. En fait, une alternance entre le décor en plâtre et la faïence polychrome, qui donne un très joli contraste avec la sobriété des parois blanches.

Le minbar en marbre blanc est un chef d'œuvre. Typiquement Ottoman, très riche en décor sculpté sur marbre. Benbella, rapporte qu'il appartenait à la mosquée Essayida, et fut déplacé suite à sa destruction. En l'absence d'anciens textes confirmant cette hypothèse, il serait difficile de la confirmer. Un deuxième minbar en bois adossé au *Mahfil* vient occuper le centre de la salle de prière, comme il est souvent le cas des grandes mosquées ottomanes en Turquie.

La rareté de la décoration dans cet édifice, ne va pas à l'encontre de sa grandeur. Sa volumétrie, sans précédent certes, a attribué à l'édifice un caractère particulier (Devoulx, A, 1870).

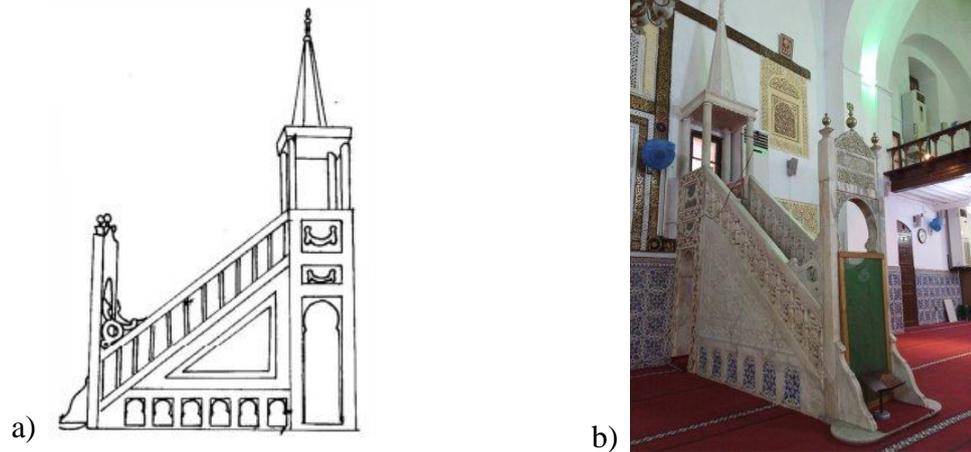


Figure 4.31. Minbar en marbre : a. Schéma (source : benbella, 2008)- b. Photo (Source : Auteur, 2023)

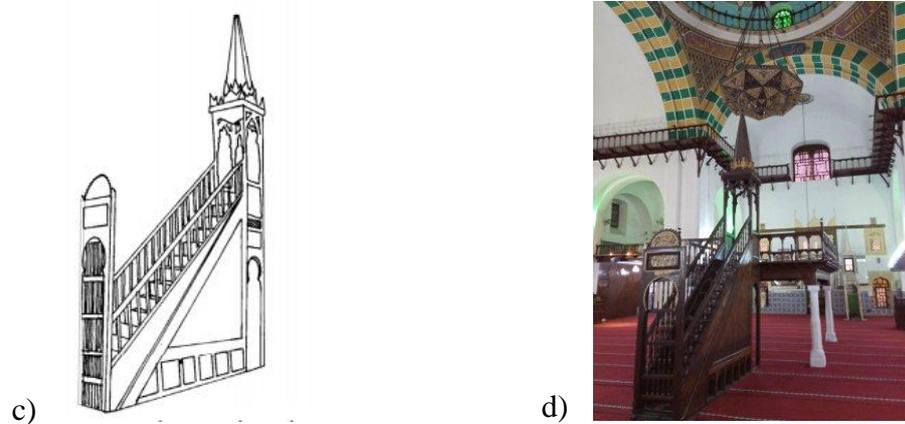


Figure 4.32. Minbar en bois : c. Schéma (source : benbella, 2008)- d. Photo (Source : Auteur, 2023)

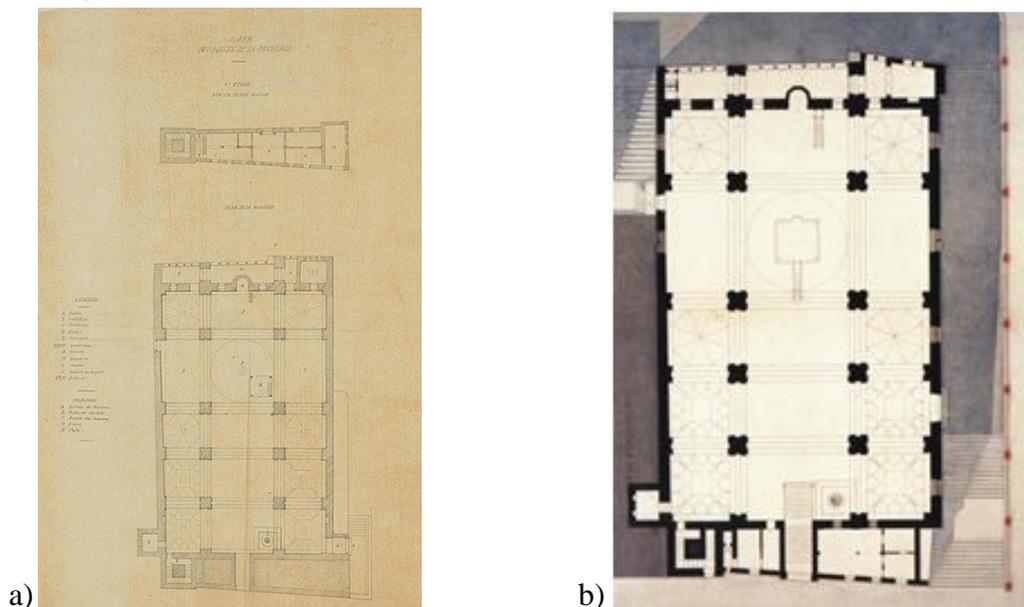


Figure 4.33. Vue en plan de la mosquée Djedid (la pêcheurie) : a) Relevé en 1850, avant les modifications opérées par les français. (source : Claudine Piaton - Juliette Hueber : Halimede, 2016) ; b) : Plan fait par Albert Ballu en 1884, après les travaux de réaménagement extérieur. (Source : Koumas, 2003)



Figure 4.34. Façades de la mosquée la Pêcherie (Djedid). (source : Koumas, 2003)

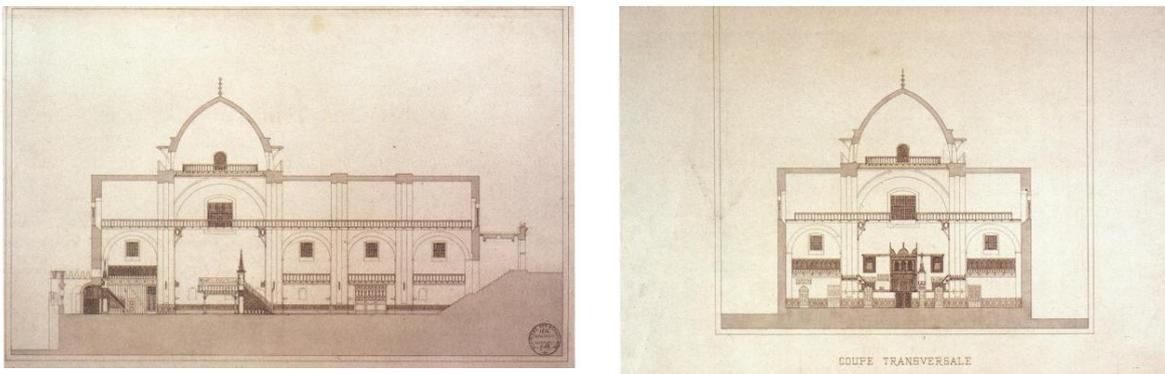


Figure 4.35. Coupes sur la mosquée la Pêcherie (Djedid). (Source : Koumas, 2003).

4.4.3. TRANSFORMATIONS.

D'après Koumas, des travaux de restauration ont débuté en 1855. Cela concernaient essentiellement les décorations, les galeries et tribunes, les terrasses, les voutes, les coupoles et le minaret (Koumas, A, 2003). Koumas ne donne pas de précision, sur la nature de ces travaux de restauration, on suppose qu'on n'a pas touché à l'authenticité de l'édifice.

Il semble que les travaux de transformation effectués dans la mosquée la pêcherie, concerne uniquement l'aspect extérieur de l'édifice. Devoulx, a bien expliqué ces différentes opérations.

La mosquée était percée de quatre portes (Devoulx, A, 1870). « *La première, s'ouvrant, dans la façade O.-S.O, a été supprimée* » par les français (Devoulx, A, 1870).

Par ailleurs, la façade Nord a fait l'objet de reconstruction (Koumas, A, 2003). Cela est imposé par les travaux de voirie. Parmi les rajouts, on cite l'escalier, introduit pour relier la mosquée à la rue supérieure (Koumas, A, 2003) ; ainsi que la translation de la

porte un peu plus au Sud (Devoulx, A, 1870). Lors des travaux de voirie, les remblais effectués dans la rue de Mourabidine (ex : rue de la marine), ont fait que la hauteur du minaret est réduite de 29.50 mètres à 25 mètres, non compris le clocheton (Devoulx, A, 1870). Sur la façade Nord/Nord-Ouest ; la porte fut surélevée (comme expliqué précédemment).

Une fontaine se trouvait à l'intérieur de la salle de prière (voir les relevés ; figure 4.33b), actuellement disparue. Devoulx rapporte que les latrines (se trouvaient sur la rampe de la pêche) ont été démolies (Devoulx, A, 1870).

Quant à l'horloge à trois cadrans, elle a été placée par l'administration française à cette même époque (Devoulx, A, 1870). Koumas, réclame qu'en dépit de la richesse des monuments, les transformations effectuées en cette époque, sont souvent radicales (Koumas, A, 2003). La dernière opération de restauration de ce monument remonte à 1999 (Driouèche, 2001).

4.5. LA MOSQUEE AL-MOUBAÏA A MASCARA.

Après Mazouna, Mascara est devenue la deuxième Capitale du Beylik al-Gharb, sous le gouvernement de Mohamed el-Kebir (Arrar, 2014). A cet effet, la ville fut dotée de monuments importants, vu la stabilité politique connu sous ce Dey.

4.5.1. DATE DE REALISATION.

La mosquée est construite par le Bey Mohamed el-Kebir le 1^{er} Dhou-el-Qidâa hégirien, qui correspond au 19 Octobre 1781 (Arrar, 2014).

Appelé en premier temps sous le nom de son fondateur, Mosquée Mohamed el-Kebir, puis, vu sa proximité de la source d'eau '*Ain el-Baida*', elle portera le nom : mosque Aîn Baigha. Et enfin, elle doit son nom actuel '*Moubaïa*' au serment d'allégeance pour l'Emir Abdel-Kader, de la part des chefs des tribus de la région de Mascara, dont la mosquée fut l'endroit de réunion (Arrar, 2014).



Figure 4.36. Plaque commémorative de l'inauguration de la mosquée Moubaiïa à Mascara. (Source : Auteur, 2023)

4.5.2. CARACTERISTIQUES ARCHITECTURALES.

4.5.2.1. LA SALLE DE PRIERE.

L'édifice est aussi de forme carrée. La structure offre une spatialité, renforcée par la présence de la grande coupole, entourée par une galerie sur chaque côté. Le tambour sur lequel repose la coupole et supportée par quatre piliers aux angles ; sous forme de quatre colonnes jumelées. Entre chaque piliers se trouvent deux autres piliers ; en deux colonnes jumelées (figure 4.37). La salle est hypostyle et les galeries qui entourent l'espace central sont faites en arc en plein cintre outrepassé. Les murs d'une épaisseur d'environ 1.16cm, sont construits en pierre, brique et argile (Arrar, 2014).



Figure 4.37. L'intérieur de la salle de prière de la mosquée Moubaiïa, Mascara. (Source : Auteur, 2023).

4.5.2.2. LA COUVERTURE.

Une grande coupole centrale à base octogonale domine la salle de prière. Le système constructif permettant le passage du tambour octogonal supportant la coupole au plancher est similaire à celui de la mosquée Ali-Bitchine. En fait, au lieu des trompes d'angles ; trois arcs en plein cintre viennent supporter la coupole centrale au niveau de chaque angle (figure 4.38). Le tambour est percé par quatre fenêtres, au-dessus des coins.

Deux axes perpendiculaires définissent la position des quatre coupolettes ; l'un des deux axes est perpendiculaire au mur de qibla. Les coupolettes sont de forme octogonale, trois sont sobres, tandis que la quatrième, qui se trouve au-dessus du mihrab est plus grande et richement décorée (figure 4.43). Le plancher (au-dessus des galeries) est couvert par des voutes d'arrêtes (voutes croisées : figure 4.42).



Figure 4.38. Détail du passage de la coupole au plancher. (Source : Auteur, 2023)



Figure 4.39. Toiture de la mosquée. (Source : Arrar, 2014)



Figure 4.40. Coupolette. (source : auteur)



Figure 4.41. Voutes croisées supportant le plancher des quatre galeries. (Source : Auteur, 2023)

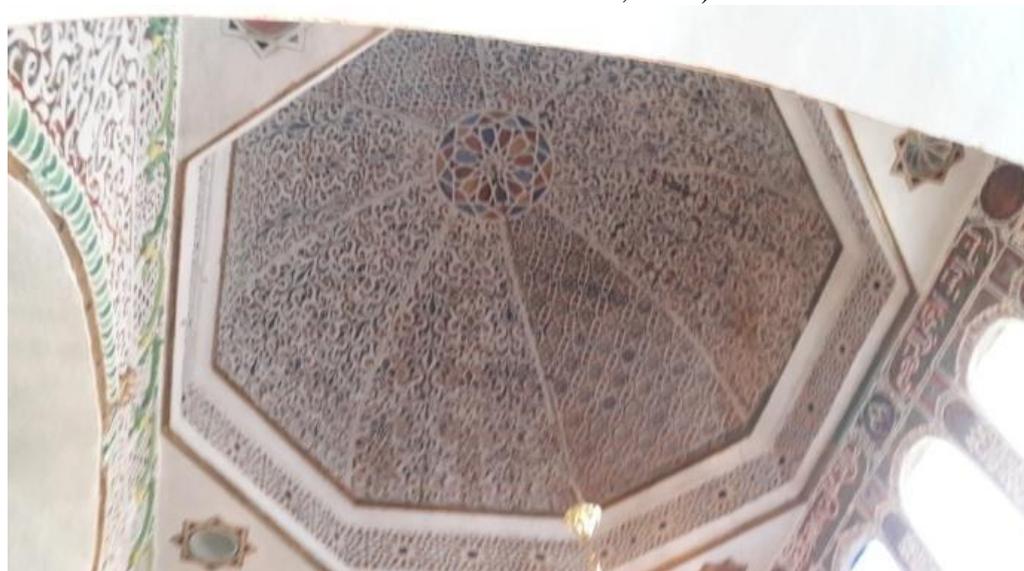


Figure 4.42. Coupole au-dessus du mihrab de la mosquée Moubai'a, Mascara (Source : Auteur, 2023)



Figure 4.43. Fenêtre aux quatre angles de l'espace central. (Source : Auteur, 2023)

4.5.2.3. LE MIHRAB.

La mosquée est dotée d'un très joli mihrab, qui se présente comme une niche polygonale, avec une façade richement décorée, sous forme d'arc plein cintre outrepassé, supporté par deux fines colonnes. L'arc est inscrit à l'intérieur d'un carré riche en décoration en plâtre, entouré sur ces trois cotés par une calligraphie. Au-dessus se trouvent trois petites fenêtres, entourées par une calligraphie sur les trois cotés. Aux deux extrémités de la travée contenant le mihrab ; se trouve une bande en plâtre sculptée en décor de formes géométriques.

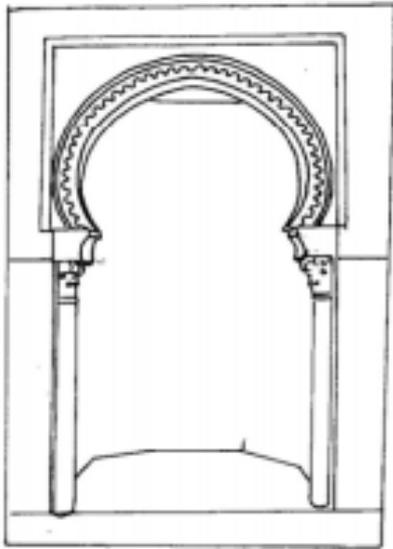


Figure 4.44. Schéma du Mihrab de la mosquée Moubaiïa, Mascara. (source : Benbella, 2007)



Figure 4.45. Photo du mihrab de la mosquée Moubaiïa, Mascara. (source : auteur)

4.5.2.4. LES FAÇADES.

Les façades sont simples, mais dégagent un charme à partir de l'équilibre harmonieux entre le bâtiment en soit et sa coupole centrale ainsi que son minaret. La salle de prière dispose d'une jolie porte d'accès. Les fenêtres sont de deux types, le premier type est de taille moyenne en forme d'arc en plein cintre. Le deuxième type est plus étroit en forme d'ogive. Un joli décor en frise jalonne les façades en marquant la hauteur du plancher.



Figure 4.46. Vue de la mosquée Moubaiya de l'extérieur (Source : Auteur, 2023)



Figure 4.47. L'entrée à la salle de prière de la mosquée Moubaiya, Mascara. (Source : Auteur, 2023)

4.5.2.5. LE MINARET.

Un très beau minaret de forme octogonale, proportionnel à la taille de l'édifice. Réalisé en pierre taillée, il s'élève à partir d'une base carrée. Le passage du carré à l'octogone est embelli par de jolis motifs en pierre (figure 4.49).

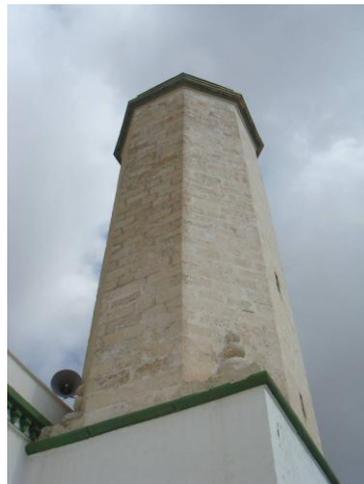


Figure 4.48. Minaret de la mosquée Moubaiya, Mascara. (Source : Auteur, 2023).

4.5.3. TRANSFORMATION.

A l'époque ottomane, la medersa de la mosquée constituait un pôle d'attraction des étudiants. Avec l'arrivée des colons français la mosquée avait subi une tentative d'anéantissement, en l'affectant comme étant un dépôt d'équipements militaires en 1833, puis exploitée comme un magasin de blé et fourrage jusqu'à 1919, car la mosquée, comme l'indique son nom « *Moubaiya* » avait acquis une signification symbolique, d'abord en mémoire du Bey Mohamed el-Kébir, puis surtout avec la révolution de l'Emir abdelkader.

En plus de son affectation aux activités précédentes, le pouvoir français tenta en vain, par le déplacement de la tombe de « Sidi El-Hassen » de la nommer en son nom ; comme l'indique la carte postale suivante.



Figure 4.49. Mosquée Moubaïa, surnommée Sidi El-Hassen par l'occupant français. (source : Delcampe, 2014)

4.6. LA MOSQUEE DU BEY A ANNABA.

La mosquée Salah Bey ou Djamaa Djedid, se trouve en plein centre de la ville d'Annaba, précisément à côté de la place 19 Mai 1956 (anciennement appelée place d'arme) (Papier, 1890). Alexandre Papier, la décrivait comme étant une mosquée très sobre, en comparaison aux mosquées zianides de Tlemcen, riches en décoration arabe.

4.6.1. DATE DE CONSTRUCTION.

La date de construction est bien précise, grâce à une inscription en dehors de la mosquée, sur plaque de marbre ; la date de construction de la mosquée revient à 1206 de l'hégire ; donc entre le 31 août 1791 et le 18 août 1792, ce qui signifie que la mosquée fut réalisée peu de temps avant l'invasion française, elle est l'œuvre de Salah Bey (Papier, 1890), comme en témoigne un poème gravé sur la plaque de marbre (Benbella, KH, 2008).

لعمرك بيت الله للسر جامع مشيد أركان به النور ساطع.
 بدت دونه زهر الكواكب رفعه به بونة للسعد منها مطالع.
 به جاد تاج الدين والمجد صالح إلى درج العلياء راق وطالع.
 أمير البرايا زاد ظفرا ونصرا مؤيد دين الحق للشرع تابع
 فمذ أسس البيت الرفيع على الهدى أرخه للخير برك جامع سنة 1206 هـ



Figure 4.50. Peinture sur l'extérieur de la mosquée du Bey, Annaba.

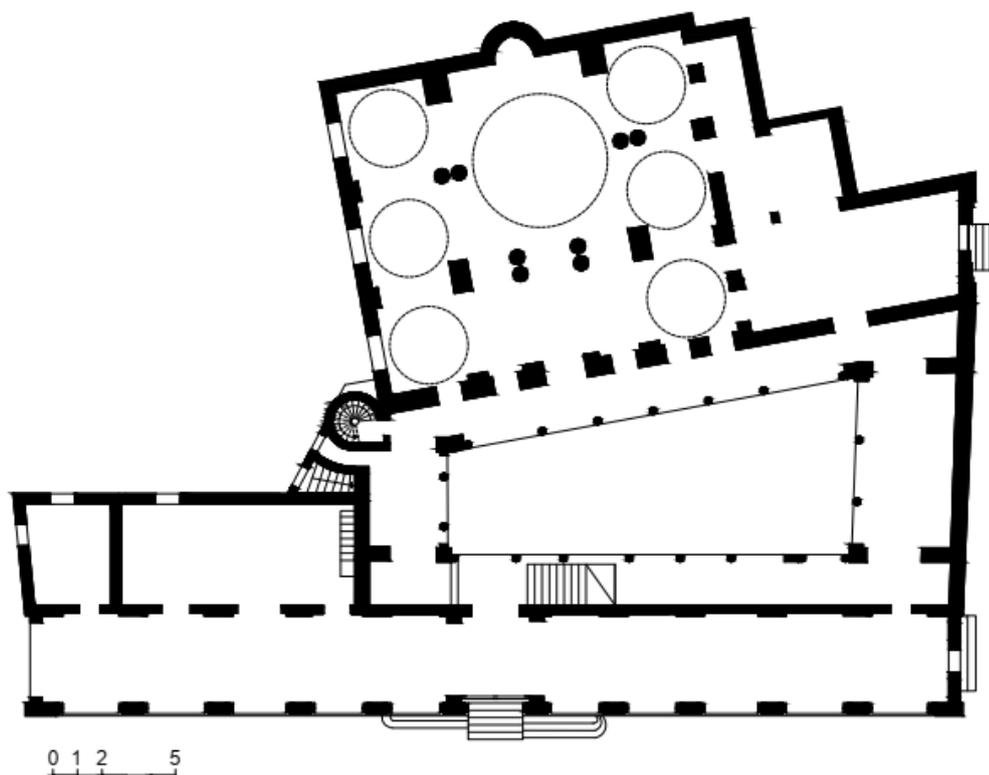


Figure 4.51. Plan de la mosquée du Bey, Annaba. (source : l'Association de la mosquée El-Bey)

4.6.2. CARACTERISTIQUES ARCHITECTURALES.

4.6.2.1. LA SALLE DE PRIERE.

Elle est aussi de type Ottoman (Golvin, L, 1985). Elle est de forme rectangulaire, mais proche du carré, d'une longueur de 14,50m par 12,75 m de largeur ; d'une superficie de 185 m². L'espace central est entourée par des galeries, d'une largeur de 3,41m chacune, et elles sont couvertes par deux dômes, avec un profil très surbaissé (Papier, 1890).

Douze colonnes jumelles, supportent le dôme (voir le plan). Elles sont réalisées en pierre tendre, avec une base et coiffées de chapiteaux, le tout, de la base au chapiteau, est

d'une hauteur de 3.28m (Papier, 1890 ; Golvin, 1985). Des piliers s'ajoutent aux colonnes pour supporter les arcs qui séparent la nef axiale des deux nefs latérales (Papier, 1890).

Au milieu de la galerie d'accès se trouve une tribune (figure 4.53). Elle est faite de solive en bois, peu élevée, vu la hauteur insignifiante du plancher (Papier, 1890). La tribune est supportée par quatre arcs doubles, supportés chacun par deux petites colonnes en bois, de section polygonale, peintes en rouge et vert, comme ces arcs doubleaux et le plafond de la tribune (Papier, 1890). Un petit balcon avec balustrade en bois, se détache de la tribune, au dessus et tout le long de la galerie d'accès. Un éclairage de provenance de la cour, illumine la galerie d'accès, par l'intermédiaire des quatre fenêtres basses et grillées (figure 4.53) (Papier, 1890).



Figure 4.52. La tribune au niveau de la salle de prière de la mosquée Saleh Bey, Annaba. (source : Benbella, Kh, 2008)

4.6.2.2. LA COUVERTURE.

La salle de prière cubique, est dotée d'une coupole centrale qui mesure 6,21m de diamètre et 4,10m de hauteur, posée sur un tambour carré, par l'intermédiaire de quatre pendentifs. L'espace central ; tel que définit par la coupole centrale, est entouré par trois galeries ; une sur chaque côté, au-dessus desquelles sont posées de petites coupoles, plus basses que la grande coupole centrale (Papier, 1890 ; Golvin, 1985). Le dôme offre un éclairage à la salle de prière, grâce aux huit petites fenêtres cintrées (Papier, 1890), dotée de claustras (figure 4.54).



Figure 4.53. Toiture de la mosquée de Saleh Bey, Annaba. (Source : Auteur, 2023)



Figure 4.54. l'intérieur de la coupole centrale et des coupolettes de la mosquée Saleh Bey avant les travaux de rénovation achevée en 2022. (Source : Auteur, 2023)

4.6.2.3. LE MIHRAB.

Il est placé au centre du mur de la qibla, en face, à l'entrée à la salle de prière. Il s'agit d'une niche sous forme d'un arc cintré, de 2,10m de diamètre, et d'une hauteur d'environ 3,00m (Papier, 1890). A son état initial, le mihrab de la mosquée été richement décoré ; ses murs été décorés par des carreaux de faïence de couleur blanche, avec une petite rosace bleue. Le même type de faïence est répliqué dans tout l'édifice (Papier, 1890). Après les derniers travaux de rénovation, le mihrab présente un décor différent, fait essentiellement de marbre blanc et vert, avec un ornement en plâtre au-dessus de l'arc. Les deux colonnettes supportant l'arc ont disparues.



Figure 4.55. Mihrab de la mosquée du Bey, Annaba, avant et après les travaux de rénovation : a) Avant (source : Benbella, Kh, 2008). b) Après. (Source : Auteur, 2023)

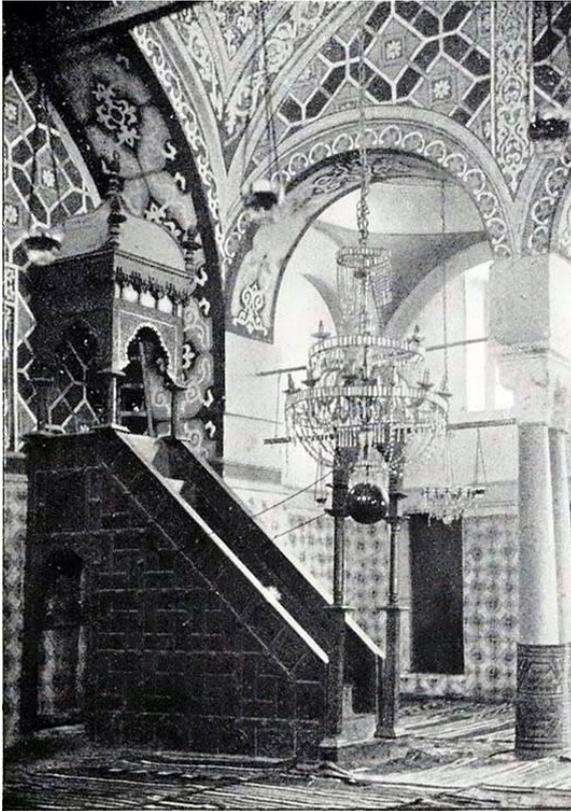
4.6.2.4. LE MINBAR.

A gauche du mihrab, se trouve un minbar en bois, peint en rouge et vert, de sorte qu'il attire l'attention des visiteurs (Papier, 1890). Quant à l'origine du minbar, Alexandre Papier hésitait dans son ouvrage entre deux hypothèses ; la première, suppose que le minbar a été offert par des riches de la ville de Bône. La deuxième suggère qu'il fut bien transporté de la mosquée Abi-Marouan, lors de sa transformation en hôpital militaire (Papier, 1890). Cette deuxième hypothèse ne semble pas valable, car la chaise de l'Imam ; qui paraît du même style que le minbar, contient une inscription indiquant le nom de Saleh Bey (figure 4.58).

4.6.2.5. LE MINARET.

Le minaret de la mosquée Saleh Bey est typiquement ottoman. Il est de forme ronde, avec une base carrée (figure 4.59), d'une circonférence de 5,65m (Golvin, L, 1985), comme décrit d'ailleurs par Alexandre Papier dans sa description de l'édifice (Papier, 1890).

Le minaret s'élève à l'angle nord-est, en dehors de la mosquée, avec une hauteur de 15,34m (Papier, 1890). Il est réalisé entièrement en pierre. Dans sa partie haute, le minaret se termine avec un pavillon circulaire en encorbellement (Papier, 1890 ; Golvin, L, 1985).



a. A l'époque coloniale. (Source : Papier, A, 1890)



b. Après la rénovation du 2022. (Source : auteur)

Figure 4.56. Le minbar de la mosquée Saleh Bey.



Figure 4.57. incscription sur la chaise de l'Imam contenant le nom du Bey « Saleh »



Figure 4.58. Minaret de la mosquée Saleh Bey, Annaba. (Source : Auteur, 2023)

4.6.3. TRANSFORMATION.

L'édifice a subi des transformations de deux ordres ; extension à l'extérieur, embellissement à l'intérieur. L'intérieur de l'édifice a bénéficié de travaux de décoration à partir de 1855. Il s'agit de dessins polychromes, qui couvrent toute la partie concave à l'intérieur de la coupole, ainsi que les arcs et les pendentifs supportant la coupole. Ces dessins furent l'œuvre du peintre décorateur du théâtre municipal ; *Abel de Pujol* (Papier, 1890). Après, au fil des années, la mosquée a perdu son charme, en couvrant toutes les décorations, et l'intérieur est devenu insignifiant et quelconque, caractérisé par une couche de peinture laquée (figure 4.53, figure 4.55, figure 4.56.a). En revanche, et durant les toutes dernières années, la mosquée avait bénéficiée d'une opération de rénovation ; pour regagner enfin son charme de l'époque, grâce aux initiatives de « l'Association de la mosquée El-Bey » (figure 4.56.b, figure 4.57.b, figure 4.58).

Une autre transformation opérée à l'époque coloniale française, qui consiste en la réalisation d'un portique devant la façade de la mosquée. Il a été conçu par M. Bicheron (inspecteur des bâtiments civils) et réalisé en 1852 ou 1853. A s'avère incertain de la date exacte de sa construction. Il est déambulatoire, de 39,57 mètre de longueur, et 3,60 mètre de largeur, comptant onze arcades, de type légèrement brisé, supportées par vingt et une colonnes en marbre. Enfin, une ligne de merlons découpés en lobes arrondies orne cette longue arcade (Papier, Al, 1890) (figure 4.60).



Figure 4.59. La façade principale de la mosquée Saleh Bey. (Source : Wyld et Lessore, 1835)

Un autre rajout à l'époque française, qui consiste à la réalisation d'une tour de forme carrée, à pans coupés, surmontée par un dôme surbaissé. Il s'agit bien d'un campanile, pour abriter une horloge. Elle est de cinq à six mètres de hauteur (Papier, 1890). Elle est de taille écrasante par rapport au portique, qui se montre élégant malgré la sobriété de sa décoration (Mazouz, F, 2015). D'après les références dont on dispose, l'édifice n'a pas subi de transformations touchant à la forme de la salle de prière, ni aux ouvertures de cette dernière.

4.7. LA MOSQUEE DE PACHA (BACHA) A ORAN.

La mosquée de Pacha (Djamâa Bacha) se situe à l'intersection de la rue Benamara et Boutkhal (ex rue Philip) (Lallemand, 1891 ; Arrar, 2014). Une très jolie mosquée précédée d'une cour en demi cercle, entourée par une galerie circulaire. Actuellement, elle est fermée depuis plusieurs années pour d'éventuels travaux de restauration. Il nous a été interdit d'accéder à l'intérieur de l'édifice.



Figure 4.60. La porte d'entrée de la mosquée de Pacha, Oran (source : à gauche : Lallemand, 1891, page 15 ; à droite photo prise par l'auteur, 2023)

4.7.1. DATE DE REALISATION.

Après la libération de la ville d'Oran de l'emprise des espagnoles ; en 1792 J-C (1207 A.H) par les ottomans, ces derniers ont procédé à la construction de Djamâa Bacha (mosquée Pacha) sous l'ordre de Hassan Pacha le Dey d'Alger (Benbella, 2008 ; Arrar, 2014). Elle se trouve à côté du palais rouge (réalisé par les marchands de Venise au moyen âge, et fut le siège des troupes espagnoles) (Benbella, 2008 ; Arrar, 2014). D'après la plaque en marbre au niveau de l'entrée, l'édifice fut achevé en 1796 J-C.



Figure 4.61. Inscriptions à l'entrée de la mosquée rapportant la date de réalisation de Djamâa Bacha (mosquée Pacha). (Source : Auteur, 2023).

4.7.2. CARACTERISTIQUES ARCHITECTURALES.

4.7.2.1. LA SALLE DE PRIERE.

La mosquée est actuellement fermée pour travaux de restauration. La description est faite sur la base de documents anciens, ainsi que la lecture du plan et des photos disponibles.

L'accès à la salle de prière, se fait à partir de la cour, par l'intermédiaire d'un volume cubique, couvert par une coupole ; de forme octogonale, donnant ainsi plus d'harmonie à la mosquée. Comme la majorité des mosquées présentées ultérieurement, la mosquée de Pacha d'Oran contient une salle de prière de forme carrée. Elle offre une grandeur spatiale, ressentie à travers l'emploi d'une double galerie autour d'un vaste espace central, qui est à son tour, couvert par un dôme géant. La salle de prière fait 28.60m*27.65m.

Au-dessous de la coupole centrale (dans l'espace principal de prière) se trouve le *Mahfil* ; au centre, dans l'axe de mihrab. Plus élevée que la salle de prière (+3.30 m), construit en bois coloré en jaune, vert et rouge. Le *Mahfil* repose sur quatre colonnettes en marbre, de forme octogonale, sculpté dans sa partie inférieure, et qui évolue en hélicoïdale en hauteur, jusqu'aux chapiteaux (Arrar, 2014).

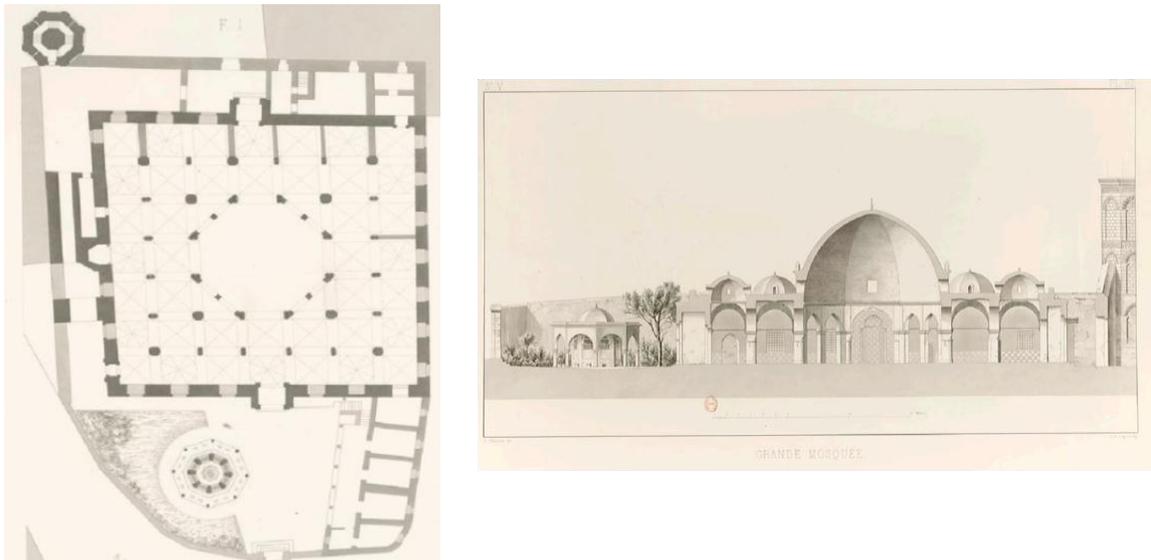


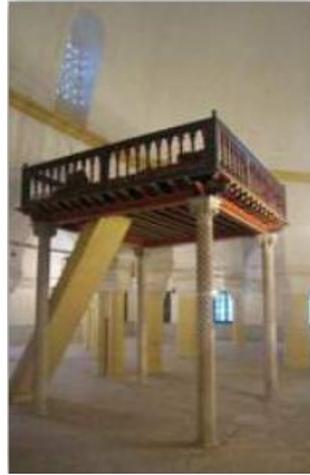
Figure 4.62. Plan et coupe sur la grande mosquée d'Oran (La mosquée de Pacha). (Source : Ravoisié Amable, 1846-1850)

La mosquée présente une salle hypostyle, avec sept travées dans les deux sens, formées par des colonnes jumelées, supportant des arcs en plein cintre, légèrement brisés. D'après Arrar. M(Arrar, 2014), il existe deux tunnels sous la salle de prière (de 3m de largeur et 5m de hauteur), plus exactement, à la première et la sixième travées perpendiculaires aux murs de la qibla (du Sud au Nord) (Arrar, 2014). D'après la même

référence, l'un pour le Bey, afin de lui assurer la sécurité en allant à la mosquée en provenance du palais rouge, et le deuxième n'est qu'un canal des eaux du ruisseau (Arrar, 2014).



a) Le Mihrab.



b) Le Mahfil.



c) Le Minbar.

Figure 4.63. L'intérieur de la mosquée d Pacha d'Oran. (Source : Auteur, 2023)

4.7.2.2. LA COUVERTURE.

Comme le reste des mosquées ottomanes en Algérie, la mosquée de Pacha ne fait pas l'exception. Selon le même style de mosquées Ottomanes réalisées en Algérie ; sa couverture est dominée par un dôme de forme polygonale, supporté par huit piliers et huit colonnes jumelées. Le passage de l'octogone de la coupole centrale au carré du plancher se fait selon le même principe employé à la mosquée Ali-Bitchine d'Alger, c'est-à-dire ; trois arcs au niveau de chaque angle, pour assurer le passage des efforts des charges. Une petite coupolette se forme dans le triangle créé par les trois arcs (figure 4.64)



Figure 4.64. Piliers et colonnes supportant la coupole centrale. (source : Benbella, 2008)

Les galeries (doublées) entourant la coupole centrale, sont couvertes par une alternance de coupolettes et de voutes croisées ; créant ainsi une légèreté spatiale renforcée par l'éclairage naturelle assuré par les petites ouvertures au niveau des coupolettes (4 ouvertures par coupolette). Le concepteur de l'édifice a pris le soin de choisir l'emplacement des coupolettes ; afin de structurer l'espace intérieur par la mise en valeur de l'axe de la qibla (voir le plan à la figure 4.63).

4.7.2.3. LE MINARET.

Lallemand décrit la mosquée comme « *assez curieuse* » grâce à la beauté de son minaret, qui se détache du corps principal de l'édifice. Sa forme est dans la continuité du développement du minaret ottoman au Maghreb (Algérie et Tunisie) (Lallemand, 1891). Semblable aux minarets de la mosquée du Bey (Annaba) et celui de la mosquée *Moubaïa* à Mascara, qui sont de forme octogonale. Mais il a plus de raffinement grâce à une composition obtenue par la superposition de trois volumes ; dont le dernier à une double hauteur. La séparation entre les trois volumes est assurée par une belle corniche dégradée. Malgré qu'il est en pierre ; le minaret ne donne pas l'impression de lourdeur, grâce à sa décoration par un traitement en arc festonné, avec par-dessus de la mosaïque en céramique. Le minaret termine par un balcon, doté d'un clocheton. Il gagne encore en élégance grâce à l'harmonie de ses proportions d'une hauteur homogène avec la hauteur de la salle de prière ; dont il est trois fois plus haut (Arrar, 2014).

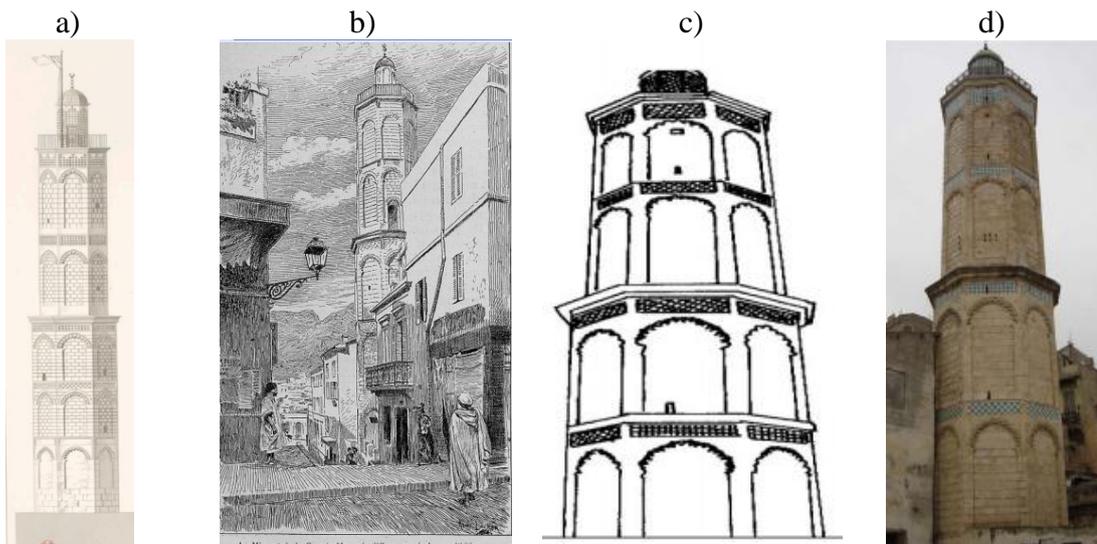


Figure 4.65. Minaret de la grande mosquée d'Oran. (sources : a&b : L'Ouest Algérien, par Lallemand. Ch, 189, c&d : Benbella, 2008)

4.7.2.4. LA DECORATION.

La décoration de la mosquée est très ponctuelle, mais originale à la fois. Elle est focalisée au niveau du mihrab, le minbar, en plus d'un joli traitement au niveau de l'entrée principale. Le reste de l'édifice est très sobre ; l'intérieur est blanchi à la chaux, au dessus d'un soubassement en carreaux de céramique.

La niche du mihrab ; de forme d'un demi polygone, est revêtue de deux types de céramique. Sa partie inférieure est couverte avec des carreaux de céramiques bleues ; il semble qu'elle n'est pas originale. La partie supérieure est plutôt revêtue avec des carreaux de céramiques polychromes, riche en motifs floraux et géométriques, dominée par le vert. La façade du mihrab est en arc outrepassé légèrement brisé, qui est supportée par deux jolies colonnettes identiques à celle supportant le *Mahfil*. Le minbar comme le *Mahfil* sont décorés et dominés par les couleurs rouge et vert.

La coupolette devant le mihrab est de forme polygonale, et son tambour octogonal est richement décoré avec les mêmes carreaux de céramiques qui ornent le mihrab. Les arrêtes entre les pans de la coupolette sont traitées avec un motif en zigzag en blanc et bleu.



Figure 4.66. Décoration en céramique polychrome au niveau de la coupole centrale.
(Source : Auteur, 2023)



Figure 4.67. Décoration au niveau du vestibule précédent la salle de prière. (Source : Auteur, 2023)

4.7.3. TRANSFORMATIONS.

La mosquée est fermée depuis plusieurs années vu son état critique. Mais il semble que la mosquée n'a pas subi de transformations, et garde son authenticité (Arrar, 2014). Elle a été classée monument historique en 06 aout 1952. Une étude de restauration a été lancée au courant de l'année 2010, mais les travaux tardent à commencer (Mazouz, F, 2015).

4.8. LA MOSQUEE DU DEY A ALGER.

Cette grande et jolie mosquée se trouvait à l'intérieur de la citadelle. Au moment de l'entame de cette thèse, la mosquée était fermée pour travaux de restauration. Elle a été ouverte très récemment au public.

4.8.1. DATE DE REALISATION.

Cette mosquée fut construite vers 1234/1818-1819, par Hussain Pacha, Khotba (Devoulx, 1870 ; Driouèche, 2001). Elle est la seule inspirée de l'art ottoman, parmi les deux mosquées à l'intérieur de la citadelle. Elle est fort semblable à la mosquée Ali-Bitchine.

4.8.2. CARACTERISTIQUES ARCHITECTURALES.

4.8.2.1. LA SALLE DE PRIERE.

La salle de prière de la mosquée est dotée d'une très belle coupole centrale, avec un *Mahfil* (estrade) en-dessous. De jolies colonnes engagées en marbre, s'élançant à l'intérieur ; donnant ainsi une grandeur à l'intérieur grâce à leurs hauteurs coiffées de chapiteaux toscans. Les futs sont torsadés en spirales contrariées, reliées par des arcs outrepassés et des tirants en bois (Devoulx, A, 1870). L'aspect proportionnel, de l'ensemble de la salle de prière, produit un effet original (Devoulx, A, 1870).

4.8.2.2. COUVERTURE.

Une coupole centrale, de forme octogonale, reposant sur des pendentifs. Ces derniers sont supportés par trois arcs ; définissant ainsi des triangles sphériques ; en reprise du même système constructif constaté dans les deux mosquées, Ali-Bitchine à Alger, et *Moubaïa* à Mascara. La coupole est posée sur un carré presque régulier de 10.30 par 10.20m, avec une hauteur de 05.50m, de profil proche du plein cintre, avec un petit oculus au sommet (Driouèche, 2001).

Elle est dotée de quatre ouvertures ajourées, mesurant (0.80*0.40m). présentant une amélioration par rapport à la mosquée Ali-Bitchine, grâce à plusieurs lits de briques pour éviter les infiltrations à l'intérieur (Driouèche, 2001).

Contairement à la mosquée Ketchaoua, et la mosquée Ali-Bitchine, la coupole centrale est entourée par quatre galeries (comme à la mosquée de Mascara). A chaque extrémité se trouve une petite coupolette octogonale, avec un profil brisé, et dépourvue d'ouvertures (Driouèche, 2001). Elles sont de tailles différentes, comme à la mosquée Ali-Bitchine. En fait, elles présentent un rapport d'un tiers (1/3) du diamètre de la coupole (03.20m à 03.30m de diamètre, et de 1.55m à 1.70m de hauteur). Comme elles sont liées avec les pendentifs par l'intermédiaire d'une corniche (Driouèche, 2001). L'une des cinq coupolettes se trouve au dessus du mihrab. En matière de décoration, la mosquée est dépourvue de toutes formes de décoration.

4.8.3. TRANSFORMATIONS.

Dévoulx et Koums n'évoquaient aucune transformation. La mosquée a bénéficié de travaux de restauration en 2001 (Driouèche, 2001), puis en 2015.

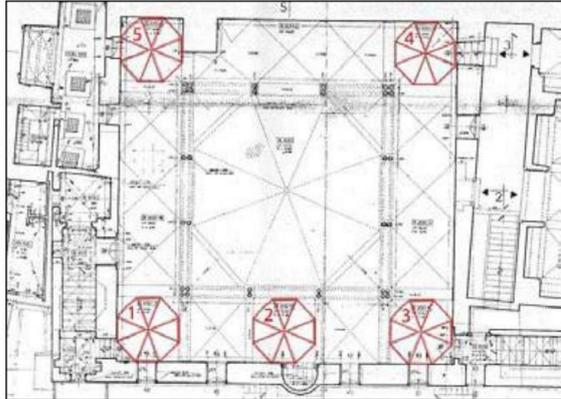


Figure 4.68. Plan de la mosquée du Dey. (Source : Driouèche, 2001)

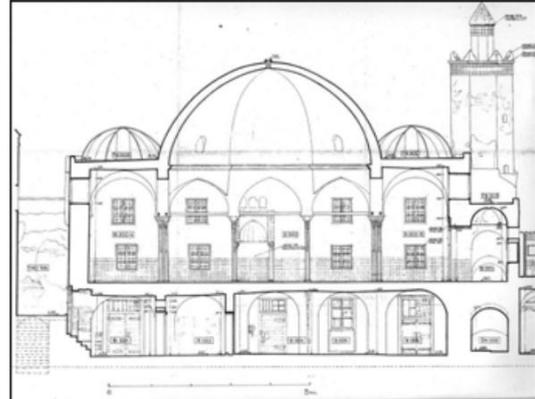


Figure 4.69. Coupe sur la mosquée du Dey d'Alger. (Source : Driouèche, 2001)



Figure 4.70. Travaux de restauration de la mosquée du Dey à la citadelle, Casbah d'Alger. (Source : Driouèche, 2001)

CONCLUSION.

A partir de la lecture des différents documents, et après la visite des différentes mosquées (Alger, Annaba, Constantine, Oran, Mazouna, Mascara) ; on peut conclure ce qui suit :

- Certaines mosquées avaient gardé un cachet architectural authentique, avec très peu de modifications. Ces modifications concernent essentiellement les matériaux de revêtements.
- Les mosquées sont souvent de forme carrée, caractérisée par une symétrie.
- Toutes les mosquées sont caractérisées par une grande coupole centrale, de forme octogonale, hormis la mosquée la pêcheurie (Jamâa Djedid), dont la coupole est de taille relativement petite par rapport à la taille de la salle de prière ; comme elle est plus pointue (forme ovoïde) avec un tracé circulaire.
- Les revêtements d'intérieur sont très similaires. Souvent un soubassement en faïence couvrant la partie basse des trois murs de la salle de prière. Le quatrième mur ; étant le mur de la qibla, est souvent plus riche en décoration ; faite principalement de faïence de même motif. Le reste de la salle de prière (des murs) est recouvert de chaux, de couleur blanche.
- La coupole centrale souvent entourée par une à deux galeries (selon la taille de la coupole), souvent sur ses trois cotés.
- Grâce aux travaux de restaurations opérées durant les années 2000, la majorité des mosquées d'Alger ont repris leur aspect original. La mosquée de Pacha d'Oran reste fermée jusqu'à achèvement des travaux. La mosquée du Bey à Annaba, a été récemment ré-ouverte au public, après les opérations de rénovation entreprise par une association locale.
- Toutefois, à la mosquée Ali-Bitchine, la décoration qui couvre la partie haute des murs intérieurs ; précisément les coupolettes, semble étrangère, à l'état initial du bâtiment. Autrement ; les mosquées ottomanes en Turquie, offrent un riche décor en plâtre, sur la face intérieure de la coupole centrale et des coupolettes.
- La décoration dans les différentes mosquées vient mettre en valeur le mihrab, le minbar et la coupole centrale. La décoration est souvent une combinaison de carreaux de faïences polychrome alternés avec des bandes en plâtre, richement décorées

Chapitre V. METHODOLOGIE D'APPROCHE

INTRODUCTION.

Le choix des méthodes et des techniques de recherche doit en premier lieu répondre à la question de recherche, et en deuxième lieu doit être soumis aux critères de faisabilité ; c'est-à-dire le temps alloués à cette recherche, le matériel scientifique disponible et/ou à acquérir selon le budget offert. Ainsi la prise en compte des déplacements vers les différents édifices constituant le corpus d'étude.

Le présent chapitre vise une approche méthodologique permettant une évaluation objective de l'environnement sonore des lieux de culte. Cette approche devrait permettre la comparaison des résultats de cette recherche avec les études antérieures.

En fait, le domaine de l'acoustique est riche en méthodes de calculs des différents paramètres acoustiques. Elles peuvent être réparties en deux catégories, en rapport avec le champ d'application. Autrement dit, il y a des méthodes utilisées en amont et d'autres en aval ; des méthodes avant la construction de l'édifice ; appelées méthodes de prédiction, permettant de calculer les différents paramètres acoustiques, essentiellement le temps de réverbération. Et des méthodes de calcul in-situ, destinés aux bâtiments existants.

5.1. METHODES DE PREDICTION.

Pendant des siècles, les théoriciens ont étudié le domaine de l'acoustique, pour pouvoir prédire le comportement du son dans les espaces architecturaux clos et ouverts (Karabiber, 2002 ; Kleiner, 2010) (voir chapitre 1). Le dernier siècle ; étant le siècle des sciences modernes ; a connu l'avènement de l'Acoustique moderne. Aujourd'hui, les chercheurs disposent de méthodes plus pointues pour une meilleure prédiction du comportement du son. A cet effet, il y a des méthodes mathématiques, basées sur des formules permettant de quantifier les paramètres acoustiques (en particulier le temps de réverbération). D'autres méthodes sont plutôt géométriques.

Ces méthodes de prédiction du son dans les espaces architecturaux peuvent présenter certaines limites et/ou certaines nuances ; à cause de la difficulté de prendre en charge tous les détails susceptibles d'impacter l'environnement sonore ; comme elles nécessitent un temps assez long pour terminer les calculs, ce qui risque d'engendrer des erreurs.

A partir de la fin du siècle dernier, beaucoup de ces méthodes ont été simplifiées en simulations numériques, donnant naissance ainsi à des logiciels de simulation ; dont certains s'avèrent très puissants comme ODEON et CATT-Acoustic. Un bref exposé de ces méthodes mathématiques et géométriques sera présenté ci-dessous.

5.1.1. METHODES MATHÉMATIQUES.

Il a été mentionné dans le premier chapitre l'existence de plusieurs formules pour prédire le temps de réverbération d'une salle. Très souvent les chercheurs se réfèrent à la formule de Wallace-C Sabine, qui a fait preuve d'utilité de par sa simplicité et ses valeurs les plus conformes aux mesures réalisées in-situ. Pourtant il existe plusieurs autres formules qui ont été développées par des chercheurs dans le but de prédire essentiellement le temps de réverbération.

Il serait impossible de revenir, dans ce travail de thèse, sur toutes les formules qui traitent de l'acoustique vu leur nombre important, toutefois nous rappellerons ces différentes références bibliographiques liées aux différentes méthodes de calcul.

La première formule à évoquer est celle développée par Sabine W.C en 1900. Après avoir étudié plusieurs amphithéâtres, Sabine conclut que la durée du temps résiduel d'une salle est très peu liée à la position de l'auditeur par rapport à la source (Bouty et Sabine, 1901). Donc, elle est plutôt dépendante du volume de la salle, ainsi que de la capacité d'absorption des différents matériaux d'objets contenus dans la salle (murs, plafond, ameublement, fenêtres, ...etc) ; dont il définit un coefficient d'absorption α .

$$T_{60}=0.161V/A$$

Sabine étant précurseur, il sera vite poursuivi par d'autres chercheurs (Franklin en 1903, Jaeger en 1911, Buckingham en 1925, Shuster et Waetzmann en 1929, Eyring en 1930) puis, plus récemment Prodi en 2001, Beranek en 2006. Chacun essayait de proposer des alternatives à la formule de Sabine ; qui est jugée comme excessive dans les salles à forte absorption, et peu adéquate aux salles de géométrie complexe, caractérisées par

plusieurs sous-espaces interconnectés (*coupled rooms*) (Xiang, 2020). En fait, Sabine avait établi sa formule en analysant des amphithéâtres ; il n'avait pas préconisé dans son corpus des salles aux formes plus complexes, telles que les églises.

L'une de ces formules aura plus de succès que les autres ; c'est la formule de *Eyring* en 1930 (Xiang, 2020). La différence fondamentale entre les deux formules réside dans le fait que Sabine considère que les ondes sonores arrivent aux surfaces de manière successive (l'une après l'autre), alors que *Eyring* considère que les ondes sonores arrivent aux surfaces en même moment ; de manière simultanée (Beranek, L.L, 2006). Alors que les deux assument que le son se propage de la même manière au niveau de toutes les fréquences (Beranek, 2006 ; Xiang, 2020). Depuis l'apparition de ces deux formules, beaucoup de travaux de recherches ont tenté la comparaison entre elles pour convenir laquelle entre les deux est la plus proche de la réalité (Carvalho en 1995 ; Magrini et Ricciardi en 2001 ; Beranek en 2006).

$$T_{60}=0.161V/(A'+4mV) \quad s \text{ (Beranek, 2006)}$$

Avec :

$$A'=S_{tot}[-2.30\log_{10}(1-\alpha_{ey})] \quad m^2$$

$$Et ; \alpha_{ey}=(\alpha_t'S_t + \alpha_r'S_r + \sum\alpha_i'S_i)/S_{tot}$$

Les chercheurs s'accordent sur l'inefficacité des méthodes appliquées pour prédire l'acoustique (essentiellement le Temps de Réverbération) dans tous les espaces ; car elles ont été validées pour le cas des salles de concerts et théâtres, elles ne sont pas forcément valables pour les espaces de prière (Magrini et al, 2001). Néanmoins, ces méthodes permettent un rapprochement de la réalité, ce qui réduit les risques d'une mauvaise qualité acoustique en phase de conception. Tandis que Beranek (Beranek, 2006) identifiait certaines recommandations en appliquant la formule de Sabine sur les salles de concerts. Carvalho propose une modification de la formule, comme réponse aux divergences constatées entre mesures obtenues *in-situ* et résultats de calcul des deux formules sur les 41 églises étudiées dans son cas d'étude (Carvalho, 1995). Dans les années 1990, *Gade* a testé 32 salles de concerts. A partir de cela, il a donné des **formules de régression linéaire empirique** pour prédire les paramètres acoustiques avec T expérimental (Magrini et al, 2001).

Conformément à Prodi (Prodi et al, 2001), la prédiction du temps de réverbération pour les mosquées nécessite un développement d'outils (formules) appropriés, car la comparaison entre la prédiction par les formules existantes (*Sabines, Eyring*) et les mesures *in-situ*, montre que les formules de prédiction surestiment le temps de réverbération en basses fréquences (125Hz, 250Hz). Avec un rapprochement des valeurs à partir de 500Hz (Prodi et al, 2001).

5.1.2. METHODES GEOMETRIQUES.

Dans le domaine de l'acoustique architecturale les spécialistes utilisent parfois ; les méthodes de l'optique ; utilisées pour l'étude d'éclairage, pour prédire le comportement des ondes sonores (Kleiner et al, 2010). Deux méthodes sont combinées afin de prédire l'environnement sonore d'une salle ; à savoir, la méthode de l'image miroir et la méthode du traçage du rayon (*Ray tracing*) (Kleiner et al, 2010).

La méthode « tracé rayon » consiste à projeter la trajectoire possible du rayon sonore, ensuite la suivre (suivre son parcours) jusqu'à perte totale de l'énergie sonore. La méthode image miroir consiste à assumer l'effet miroir des parois réfléchissantes ; c'est-à-dire que les parois reflètent le son avec le même angle d'incidence ; comme un reflet parfait du miroir (figure 5.1) (Kleiner et al, 2010); quelque soit le matériau utilisé. La figure ci-dessous illustre l'arrivée des différents rayons (directs, réflexions précoces et réflexions tardives) sur le récepteur.

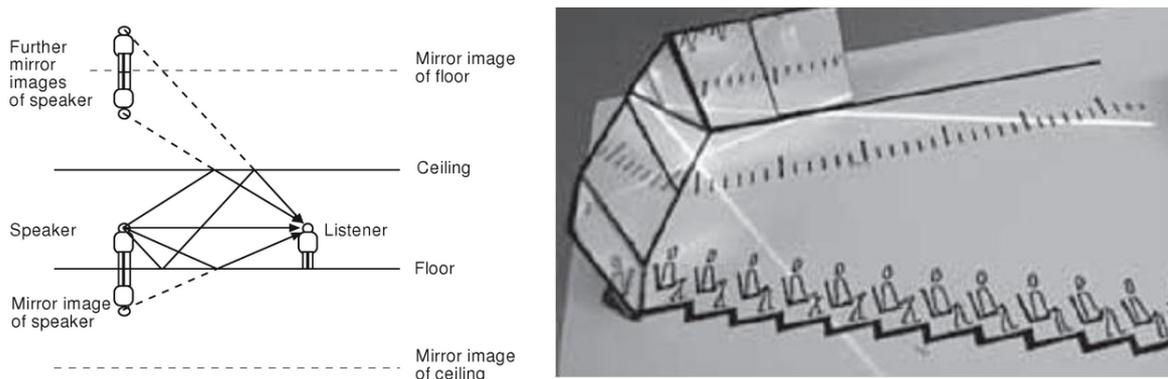


Figure 5.1. Réflexion des ondes sonores par les surfaces dans une salle : Effet miroir. (source : Kleiner et al, 2010)

Pour la méthode image miroir il fut distinguer deux situations; la première quand les surfaces sont courbes. Dans ce cas il faut opter pour une subdivision des ces surfaces

courbes en petites surfaces plates, et ensuite entamer l'analyser en assumant que les surfaces sont plus larges que la longueur d'onde. En fait, c'est la manière avec laquelle fonctionnent les logiciels de simulations ; en utilisant la méthode du traçage du rayon (*Ray tracing*), qui nécessitent le remplacement des surfaces curvilignes en petites surfaces, au moment de modélisation, pour pouvoir ensuite simuler le comportement du son (à l'intérieur comme à l'extérieur) (Christoffer et al, 2001 ; Weitze et al, 2002 ; Topaktaş, 2003, Kleiner et al, 2010). Pour les surfaces rugueuses, il faut subdiviser l'énergie du rayon incident et supposer qu'elle est distribuée dans différentes directions sous forme de nouveaux rayons, chacun transportant une fraction de l'énergie du rayon original.

La méthode du tracé rayon ou traçage du rayon (*Ray tracing*) présente un moyen indispensable pour prévoir le comportement d'un son émet par une source (unidirectionnelle ou omnidirectionnelle) dans un espace (clos ou ouvert) (Kleiner et al, 2010). Cependant cette méthode engendre un déficit en matière de nombre de réflexions (directes, précoces, tardives) sur l'ensemble des surfaces, en provenance de tous les récepteurs dans l'espace à étudier ; surtout dans le cas des formes complexes telles que les mosquées. En revanche, cette méthode est rendue accessible grâce aux logiciels de simulations capables d'assurer des opérations complexes de calcul, en un temps relativement court.

Les logiciels de simulation de l'acoustique (*CATT-acoustics*, *ODEON*) lance un grand nombre de rayons pour avoir une description plus réaliste de l'environnement sonore dans un espace précis. Kleiner recommande un nombre de rayons ; d'une seule source, allant de 1000 jusqu'à 1000.000 de rayons, relativement la complexité de l'espace à étudier (Kleiner et al, 2010). Cependant ; accorder un grand nombre de rayons risque d'imposer un lent temps de simulation ; alors ceci est justifié pour avoir des résultats identiques à la réalité (mesures in-situ). Pour confirmer cette hypothèse ; un groupe de spécialistes (Christoffer et al, 2001 ; Vigeant et al, 2006) ont procédé à la comparaison des résultats obtenus entre des mesures in-situ et des simulations numériques (avec des résolutions différentes et un nombre de rayons différents). L'étude avait comme objet deux mosquées ottomanes (Sokullu et Suleymaniye) et une église (Sainte Irène). Les résultats de cette recherche prouvent qu'un nombre de rayons proche de 1000 (1000 et plus) est en faveur de résultats enregistrés *in-situ*. Alors la marge d'erreur est de paire avec l'augmentation du nombre de rayon (vers 100.000 rayons). L'étude suppose que les formes curvilignes (coupes, coupolles) sont à l'origine des erreurs lors de l'augmentation du nombre de rayons (Christoffer et al, 2001 ; Weitze et al, 2002).

A l'heure actuelle, et en l'absence de méthodes spécifiques aux mosquées, il s'avère que la formule de Sabine reste le seul moyen de procéder à l'étude surtout lorsqu'il est question de calcul en amont (phase de conception) ; cependant, il reste souhaitable de réaliser des mesures *in-situ* dans le cas des édifices existants, ce qui est le cas des monuments historiques (Prodi et al, 2001 ; Long, 2005 ; Beranek, 2006 ; Kleiner, 2010).

5.2. METHODES D'ANALYSE DES ENVIRONNEMENTS SONORES DANS LES ESPACES FERMES.

Comme il a été évoqué plus haut, jusqu'au jour d'aujourd'hui il n'existe toujours pas de méthodes de prédictions du temps de réverbération propres aux mosquées ; ils n'existent pas, non plus, de modèles d'analyse des environnements sonores propres aux mosquées et de manière générale pour les lieux de culte.

Cependant les méthodes existantes traitent exclusivement les lieux de concert (Engel et Kosala, 2004 ; Long, 2005). L'objectif de ces méthodes est d'établir une corrélation entre les évaluations subjectives avec des mesures objectives des différents paramètres acoustiques ; afin d'optimiser le temps et les efforts alloués aux mesures et à l'évaluation (Long, 2005).

Depuis 1962, une volonté exprimée, avec les travaux de Beranek (révisés en 1992 et 1996), M. Barron (1973) puis M. Barron et Lee (1988), et M. Barron (1993) Hawkes et Douglas (1971), Cremer et Muller (1982), Ando (1985) ; afin d'objectiver le subjectifs par la définition d'attributs (dimensions) capables d'interpréter les attentes des utilisateurs profanes (audiences) et spécialistes (musiciens) en indicateurs mesurables (paramètres acoustiques). Cette volonté est ressentie depuis la publication en 1962 de la méthode de Beranek ; dans laquelle le théoricien déterminait huit attributs à savoir ; **l'espace est intime, vivace, chaleureux, intensité du son direct, intensité du son réverbérant, équilibre et mélange, diffusion** et enfin **se sentir en groupe** (Long, 2005).

Quant à Hawkes et Douglas (1971), cinq dimensions (paramètres) ont été définies au début ; à savoir ; **clarté, réverbération, enveloppement, intimité, et intensité**, auxquels d'autres paramètres ont été rajoutés plus tard. Alors que Wilkens et Plenge (1974) se sont limités à trois attributs à savoir ; **l'intensité, la définition et l'appréciation** (Long, 2005). Ando (1985) avait proposé une méthode plus complète, car il propose quatre attributs ;

intensité (niveau d'écoute), réverbération, enveloppement (IACC) et clarté, avec un développement d'une méthode de calcul de ces attributs (Long, 2005).

Avec le temps ; il est possible de constater un rapprochement entre les différentes méthodes en matières d'attributs, dont le meilleur exemple est la contribution de Beranek en 1996, à la proposition de Ando en rajoutant deux attributs de son ancienne liste (proposé en 1962), à savoir ; **la chaleur (*warmth*)** exprimée « *Bass Ratio (BR)* » et **la diffusion** ; exprimée en « *Surface Diffusivity Index (SDI)* » (Long, 2005).

La difficulté de l'objectivation des perceptions subjectives est confirmée par la nécessité d'allouer un temps considérable pour établir une méthode d'évaluation, car l'approche nécessite l'étude acoustique de plusieurs bâtiments (par exemple Beranek avait étudié plus d'une cinquantaine de salles de concerts) avec des révisions des résultats après les avoir testés dans d'autres édifices du même type, et/ou d'autres auditeurs (Engel et Kosala, 2004). La méthode de Beranek ne pourrait être appliquée que sur les bâtiments existants ; alors celle de Ando est applicable à la fois sur les bâtiments existants et/ou en voie de conception (Engel et Kosala, 2004).

5.3. MODELE D'ANALYSE DES ENVIRONNEMENTS SONORES DES LIEUX DE CULTES.

A partir des méthodes précédemment présentées, d'autres chercheurs (Carvalho, 1994a, 1994b, Galindo et al, 1999) ont tenté de développer des méthodes spécifiques aux églises. En fait, Carvalho avait validé sa méthode après avoir étudié 41 églises portugaises, en définissant ainsi des formules prédictives pour évaluer les paramètres acoustiques sur la base des informations architecturales (Magrini et al, 2001). Galindo quant à lui s'est limité uniquement à six églises espagnoles (Magrini et al, 2001).

La présentation de ces méthodes n'a pas comme objectif de les appliquer sur notre cas d'étude, mais essentiellement de vérifier si ces méthodes ont prouvé leurs pertinences dans le cas des bâtiments auxquels elles ont été formulées. La réponse est dans les conclusions du travail de Magrini et Ricciardo (Magrini et al, 2001) qui avaient tenté d'appliquer ces deux méthodes et la méthode de Barron (1973, 1988) sur dix églises italiennes dans lesquelles des mesures des paramètres acoustiques ont été déjà élaborés (Magrini et al, 2001).

Les résultats prouvent l'existence de certaines similitudes mais de manière incomplète ; les valeurs de clarté (C_{80}) mesurées *in-situ*, ont été peu similaires avec les valeurs calculées, malgré la présence de quelques valeurs proches (Magrini et al, 2001). Les chercheurs renvoient ces divergences aux caractères architecturaux des églises ; en fait, la présence des coupes, colonnes, piliers, arcs et des détails en reliefs peuvent entraver les ondes sonores en changeant leurs parcours (Magrini et al, 2001).

Une autre étude venait proposer une nouvelle méthode spécifique aux églises et synagogues. Elle a été proposée par Engel et al (Engel et Kosała, 2004). D'après les auteurs de cette étude ; la méthode ne peut être appliquée que pour les églises (catholiques et évangéliques) et les Synagogues. La méthode permet l'analyse de volumes d'églises et synagogues ayant des volumes acoustiques compris entre 600 m^3 et 40000 m^3 . De même, il faut corriger le temps de réverbération des espaces à étudier et l'amener à moins de 7 secondes (Engel et Kosała, 2004). Et enfin elle est plus adaptée aux édifices présentant une forme unique, sans beaucoup d'articulations et/ou toiture en coupes (complexes) ; ce qui est, souvent très rare dans les églises datant de plusieurs siècles (Engel et Kosała, 2004). Cette méthode semble prometteuse d'un point de vue théorique, car il n'y a pas de travaux qui l'ont adopté, alors plusieurs chercheurs continuent à se référer à Beranek, Barron et à Ando. De ce fait, il n'est pas surprenant de constater qu'il n'existe pas de méthode spécifique aux lieux de culte en général, et spécifiquement pour les mosquées.

En dépit, de ces méthodes citées ; d'après Engel, il est possible d'utiliser les méthodes classiques ; en mesurant le temps de réverbération, l'uniformité de l'intensité et le niveau des perturbations externes (Engel et Kosała, 2004), en utilisant les méthodes applicables à l'acoustique du bâtiment à savoir la méthode RASTI³ (*Rapid Speech Transmission Index*) et la méthode de réponse impulsionnelle⁴.

³ *Rapid Speech Transmission Index*) est basée sur le lien entre la fonction de transmission de la modulation du système et l'intelligibilité de la parole. L'indice RASTI et l'évaluation subjective de l'intelligibilité de la parole sont liés par des formulations correspondantes.

⁴ Tandis que la méthode de réponse impulsionnelle est basée sur la détermination de la réponse impulsionnelle de l'intérieur de la salle suivie du calcul des paramètres essentiels à la performance acoustique de cet intérieur ; tels que le temps de réverbération, l'expressivité, l'indice d'expressivité, le temps de décroissance précoce.

5.4. MODELES D'ANALYSE POUR L'ACOUSTIQUE DES MOSQUEES.

Afin d'évaluer la qualité acoustique des mosquées ; objet de cette étude, il est impératif de collecter des données quantifiables. Le premier chapitre a été consacré aux définitions des paramètres les plus pertinents dans l'évaluation de la qualité acoustique. Les chapitres précédents nous ont permis de prendre position vis-à-vis des approches antérieures. Malgré l'inexistence de modèles d'analyse consacrés à l'environnement acoustique des mosquées ; il est possible de s'inspirer des travaux précédents ; pour identifier une méthodologie compatible avec le cas de cette recherche.

Se référer aux techniques utilisées par les chercheurs dans les différentes publications consacrées aux mosquées ; permettra d'établir une démarche objective pour évaluer l'acoustique des mosquées Ottomanes en Algérie (entre 16^{ème} et 19^{ème} siècle).

Il est possible de synthétiser les approches d'analyse de l'acoustique en distinguant trois pistes ; la première consiste à évaluer subjectivement l'acoustique d'une salle ; il s'agit de la technique d'Enquête, destinée aux usagers des lieux de culte afin de comprendre les préférences des usagers en termes de réverbération. Parmi les travaux dans lesquels cette technique a été utilisée, il y a : le projet CAHRISMA (*Conservation of the Acoustical Heritage by the Revival and Identification of the Sinan's Mosques Acoustics*). Les auteurs avaient posé des questions à 60 personnes réparties en deux groupes de 30 personnes ; un groupe de musulmans habitués à la lecture du coran, et un deuxième groupe de non-musulmans (Vallet et al, 2002). Le but était de comparer entre les résultats de chacun des deux groupes ; pour ensuite comparer les deux groupes de religions différentes.

Relativement à la différence de compréhension du message vocal (Coran), l'ambiance sonore peut être appréciée différemment. L'article tentait d'évaluer l'**intelligibilité** et la **clarté** de la parole, de même pour l'**intensité du son** (Vallet et al, 2002). D'autres chercheurs ont aussi utilisé la technique du questionnaire dans des publications plus récentes ; à l'exemple de Elkhateeb (Elkhateeb et al, 2016), Yilmazer et Acun (Yilmazer et Acun, 2018). Le point commun entre ces publications c'est l'intention d'évaluer l'**intelligibilité de la parole**. La technique du questionnaire est jugée très utile, cependant, elle n'est jamais utilisée seule ; sans avoir des mesures *in-situ* et/ou les simulations, pour d'éventuelles comparaisons.

Les deux autres pistes de techniques de recherches pour l'évaluation des

environnements sonores dans les espaces clos sont les mesures *in-situ* et la simulation. Chacune des deux techniques est largement utilisées, vu les avantages qu'elle présente. En revanche elles présentent aussi certaines limites et/ou inconvénients. C'est pour cette raison, que les chercheurs ont recours à l'une des deux, ou parfois les deux à la fois, selon les conditions de la recherche entreprise : Christoffer en 2001 ; Weitze en 2002 ; Prodi en 2003 ; Elkhateeb en 2016, Zühre en 2016. D'autres chercheurs ont combiné les trois techniques de recherche pour une évaluation à la fois quantitative et qualitative ; à l'exemple de Yilmazer et Acun en 2018.

Le choix de l'utilisation d'une seule technique de recherche, ou de combiner deux à trois techniques est en fonction des objectifs de la recherche. Il est évident que les mesures *in-situ* est la meilleure technique pour évaluer l'acoustique d'un espace existant. Les simulations permettent l'investigation de situation virtuelles ; dans le passé, pour restituer un état ultérieur d'un monument historique, ou se projeter le temps (future) pour anticiper des scénarios difficiles à imaginer ; comme simuler des situations différentes d'occupation d'espace, ou en cas de corrections acoustiques en apportant des modifications, et/ou pour un édifice qui n'est pas encore réalisé (en phase de conception). Quant à la technique d'enquête, elle permet une évaluation qualitative auprès des usagers de l'espace, ce qui est nécessaire pour mieux interpréter les valeurs numériques obtenues à partir des mesures *in-situ* ou des simulations numériques.

5.5. PROTOCOLE D'INVESTIGATION.

Pour rappel cette recherche tente d'explorer de manière globale l'acoustique des mosquées ottomanes en Algérie, construite entre le 16^{ème} et le 19^{ème} siècle, reflétant un style ottoman bien prononcé. Pour atteindre cet objectif il est envisagé de réaliser des mesures *in-situ* afin de les comparer avec les résultats de mosquées ottomanes en Turquie ou dans d'autres régions (Egypte, Albanie, Tunisie...etc) en réponse à l'hypothèse 1. La simulation par calcul numérique ou par ordinateur s'avère nécessaire pour évaluer l'environnement sonore en situation d'occupation. En fait, il n'existe pas encore des coefficients d'absorption (entre 0 et 1) pour simuler des individus dans la mosquée (debout, prosterné, assis sur genoux).

Et enfin, la technique d'enquête par questionnaire semble s'imposer en réponse au manque de modèle d'analyse spécifique aux mosquées. Il faut pouvoir se positionner par

rapport aux valeurs optimales du temps de réverbération proposées par Kayili (Kayili, 2005). Un grand nombre de publications recommandent un temps de réverbération plus long (Baumann et al, 2008 ; Fausti et al, 2003, Kayili, 2005 et Elkhateeb, 2015, 2016, 2021). Le recours à la technique d'enquête par questionnaire nous permettra la confirmation de cette orientation, avec des usagers locaux.

Pour établir le protocole d'investigation il est important de préciser :

- Les paramètres acoustiques à étudier.
- Le corpus d'étude (chapitre3).
- Mesures *in-situ* : Le matériel à utiliser pour la campagne de mesures (source de son, microphones, carte son, logiciel pour émettre le signal et pour enregistrer la réponse impulsionnelle de la salle, ainsi que la position des sources et des récepteurs.
- Choix de logiciel de simulation.
- Conception du questionnaire.

5.5.1. LES PARAMETRES ACOUSTIQUES A ETUDIER.

Pour identifier les paramètres acoustiques à évaluer dans cette étude, il fallait comparer entre les publications scientifiques ayant traité l'acoustique des mosquées. Cette comparaison a été faite avec la prise en compte de l'évolution dans le temps, car les techniques de recherche et surtout les logiciels de simulation se développent continuellement durant les vingt dernières années.

A partir de la lecture des recherches précédentes (Vallet, Karabiber, et Prodi) réalisés dans le cadre du projet CAHRISMA, ainsi que Kayili, El-Khateeb, Zühre Sü Gül, il est possible d'identifier les paramètres acoustiques à étudier.

- Le temps de réverbération (T) : dans tous les travaux le paramètre le plus discuté et étudié est le temps de réverbération.
- Le volume par personne (V_n/per) : il est plutôt lié au temps de réverbération. En raison de son rapport au volume ; le temps de réverbération est indirectement lié au volume par personne.
- L'Index de transmission du son (STI) : relativement aux principales activités dans la mosquée, l'évaluation de l'intelligibilité de la parole est plus qu'indispensable.

- La clarté (C_{50}) : certains travaux ont étudié la clarté (C_{50}) car elle apporte des informations sur la clarté du discours. Tandis que la clarté (C_{80}) n'a pas été étudiée car c'est une mesure liée plus à la musique.
- La définition (D_{50}) : quoiqu'il est possible de se contenter de l'analyse de la clarté (C_{50}) ; mais certaines recherches avaient étudiées les deux paramètres, c'est pour cette raison que ce paramètre a été maintenu.

Il reste quelques paramètres qui n'ont pas été étudiés car ils sont plus liés aux activités musicales ; à savoir C_{80} , IACC.

5.5.2. LE CORPUS D'ETUDE.

Vu l'étendu du territoire sur lequel sont localisées les huit mosquées présentées dans le chapitre précédent (Annaba, Alger, Mazouna, Oran et Mascara), il n'est pas évident de réaliser des mesures acoustiques dans tous ces édifices pour plusieurs raisons ; dont le temps, et la logistique liée aux équipements. Nous avons été contraints de faire une sélection d'édifices parmi les huit présentés ultérieurement. Il va falloir répartir les différents édifices en catégories ; afin de sélectionner l'échantillon.

Étant donné que les mesures *in-situ* vont permettre de mesurer le temps de réverbération ; ce dernier permettra par la suite de calculer les autres paramètres acoustiques. Et en raison du rapport du temps de réverbération au volume de la salle de prière, du moins dans les bâtiments ayant peu d'absorption acoustique supplémentaire, il était important de regrouper les bâtiments en fonction de leur volume (Abdou, 2003a). Les volumes des mosquées ottomanes en Algérie vont de 1500 m^3 jusqu'à 10309 m^3 . Par conséquent, compte tenu de cette fourchette, trois catégories ont été définies afin de sélectionner des mosquées reflétant les différentes situations, comme présentées dans le tableau 5.1. Il s'agit bien des édifices présentant un style ottoman et prouvant une authenticité quant aux transformations opérées depuis leurs fondations.

Tableau 5.1. Classification des mosquées Ottomanes d'Algérie en catégories selon le Volume de la salle de prière.

Catégories	A	B	C
Volume (m³)	<2000	2000÷5000	>5000
Mosquées ottomanes authentiques	M. Bey, Annaba (1408 m ³)	Dey, Alger (2359 m ³)	Djedid, Alger (10309 m ³)
	M. Sidi Mohamed ben Charef, Mazouna, Relizen (994 m ³)	Ali-Bitchine, Alger (2742 m ³)	Pacha, Oran (12216 m ³)
	Safir, Algiers (1517 m ³)	Moubaïa, Mascara (3049 m ³)	

5.5.3. MESURES IN-SITU.

5.5.3.1. EQUIPEMENTS DE MESURES.

En ce qui concerne les mesures in-situ, il faut se référer au standard international ISO 3382-1 pour s'assurer de la possibilité de comparer les résultats de cette recherche avec les travaux de recherches scientifiques publiés dans le même domaine. En conséquence ; toutes les recherches précédentes doivent respecter le standard, avec plus au moins de différences relatives au contexte d'étude, notamment le nombre et la position des récepteurs, sachant que le standard prévoit des recommandations pour les récepteurs, pour le choix de la source (voix humaine, haut parleur, source omnidirectionnelle ; ...etc), comme il prévoit le protocole relatif à chaque type de source sonore. Il est également plus approprié de se conformer aux caractéristiques du matériel à employer. (Microphones, logiciels, carte son, ...etc).

Un autre souci est relatif aux instruments de mesure. En fait, en se référant au standard Iso 3382-1, il est recommandé d'employer une source omnidirectionnelle pour générer un signal sonore, dans le but d'obtenir la réponse impulsionnelle des salles de prière en question. Et comme nous ne disposons pas de ce matériel, nous avons collaboré avec le centre de recherche (CNERIB) de Souidania à Alger. Et en raison du déplacement des personnels et des matériels du centre de recherche, nous étions contraints de travailler uniquement sur les mosquées ottomanes situées à Alger. Dans l'espoir d'étendre le corpus plus tard aux autres mosquées du pays. Grâce à cette coopération ; les mesures ont été effectuées par une source sonore

omnidirectionnelle (B&K 4292), composée de douze haut-parleurs montés sur un dodécaèdre, avec une réponse en fréquence de 50 Hz à 16 kHz.

Un microphone omnidirectionnel (Behringer ECM800, diamètre 13 mm), a été utilisé pour recueillir le signal. Afin de mesurer les réponses impulsionnelles pour chaque combinaison source-récepteur.



Figure 5.2. Equipements pour les mesures in-situ. (source : Auteur, 2023)

Le logiciel libre Audacity avec le plug-in Aurora (offert par le *polytechnico di Bari*, Italie) a été utilisé pour générer un balayage sinusoïdal logarithmique (ISO 3382-1; Farina, A, 2007), pour lire et enregistrer simultanément les réponses de la pièce à l'aide d'une carte son (*Onyx Artist 1.2*). Le balayage sinusoïdal était caractérisé par des fréquences variant de 20 Hz à 10000 Hz, et une durée de 20 s afin de couvrir la gamme des fréquences typiques et de fournir un rapport signal/bruit suffisamment élevé.

Les paramètres acoustiques ont été calculés conformément à la norme ISO 3382-1. En ce qui concerne le temps de réverbération, afin de prendre en compte la même marge de calcul pour toutes les réponses impulsionnelles avec un rapport signal/bruit plus faible, le T_{20} a été considéré dans toutes les analyses ultérieures. Parmi les autres paramètres acoustiques monauraux, la clarté a été calculée en référence à la parole (C_{50}), car elle est clairement plus appropriée aux mosquées, et, pour la même raison, l'indice de transmission de la parole (STI) a également été calculé conformément à la norme internationale IEC 60268-16 (Commission, I.E, 2003). Le STI étant calculé par la méthode indirecte, en utilisant les réponses impulsionnelles mesurées, il a été jugé possible de procéder sans le recours aux mesures du bruit de fond réel (BGN) au cours de l'enquête, les valeurs doivent être considérées comme la limite supérieure qui pourrait être atteinte à chaque position du récepteur (Benferhat, et al, 2022).

A partir des édifices précédemment présentés, et compte tenu des contraintes liées aux équipements de mesures ; il a été opté pour trois mosquées (trois catégories de volume) à évaluer dans cette recherche ; Les mosquées sont : la mosquée Safir (1517 m³), la mosquée Ali-Bitchine (2742 m³) et enfin la mosquée Djedid ou la Pêcherie (10309 m³). La mosquée Ali-Bitchine a été choisie plutôt que la mosquée du Dey à la citadelle ; vu l'inaccessibilité de cette dernière, car elle fait l'objet de travaux de restauration. Les principales caractéristiques géométriques en rapport avec les paramètres acoustiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 5.2. Dimensions géométriques de base et la Capacité (N) des trois mosquées sélectionnées pour cette recherche.

	Dimensions géométriques			Rapport longueur / largeur ratio L/l	Surface du hall* (m ²)	Nbre pers N(pers)	V m ³	V/N (m ³ /pers s)
	L	l	H _{max}					
Djedid	37.40	23.70	22.43	1.57	878(330)	915	10309	11.26
Ali-Bitchine	23.77	20.90	10.70	1.13	480	499	2742	5.49
Safir	13.17	17.51	10.60	0.75	224(135)	356	1500	4.12

*Les Valeurs entre parenthèses correspondent aux surfaces des mezzanines.

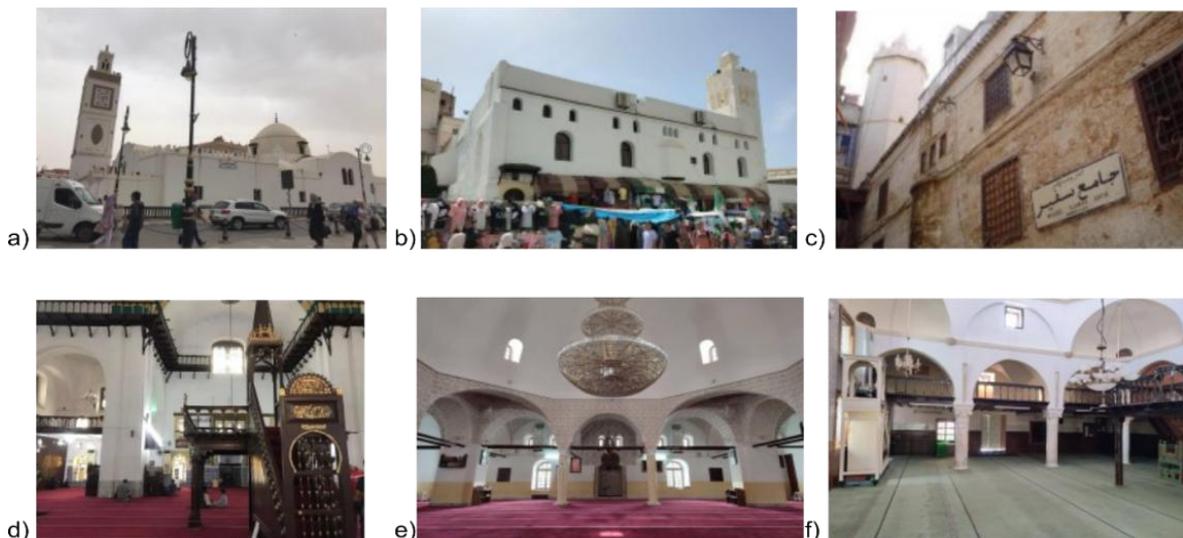


Figure 5.3. Photos des trois mosquées constituant le corpus d'étude: a) l'extérieur de la mosquée Djedid; b) l'extérieur de la mosquée Ali-Bitchin; c) l'extérieur de la mosquée Safir; d) l'intérieur de la mosquée Djedid; e) l'intérieur de la mosquée Ali-Bitchine; f) l'intérieur de la mosquée Safir. (Source : Benferhat, 2022)

5.5.3.2. POSITION DES SOURCES SONORES.

Les positions des différentes sources sonores dans les bâtiments religieux historiques doivent prendre en compte les transformations de la structure du bâtiment (ajouts, démolitions ; etc) (Vecco, 2010), car il faut suivre et retracer l'évolution possible de la position de la source dans le temps en fonction des besoins du culte (Benferhat, 2022 ; Vecco, 2010). Les mosquées présentées dans cette étude ont été sélectionnées en fonction de leur authenticité, il est possible d'admettre de transformations très limitées vu l'étendue historique des bâtiments (entre deux et cinq siècles d'existence). Les modifications tolérées peuvent être principalement au niveau de la finition (peinture), ou par rapport à la reconstruction de certains détails constructifs, sans aucun changement dans la configuration spatiale de la salle de prière (Karabiber, Z, 2005 ; Martellotta, et al, 2009 ; Vecco, 2010 ; Benferhat, 2022).

Quant au nombre de sources et de récepteurs ; la meilleure option serait sans doute de multiplier le nombre, pour établir une évaluation plus objective et précise de l'environnement sonore à l'intérieur de la salle de prière. Cependant, le temps alloué aux mesures serait trop long, en conséquence, plusieurs interruptions dues aux différentes prières, pourraient modifier les conditions environnementales, ainsi que des problèmes liés à la minimisation du bruit de fond, qu'il faut en tenir compte (Álvarez-Morales et al, 2014).

Conformément aux recommandations du chapitre 2 (2.4. Pratiques religieuses : Positions des Sources-receveurs) ; deux principaux emplacements pour la source (deux sources) seront considérés, en conformité avec le standard ISO 3382, ainsi que les travaux précédents sur les mosquées.

Identifier une troisième source sonore peut être accordé, relativement à certaines pratiques liées à des régions et/ou un rite particulier, tel que le rite hanéfites ; comme il est le cas de notre cas d'étude. Autrefois les Ottomans préconisaient une troisième source placée au-dessus du *Mahfil* (balcon *ou Sedda* : une sous-pente souvent placée au milieu de la salle). Cependant ; pour le cas de l'Algérie, certes le mobilier continu d'exister, dans les deux mosquées Pêcherie (Djedid) ou Safir, mais son usage est exclu car la société est malékite. Pour cette raison, il est préférable de se conformer aux recherches précédentes en excluant les positions exceptionnelles (Elkhateeb et al, 2015) et en se référant aux études antérieures sur les mosquées ottomanes, qui

n'avaient considérées que deux sources principales selon la pratique des prières des musulmans.

La première source sera considérée comme une "**source de référence**" (Martellotta et al, 2009) ; source (**A**), c'est-à-dire la position où la source sonore est la plus fréquemment localisée et où elle permet facilement la comparaison entre différents bâtiments (Benferhat et al, 2022). Elle se situe au Mihrab (**A**), où l'imam dirige les prières en direction de la Qibla ; ainsi que les fidèles (prieurs), en s'orientant vers la Mecque (en Arabie Saoudite) (Abdou, A.A, 2003a, 2003b ; Elkhateeb et al, 2015). En raison de la pertinence de cette source pour les mosquées, elle sera considérée comme la "**source de référence**" dans cette étude.

Elle sera placée devant le Mihrab, sur le côté de la zone d'écoute (Main Prayer Area), à une distance de 1,5 m du mur du Mihrab, et sur l'axe de symétrie, tout en tenant compte de l'exclusion des effets de focalisation significatifs dus aux surfaces réfléchissantes. Selon la norme ISO 3382-1, les sources sonores doivent se trouver à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol et au moins à une distance de 1,0 m par rapport aux parois réfléchissantes (murs). Comme proposé dans d'autres études sur les masjids, la source (**A**) sera placée à 1,55 m au-dessus du sol [49, 50, 63, 67, 68].

La deuxième source sonore (**B**) sera placée au niveau du Minbar. Il faut cependant s'assurer qu'aucune modification ou changement de position du Minbar n'a pu être identifié pour les masjids sélectionnés. La hauteur du Minbar à l'intérieur de chaque bâtiment est variable ; elle dépend généralement de la hauteur du toit (Benferhat et al, 2022). Pour cela la source (**B**) sera placée à 1,55 m de la marche sur laquelle l'Imam prêche sa khotba depuis le Minbar (tableau 3).

5.5.3.3. POSITION DES RECEPTEURS.

En ce qui concerne les récepteurs, ils doivent être placés dans la principale zone d'écoute afin de représenter les conditions réelles auxquelles le public est exposé (Martellotta et al., 2009). Le nombre de récepteurs est très important pour assurer une description des variations des propriétés sonores à l'intérieur de l'espace. Bien que la réalisation de mesures à l'aide de grilles denses de récepteurs puisse s'avérer utile pour cartographier toutes les variations et l'influence des éléments architecturaux (Garai et al, 2015). Cependant en raison de la longueur de la durée durant les mesures,

cette option sera abandonnée en faveur d'un nombre relativement optimal de récepteurs (Sü Gül, Z. et M. Çalışkan, 2013) afin d'accomplir les attentes des fidèles (utilisateurs) en matières de : i) **écouter la voix de l'Imam** lorsqu'il récite le coran ou il donne les ordres de changement de postures (debout, prosternation, ...etc), ii) **comprendre convenablement le discours de la Khotba**, et enfin ; iii) **écouter et participer à la lecture collective du coran** (El-Khateeb et al, 2007). Un nombre de 15 récepteurs a été retenu.

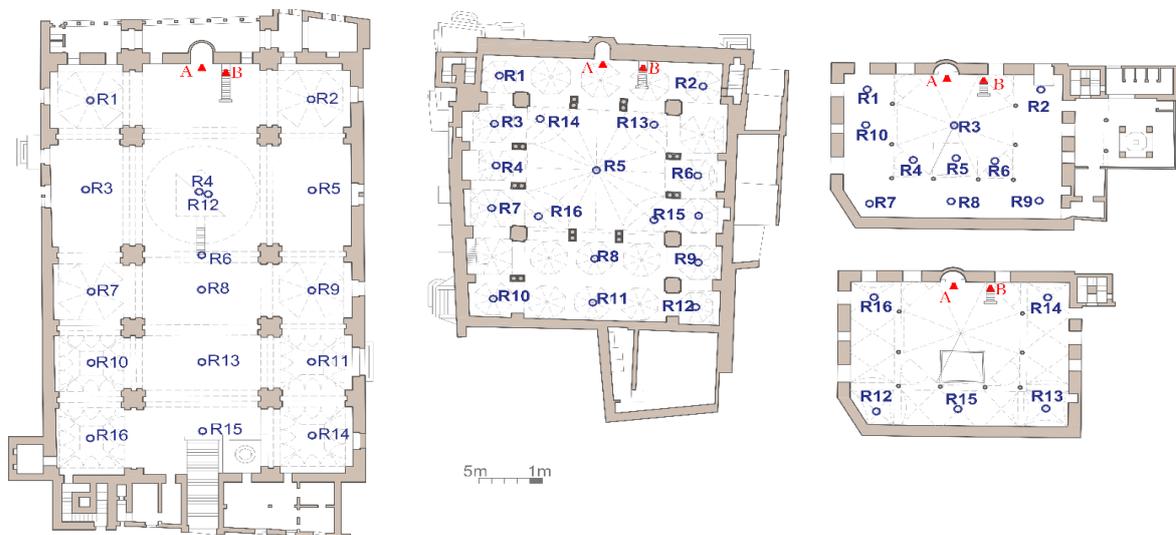
Les masjids sélectionnés n'étant pas symétriques, les récepteurs doivent couvrir la zone centrale de l'espace de prière ainsi que les zones secondaires (galeries) (Marsilio et al, 2001 ; Prodi et al, 2001 et 2003). Pour cette raison ils ont été répartis sur les zones de devant, du centre et de derrière, et le cas échéant, sur les balcons supérieurs (Figure 5.5) (Marsilio et al, 2001 ; Karabiber, 2002 ; Prodi et al, 2001 et 2003 ; Farina, A, 2007 ; Sü Gül, 2013). La distance entre les récepteurs varie entre 3,00 m et 9,30 m à Jedid, entre 3,64 m et 8,18 m à Ali-Bitchin, et entre 3,00 m et 10,00 m à Safir.

Selon la norme ISO 3382-1, les récepteurs doivent être placés à 1,2 m au-dessus du sol, à un quart de longueur d'onde des surfaces réfléchissantes. Pour les masjids, cette recommandation n'a pas posé de problème pour la source **A** (Mihrab), pour laquelle les fidèles restent debout, la distance au sol a donc été fixée à 1,65 m (Eldien, H. et Al Qahtani, H., 2012 ; Sü Gül et Çalışkan, 2013). En revanche, dans le cas de la source **B** (Minbar), les fidèles doivent s'asseoir par terre, malgré la recommandation de l'ISO, la hauteur des récepteurs de la source (**B**) a été fixée à 0,85 m, comme recommandée par des études antérieures (Abdou, A.A, 2003a ; Aleshkin, A.B, 2021 ; Benferhat et al, 2022). Les hauteurs résultantes des sources et des récepteurs sont résumées dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3. Hauteurs des Sources/Récepteurs pour les trois mosquées objet du corpus d'étude.

Mosquée	Hauteurs de la Source (m)	Hauteurs des récepteurs (m)
La Mosquée Djedid	Mihrab: A at 1.55 m	1.65 m
	Minbar: B at 2.80 m	0.85 m
La Mosquée Ali-Bitchine	Mihrab: A at 1.55 m	1.65 m
	Minbar: B at 2.20 m	0.85 m
La Mosquée Safir	Mihrab: A at 1.55 m	1.65 m
	Minbar: B at 2.20 m	0.85 m

Durant les mesures, toutes les installations pouvant générer du bruit (ventilateurs, climatisation) à l'intérieur doivent être éteintes, car elles peuvent entraver la performance acoustique de l'enceinte (Marsilio et al, 2001).

**Figure 5.4.** Location of source-receiver positions in the three selected masjids: a) Jeddid; b) Ali-Bitchin; c) Safir. (Source: Benferhat et al, 2022)

5.5.4. CALCUL DES PARAMETRES ACOUSTIQUES EN SITUATION D'OCCUPATION.

Afin d'analyser l'effet de l'occupation sur les conditions acoustiques générales et de comparer les valeurs T_{20} avec les valeurs de référence de la littérature, le temps de réverbération en état d'occupation a été calculé pour les trois mosquées de l'échantillon selon la méthode Elkhateeb (expliquée au chapitre IV).

En outre, afin de calculer également la manière avec laquelle la variation du temps de réverbération peut affecter les paramètres de clarté ; la méthode peaufinée définie par Martellotta a été utilisée. Ce modèle semi-empirique a adapté pour les églises à partir du modèle original établi par Barron et Lee pour les auditoriums. Selon ce modèle, le son direct est suivi d'une décroissance linéaire qui se caractérise par un niveau instantané du son en fin de décroissance qui est uniforme dans tout l'espace. Les traces de décroissance sont ainsi superposées quelle que soit la position du récepteur dans l'espace. En admettant que le temps $t=0$ corresponde au moment où la source émet le signal, l'intégration de l'énergie pour un récepteur situé à une distance « r » de la source commence à un moment $t_D = r/c$, et l'énergie intégrée diminue en conséquence quand la distance entre la source et le récepteur augmente.

Selon ce modèle, le C_{50} peut être facilement calculé en fonction du temps de réverbération et de la distance à l'aide des formules suivantes :

$$d(r) = 100/r^2 \quad (1)$$

$$E_0^{50}(r) = (31200T/V)e^{-0.04r/T}(1 - e^{-0.691/T}) \quad (2)$$

$$E_{50}^{\infty}(r) = (31200T/V)e^{-0.04r/T}e^{-0.691/T} \quad (3)$$

Avec : d correspondant à l'énergie normalisée du son direct,
 E_0^{50} à l'énergie normalisée des premières réflexions (de 0 à 50 ms)
 E_{50}^{∞} correspond à l'énergie tardive.

Par conséquent, C_{50} est donné par :

$$C_{50}(r) = 10 \log \log \left[\left(d + E_0^{50} \right) / E_{50}^{\infty} \right]. \quad (4)$$

Sur la base d'un grand nombre d'observations expérimentales (Martellotta et al, 2009) ont constaté que le modèle précédent ne convenait pas très bien aux églises et aux espaces similaires, car le moment où la décroissance commençait à être linéaire arrivait tardivement, lorsque la position de mesure était plus éloignée de la source. Par ailleurs, aux points proches de la source, les premières réflexions étaient plus fortes que dans le cas d'un champ réverbérant classique idéal. Pour tenir compte de ce phénomène, la décroissance exponentielle d'origine a été remplacée par une combinaison linéaire de décroissances exponentielles, dont la première reste inchangée, conformément à la recommandation de Barron, et la seconde dépend des caractéristiques architecturales de l'espace, de sorte que les nouvelles composantes précoces et tardives peuvent être formulées de la manière suivante:

$$E_0^{r50}(r) = (31200T/V)e^{-0.04r/T} \left(1 - e^{-0.691/T}\right) + (A_2 \rho r / 2) \left(1 - e^{-0.1/\rho r}\right), \quad (5)$$

$$E_{50}^{r\infty}(r) = (31200T/V)e^{-0.04r/T} e^{-0.691/T} + (A_2 \rho r / 2) e^{-0.1/\rho r}, \quad (6)$$

Sans entrer dans les détails du modèle, il convient de souligner que pour appliquer le modèle affiné, deux paramètres supplémentaires sont nécessaires, en plus du temps de réverbération et de la distance source-récepteur : « *the mean scattering coefficient* (s) »: le coefficient de diffusion (ou dispersion) moyen (s), qui dépend des caractéristiques de « *sending end* » de la salle, et le paramètre « **k** », qui dépend de la forme de l'espace et de la présence de colonnes, de voûtes ou de coupes.

Afin d'appliquer le modèle aux trois mosquées sélectionnées, le tableau 5.4 résume les paramètres utilisés. La dispersion (*Scattering*) a reçu la valeur la plus faible en raison de la nature plate et réfléchissante de la zone où se trouvent les sources. En revanche, le facteur « **k** » a été adapté à la complexité différente des trois masjids en attribuant la valeur la plus élevée à la mosquée Djedid (en raison du dôme et des nefs), et 0,1 à la mosquée Safir (ce qui signifie que la deuxième courbe jouera un rôle très mineur et que les prédictions coïncideront avec celles du modèle). En raison de la compacité et de l'absence d'obstacles à la mosquée Safir ; elle ressemble à un auditorium sur le plan acoustique.

5.5.5. L'ENQUETE PAR QUESTIONNAIRE.

Cette technique de recherche est choisie pour avoir une évaluation qualitative de l'environnement sonore des trois mosquées ottomanes, objet de cette étude. Précisément ; elle dévoilera les préférences sonores des usagers dans les mosquées. Les travaux précédents (Vallet et al, 2002 ; Elkhateeb, 2016 ; Yilmazer et Acun, 2018) témoignent du besoin de réverbération auprès des usagers.

Pour cette technique il est question de savoir combien de personnes il faut interroger ? Qui sera interrogé ? Quelles sont les questions à poser ? Et enfin comment procéder ?

Pour la première question ; concernant le nombre de personnes à interroger. Dans la littérature, par exemple le travail mené par Vallet et al (2002) dans le cadre du projet *CAHRISMA* ; les auteurs avaient interrogés 60 personnes. En fait, il s'agit de deux groupes de 30 personnes, un groupe est constitué de musulmans, l'autre de chrétiens; donc les auteurs se sont conformés aux recommandations. Cependant, Elkhateeb n'avait pas précisé le nombre de personnes interviewées. Et pour Yilmazer et Acun, les auteurs se sont limités à quinze (15) personnes dans leurs enquêtes (Yilmazer et Acun, 2018). Pour cette recherche, le nombre de personnes sera 30 conformément à la démarche développée par les chercheurs du projet *CAHRISMA*.

Maintenant qui sera interrogé ? Pour répondre à cette question il faut toujours se référer aux recherches existantes. Une sélection plutôt aléatoire est pratiquée par les auteurs des deux publications Vallet et al (2002), Yilmazer et Acun (2018), car ils ont sélectionné des personnes sortantes des mosquées. Alors Elkhateeb avait interviewé des Imams (Elkhateeb et al, 2016). En générale les auteurs recommandent un échantillon de personnes de différent âge, profession, genre, fréquentation de mosquées, pour pouvoir comprendre les facteurs pouvant influencer la perception du message sonore. Pour cette recherche, il est envisagé de sélectionner sur la base de genre (50% masculin, 50% féminin), âge (allant de 18 jusqu'à 65ans) et avec différents taux de fréquentation des lieux de culte.

Pour les questions à poser dans le cadre d'une enquête, en référence aux différents articles, les questions avaient appréhendés l'évaluation de l'intelligibilité et la clarté de la parole, ainsi que l'intensité du son. Le travail de Vallet et al, semble plus développé,

comme il nous rappelle la méthode de « Ando » (expliquée plus haut) ; cet article contient des questions sur la réverbération dans la salle et l'appréciation générale (impression générale) ; si l'ambiance sonore est appréciée, ordinaire ou bien stressante. Une autre question relative à la distance par rapport à la source sera considérée. Tous ces questionnements sont sensés refléter, de manière objective, la perception subjective du son faite par les usagers.

Relativement à la nature du sujet (l'Acoustique) ; nous avons opté pour une enquête par questionnaire, dans laquelle une assistance des interviewés est recommandée. En fait, pour l'ensemble des personnes qui ont répondues aux questions ; il a fallut une assistance durant l'écoute des premiers morceaux (enregistrement vocaux), au bout de la 3^{ème} à la 4^{ème} fois, les individus s'approprient l'expérience.

En conséquence, avant de poser les questions sur la qualité sonore, il fallait passer par une phase préparatoire ; qui consiste à faire écouter quatre enregistrements ; dont l'enregistrement initial effectué dans la chambre sourde (*anechoic chamber*), suivi de trois enregistrements caractérisés par différents temps de réverbération (3.33, 2.99 et 0.92 secondes). L'objectif est de s'assurer de la sensibilité de la personne interviewée avant d'entamer l'enquête. Ensuite vient la deuxième partie ; qui consiste à les faire écouter les échantillons choisies, des trois mosquées, par l'intermédiaire d'un casque, dont nous disposons. Alors, pour les réponses, la collecte se fait après l'écoute de chaque morceau. Comme il faut s'assurer que l'interviewé a bien ressentie l'enregistrement avant de lui poser les questions. Parfois, il a été nécessaire de refaire l'expérience d'écoute jusqu'à trois fois pour le même morceau.

Questions d'évaluation de la qualité sonore :

- Comment trouvez-vous la distance vous séparant de la source ?
- Comment juger la clarté de la récitation du verset coranique ?
- Comment sentez-vous l'intensité du son ?
- Comment sentez-vous les réverbérations ?
- Comment évaluez-vous votre impression générale ? trois échelles : **agrément, habituelle, stressante.**
- Est-ce que cet enregistrement est parmi les meilleurs que vous avez entendus ?
OUI ou NON.

Pour répondre aux quatre premières questions ; les interviewés doivent choisir sur une échelle de 1 à 5. A la fin de chaque réponse (chaque enregistrement) les interviewés ont la possibilité d'ajouter des commentaires s'ils le jugent nécessaire.

Pour la dernière partie, concernant comment réaliser le questionnaire. En fait, entre 56 enregistrements choisis par Vallet et al, ce qui nécessitait environ 45 minutes par personnes, et la procédure suivie par El-Khateeb, qui s'est contenté de cinq enregistrements uniquement (Elkhateeb et al, 2016), ou encore Yilmazer dont les questions étaient destinées aux personnes qui sortaient de la mosquée après la prière de vendredi, sans les prévenir à l'avance (Yilmazer et Acun, 2018), il est évident que la méthodologie de Vallet et al (2002) semble être plus plausible et admissible.

Vallet et al avaient deux mosquées (Sokkulu et Suleymaniye). Ils ont choisis deux récepteurs pour les deux sources (Mihrab et Minbar), avec sept niveaux différents de temps de réverbération, car ils ont utilisé des *Auralisations* produites par ODEON, ce qui fait au total 56 enregistrements ($2*2*2*7$). Pour le cas de cette recherche, les enregistrements sonores ont été élaborés à partir d'un son anéchoïque (*anechoic sound*) réalisé dans une chambre sourde (*anechoic chambre*) au polytechnique de Bari (Italie), l'auteur avait procédé à la lecture des premiers versets coranique de sourat « *Yacine* » du saint Coran.

Le logiciel *Audacity* doté de plugin *Aurora* permet de reprendre le fichier initial (dépourvu de toutes réverbérations) pour créer des sons (fichiers audio) de même passage du sourate « *Yacine* » mais avec les réverbérations contenues dans chacune des réponses impulsionnelles enregistrées dans les trois mosquées lors des mesures in-situ. C'est-à-dire, au lieu de prendre trente personnes dans les trois mosquées, et les faire écouter le même enregistrement sonore (initial), personne par personne, à chaque fois dans une position différente à l'intérieur de la salle de prière (positions des récepteurs), ce qui est presque impossible.

Cependant, l'application *Convolver* du plugin *Aurora* permet la création de fichiers audio, qui peuvent être écoutés sans pour autant se déplacer. Grâce à cette technique ; un gain considérable en temps et en efforts. Donc, il suffit de sélectionner parmi les réponses impulsionnelles effectuées (68 au total) dans les trois mosquées (Pêcherie : 12 pour le Mihrab et 14 pour le Minbar, Ali-Bitchine : 12 pour le Mihrab et 12 pour le Minbar, Safir : 09 pour le Mihrab et 09 pour le Minbar) lesquelles vont être écoutées dans le cadre de ce questionnaire.

Parmi les 68 réponses impulsionnelles, uniquement 14 ont été sélectionnées pour cette enquête. Le choix est fait en fonction de la qualité des fichiers pour éviter certains qui sont inaudibles. Le fichier initial (*anechoic sound*) dure 1 minute 30 secondes, ce qui est jugé trop long ($14 \times 1.30 = 21$ minutes d'écoute sans le temps nécessaire pour répondre aux questions). Donc un extrait de 30 secondes a été choisi pour l'opération de *Convolution*. De ce fait on fait écouter 14 morceaux (audio) de 30 secondes par trente personnes. L'écoute des échantillons des enregistrements sonores se fait par le même casque (*headphone*) ; pour assurer les mêmes conditions d'écoute pour toutes les personnes interviewées.

CONCLUSION.

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différentes techniques de recherches et avons examiné les potentialités et les limites de chacune, en particulier en rapport avec notre sujet et les moyens dont on dispose

Nous avons opté pour l'emploi de trois techniques différentes. Cette combinaison semble nous permettre de cerner au mieux notre sujet de recherche ; ainsi qu'une évaluation exhaustive des environnements sonores des trois mosquées algériennes d'origine ottomane.

La première technique est la réponse impulsionnelle pour effectuer les mesures *in-situ*. La réponse impulsionnelle obtenues dans chacune des mosquées ; va nous permettre d'obtenir le temps de réverbération ; à partir duquel, le calcul du reste des paramètres acoustiques (C_{50} , D_{50} , STI) deviendra possible. Une première évaluation de l'acoustique des salles de prière des mosquées ottomanes, serait possible.

Les conditions d'écoute changent avec le changement du nombre d'utilisateurs. Ces derniers étant, susceptibles d'absorber une partie de l'énergie sonore ; pourraient influencer l'environnement sonore de différentes manières ; selon le taux d'occupation.

A cet effet, pour effectuer une simulation des conditions d'occupation ; nous allons appliquer la méthode de calcul numérique proposée par Elkhateeb ; car cette dernière semble plus rassurante vu l'absence de coefficients appropriés au culte musulman. Car, les normes actuelles se limitent aux coefficients d'une personne assise dans un siège. Elkhateeb ; dans une autre contribution scientifique (Elkhateeb et al, 2016) ; définit le taux d'absorption par usager ($A_{obj} = \alpha * A$) ; dont la valeur est parfois supérieure à 1.

Nous avons jugé plus exhaustif d'aborder le côté qualitatif ; vu la problématique soulevée concernant l'assimilation des salles de prière des musulmans aux salles de réunion (*speech room*). Alors beaucoup de chercheurs ont recommandé un temps de réverbération plus long ; afin de favoriser une atmosphère chargée de symbolisme. Le recours à la technique d'enquête par questionnaire permettra une évaluation plutôt subjective ; mais nécessaire pour identifier un temps de réverbération adéquat pour les mosquées, en absence d'un temps de réverbération optimal pour cette catégorie d'espace.

Chapitre VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

INTRODUCTION.

Ce dernier chapitre est le chapitre de la consécration, car sur lequel nous allons tenter de vérifier nos hypothèses, en s'appuyant sur toutes les connaissances, analyses et synthèses formulées dans ses prédécesseurs. Il s'agit d'application des techniques de recherches explicitées dans le chapitre précédent.

Ce chapitre est constitué essentiellement de trois grandes sections. La première est affectée aux mesures *in-situ*. Dans laquelle une évaluation de l'environnement sonore des trois mosquées, en situation d'inoccupation (*Djamâa Djedid, Djamâa Ali-Bitchine et Djamâa Safir*). La deuxième partie, est consacrée à une simulation de la situation d'occupation, en se référant à la formule numérique proposée par Elkhateeb. La dernière section est relative à une enquête auprès des usagers ; pour une évaluation subjective, censée nous permettre la vérification de l'intelligibilité de la parole préférée par les usagers.

Pour enfin conclure avec les conclusions en rapport avec les différentes transformations effectuées sur les trois mosquées. Comparer les résultats avec les mosquées Ottomanes étudiées dans la littérature.

6. 1. COMPAGNES DES MESURES IN-SITU.

6.1.1. LA MOSQUEE DJEDID.

6.1.1.1. LE TEMPS DE REVERBERATION (T₂₀) ET LE TEMPS DE DECROISSANCE PRECOCE (EDT).

L'analyse du T₂₀ et de l'EDT pour la salle de prière de la mosquée Djedid (figure 6.1. (a), (b)) révèle un T₂₀ long à 250Hz, alors qu'aux fréquences moyennes (500 Hz-1kHz) la valeur moyenne est d'environ 3.5s (Benferhat et al, 2022).

Aux fréquences plus élevées, les valeurs diminuent doucement de manière régulière pour atteindre 1,5 s en raison de l'absorption de l'air. La présence de larges surfaces en bois

(le long de la nef centrale) ainsi que la présence du *Mahfil* en bois sous le dôme central ont probablement contribué à réduire la réverbération à 125 Hz (Benferhat et al, 2022).

Aucune différence significative n'a pu être observée entre les valeurs moyennes de T_{20} et EDT, de même qu'entre les deux positions de la source. En fait, tous les récepteurs reçoivent le signal direct ainsi que le son réverbéré (Benferhat et al, 2022).

La mosquée Djedid est la plus grande parmi les trois mosquées étudiées, pour laquelle l'analyse de l'EDT en fonction de la distance révèle une tendance croissante, typique des grands bâtiments oblongs avec une toiture assez haute, comme les églises (Martellotta, 2009 ; Berardi et al, 2009). Le graphique illustre une nette augmentation des valeurs moyennes de l'EDT en fonction de la distance ($R^2= 0,83$), en particulier pour la source A (*Mihrab*), tandis que les récepteurs 1, 2 et 14 (les plus proches de la source) montrent des valeurs plus courtes lorsque la source est sur le *Minbar* (source B), probablement en raison des réflexions précoces plus fortes dues à la position surélevée de la source et aux réflexions parvenues à partir du sol (Benferhat et al, 2022).

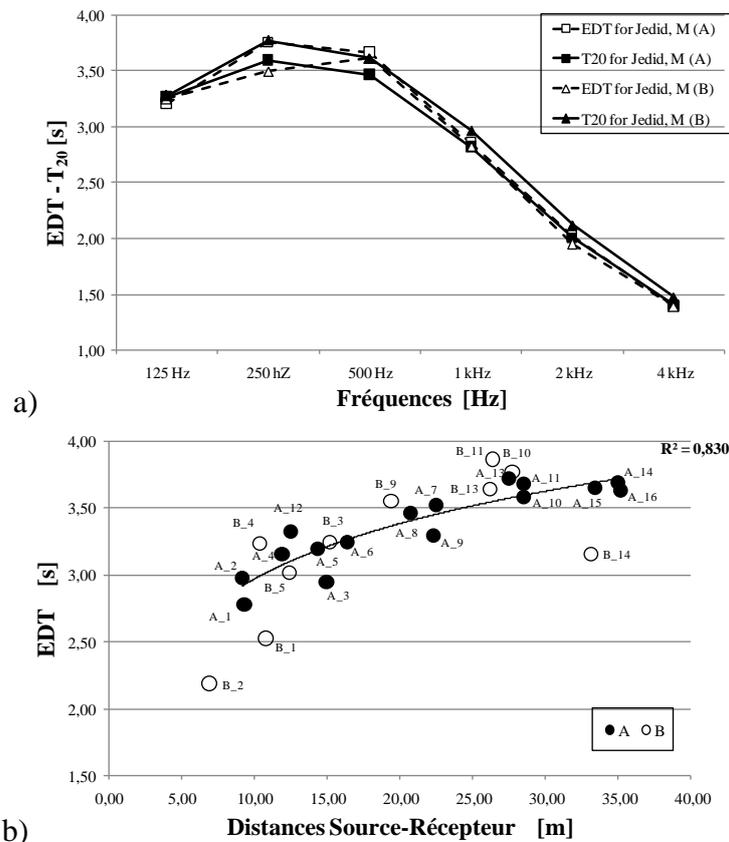


Figure 6.1. Résultats des mesures in-situ de la mosquée Djedid : a) le T_{20} et l'EDT en fonction des fréquences. b) Les valeurs de l'EDT en fonction de la distance entre les récepteurs et la source. (Benferhat et al, 2022)

6.1.1.2. DEFINITION (D50).

Les valeurs de Définition (D_{50}) exprimées en pourcentage permettent une évaluation de la qualité du message sonore, sur une échelle allant progressivement de la *Mauvaise, Pauvre, Moyenne, Bonne* et *excellente* (Joanne, 2003).

A la mosquée Djedid ; une mauvaise définition (D_{50}) est enregistrée sur l'ensemble de la salle de prière ; à l'exception de : A_01, A_04, B_01, B_02 et B_04. La meilleure définition est ressentie du coté du récepteur A_01 (42.34%) pour la source A ; ce qui est considérée comme une définition pauvre (Joanne, 2003). Elle atteint par contre une bonne définition (62.48%) avec le récepteur (B_02). Les valeurs de D_{50} prouvent, tout de même, une décroissance relative à la distance source-récepteur. La qualité de la définition (D_{50}) est meilleure lorsque l'*Imam* dirige la prière (Source A).

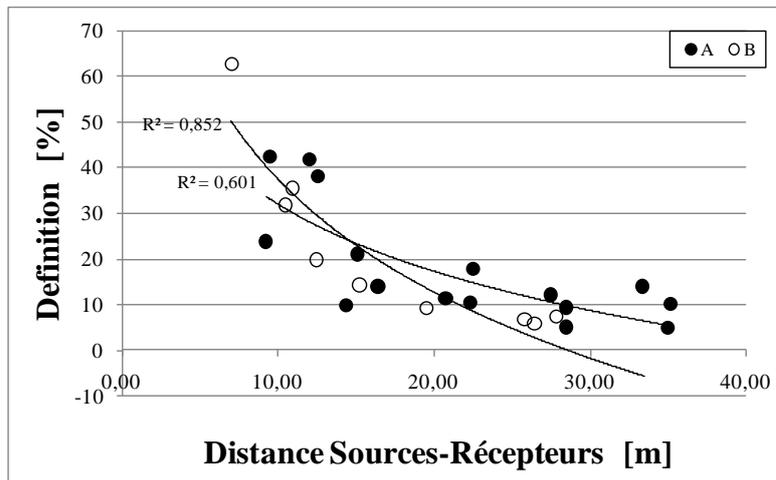


Figure 6.2. Valeurs de Définition (D_{50}) en fréquences moyennes. (Source : Auteur)

6.1.1.3. CLARTE (C50).

Le graphe (figure 6.3) illustre des valeurs de C_{50} en faveur de la source A. La comparaison entre les intervalles des valeurs de C_{50} (la plus importante et la plus faible) pour les deux sources (A et B) révèle que la meilleure valeur est en faveur de la source B ; avec une valeur C_{50} qui atteint son maximum à B_2 (9,12 m de la source), avec une valeur de **2,28 dB** et la valeur la plus faible se trouve au récepteur B_11 (26,40m de la source B) avec une valeur de **-12,14 dB**. Cependant la valeur la plus importante pour la source A est : **-1,41 dB** (récepteur A_1 : à 9,42 m de la source), et la plus faible est de **-12,98 dB** (récepteur A_14 ; 35 m de la source). Pourtant l'ensemble des récepteurs (excepte A_2

avec B_2) obtiennent des valeurs de C_{50} meilleure pour la source A (figure 6.3). Selon le graphique la clarté diminue progressivement avec la distance (Benferhat et al, 2022).

Les meilleures valeurs peuvent être constatées du côté gauche de la salle de prière ; à l'exemple des récepteurs A_7 et A_9, qui se trouvent tous les deux à la même distance de la source, mais sur côtés opposés (A_7 sur le côté gauche, tandis que A_9 sur le côté droit). Pour la source A (située sur l'axe de symétrie) la valeur de C_{50} pour A_7 est de **-6,78 dB**, alors celle de A_9 est de **-9,86 dB ; malgré** la symétrie apparente de la salle de prière sur le plan architectural, elle s'avère asymétrique sur le plan acoustique. Des différences dans les positions exactes des récepteurs peuvent être à l'origine d'une telle différence, il est moins probable que le côté gauche, dépourvu de fenêtres ; soit la cause des différences entre les deux cotés de la salle de prière.

Les récepteurs situés au centre de la coupole centrale (A_4 sous le mahfil, A_12 au-dessus du mahfil) présentent une meilleure clarté aux fréquences moyennes par rapport à la source A. Cela peut s'expliquer par le fait que la coupole centrale est très haute, ce qui contribue à accroître la clarté à cet endroit.

L'analyse des valeurs de C_{50} et de STI dans la mosquée Djedid (figure 6.4) montre qu'en dehors des points très proches de la source où la clarté est proche de zéro ; le reste des récepteurs prouvent des valeurs de clarté de la parole (C_{50}) bien en deçà des valeurs optimales. Une aggravation significative apparaît lorsque la distance par rapport à la source augmente (Benferhat et al, 2022).

Compte tenu de la nature du paramètre et de la géométrie complexe de l'espace, où les piliers et autres éléments architectoniques peuvent facilement retarder ou supprimer certaines réflexions à cause de la dispersion (*scattering*) des réflexions ; provoquant ainsi de faibles valeurs de C_{50} et de STI. Cependant ; grâce au *Mahfil* et le mur de fond, des réflexions supplémentaires ayant permis d'obtenir des résultats positifs aux récepteurs A_4, A_12 et A_15.. Tandis que les récepteurs présentant des performances inférieures sont : A_5, A_11 et A_14, situés sur le côté occulté par le minbar, empêchant ainsi l'arrivée du son direct en provenance de la source A (Benferhat et al, 2022).

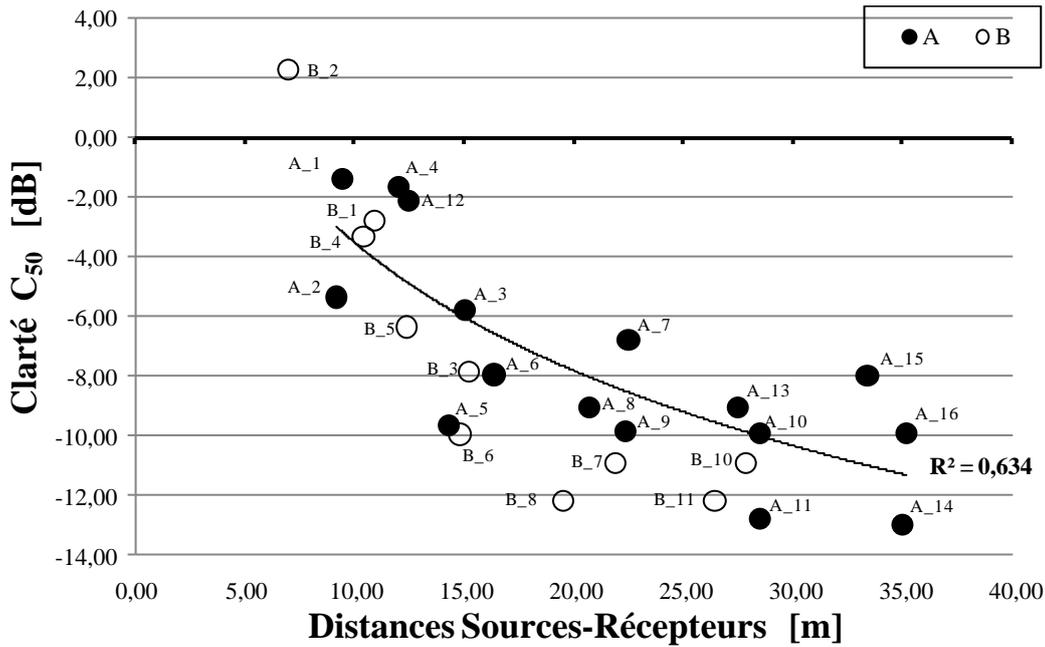


Figure 6.3. Les valeurs C_{50} en fréquences moyennes en fonction de la distance source-récepteurs. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.1.4. INDEX DE TRANSMISSION DE SON (STI).

Il est intéressant d'observer que C_{50} présente des valeurs beaucoup plus dispersées que STI, même si la tendance générale est bien prédite par le "modèle affiné". Les valeurs de STI sont beaucoup plus uniformes et ne présentent que très peu de valeurs "étranges", c'est, par exemple, le cas du récepteurs B_12 où la combinaison de la position de la source (sur le *Minbar*) et la position du récepteur (au-dessus du *Mahfil*) ont entraîné une très mauvaise intelligibilité (Benferhat et al, 2022).

Pour la source A, les valeurs de STI indiquent des valeurs acceptables pour les récepteurs situés à moins de 12 m de la source, alors qu'elles deviennent très faibles pour les récepteurs situés au-delà de 12 m de la source. Pour la source B, les valeurs STI sont "bonnes" pour les récepteurs situés à moins de 7 m, puis elles deviennent "moyennes" entre 7 et 13 m, et ensuite "très faibles" pour les récepteurs se trouvant loin de 13 mètres (Benferhat et al, 2022).

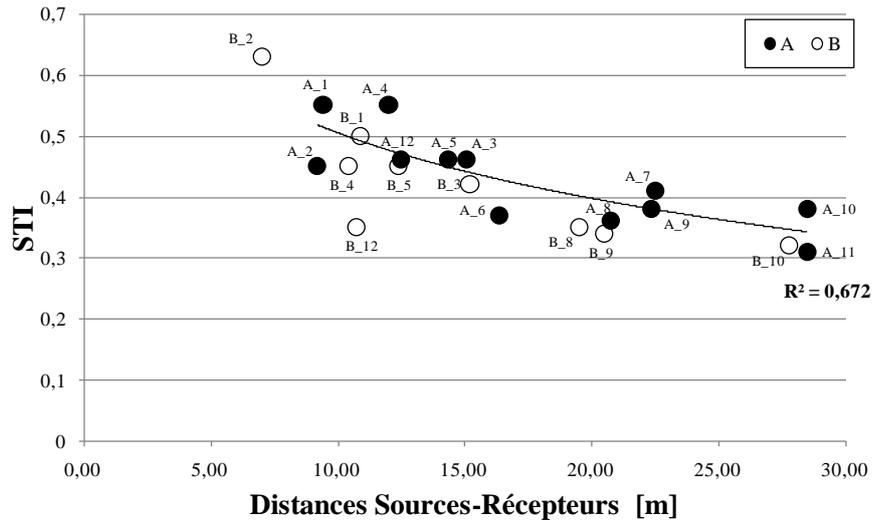


Figure. 6.4. Les valeurs de STI en moyennes fréquences en fonction de la distance source-récepteur. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.2. LA MOSQUEE ALI-BITCHINE.

6.1.2.1. Le Temps de réverbération (T₂₀) et le Temps de décroissance précoce (EDT).

En ce qui concerne la mosquée Ali-Bitchine, les valeurs moyennes d'EDT et T₂₀ sont similaires (parfois plus longs) en comparaison avec la mosquée Djedid (en particulier dans la plage des basses fréquences) malgré son volume moyen (2742m³) en comparaison avec celui de la mosquée Djedid (10390m³). Cette similitude pourrait être renvoyée à l'architecture de la mosquée Ali-Bitchine dépourvue des surfaces en bois (présentes dans la mosquée Djedid) qui assurent une absorption sonores en basse fréquences essentiellement. Aucune différence importante n'est apparue entre les valeurs moyennes de l'EDT et le T₂₀ (Benferhat et al, 2022).

Il est important de souligner l'apparition de légères différences entre les mesures des deux sources (A, B) notamment concernant les plages de fréquences situées entre 250 Hz et 1000 Hz ; avec un temps de réverbération souvent plus long pour la source A, à l'exception des récepteurs dissimulés par des piliers (A_6, A_9).

La distribution des valeurs d'EDT en fonction de la distance est représentée dans la figure suivante (figure 6.5.b). Une légère progression des valeurs d'EDT en fonction de la distance Récepteurs-Source (plus de régularité) notamment pour la source A, cela peut être expliqué en raison des dimensions plus courtes entre source et récepteur, ainsi qu'à la forme beaucoup plus concentrique (centralisée) de la salle de prière (Benferhat et al, 2022).

Les récepteurs situés sous la première moitié du dôme central (A_5, A_13 et A_14) ont enregistré des valeurs d'EDT plus élevées que les valeurs prévu malgré leur rapprochements de la source A, probablement en raison de l'absence de réflexions précoces dues aux surfaces plus éloignées. Inversement, le récepteur B_2 a confirmé ses valeurs plus courtes lorsque la source se trouve sur le *Minbar* (source B), tout comme à la mosquée Djedid (Benferhat et al, 2022).

Aux dernières rangées, les récepteurs reçoivent plus de réverbérations tardives que de réflexions, à l'exception du récepteur A_11 (situé à l'axe du mihrab) qui bénéficie d'une vue directe de la source A (Benferhat et al, 2022).

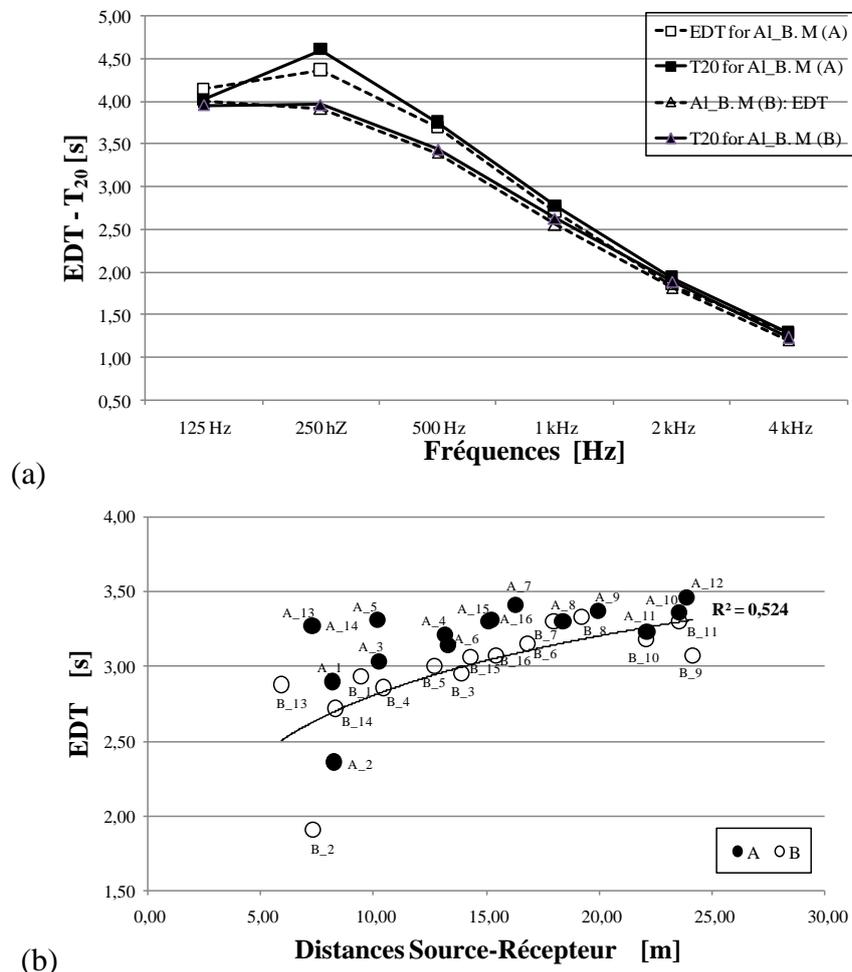


Figure 6.5. Valeurs de T20 et EDT dans la mosquée **Ali-Bitchine** : a) Valeurs moyennes en bandes de fréquences. b) Valeurs de EDT en fonction de la Distance. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.2.2. LA DEFINITION (D₅₀).

A la mosquée Ali-Bitchine ; la définition (D₅₀) enregistre des valeurs qui reflètent souvent une mauvaise définition ($\leq 30\%$). Les récepteurs proches des sources (-9 mètres) obtiennent des valeurs qui reflètent une définition pauvre (A_01, A_02, B_01, B_13 et B_14). Un seul récepteur (B_02) enregistre une définition moyenne (D₅₀=50.64%). En fait, les valeurs de D₅₀ prouvent une décroissance relative à la distance source-récepteur. La qualité de la définition (D₅₀) est meilleure lorsque l'*Imam* dirige la prière (Source A).

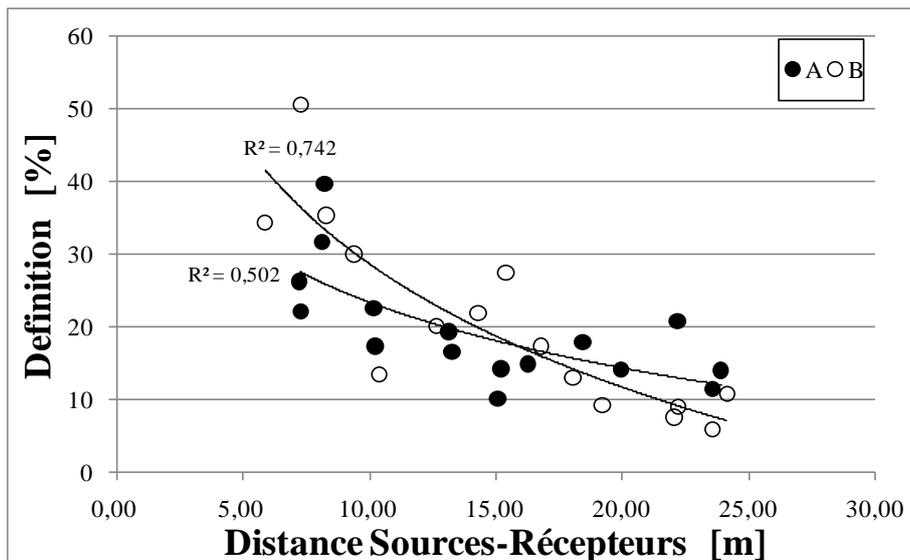


Figure 6.6. Valeurs de Définition (D₅₀) dans la mosquée Ali-Bitchine. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.2.3. LA CLARTE (C₅₀).

Du même pour la clarté (C₅₀), le graphique de la mosquée Ali-Bitchine est similaire à celui de la mosquée Djedid. En fait, les valeurs similaires du temps de réverbération ont influencé la distribution des différentes valeurs de clarté sur le graphique (Figure 6.6) (Benferhat et al, 2022).

Les valeurs de C₅₀ se révèlent moins dispersées que celles de la mosquée Djedid, probablement à cause de la configuration géométrique de l'espace, dont pratiquement tous les récepteurs sont dans l'ombre acoustique des différents piliers, empêchant ainsi le son direct et les réflexions précoces de se propager à travers la salle de prière et d'atteindre un grand nombre de récepteurs (Benferhat et al, 2022). A titre d'exemple, le récepteur 11 présentait des valeurs supérieures à la moyenne avec la source A (situé en face de la

source) en bénéficiant à la fois du son direct et des réflexions du mur du fond; contrairement aux résultats obtenus pour le même récepteur en changeant la position de la source (position B); avec au moins deux piliers le long de la trajectoire; atténuant ainsi une grande partie du son direct. La majorité des récepteurs ont reçu des réverbérations tardives.

Dans le cas des deux sources, les valeurs de C_{50} pour le côté gauche diminuent considérablement et de manière régulière avec la distance, contrairement au côté droit, qui connaît des fluctuations, ce qui est à l'origine des résultats asymétriques entre les deux côtés de la salle de prière. En même temps, certains récepteurs qui, selon la distance source-récepteur, devaient présenter une meilleure clarté pour la source B que pour la source A, mais à cause d'énormes piliers obstruant les rayons sonores (sans vue sur la source B), les résultats ont été à l'opposé des prévisions (ex : B_6) (Benferhat et al, 2022).

Encore une fois, à part les récepteurs situés à environ 10 m des sources (A, B), les valeurs étaient loin d'être acceptables pour la parole dans la majeure partie de l'espace.

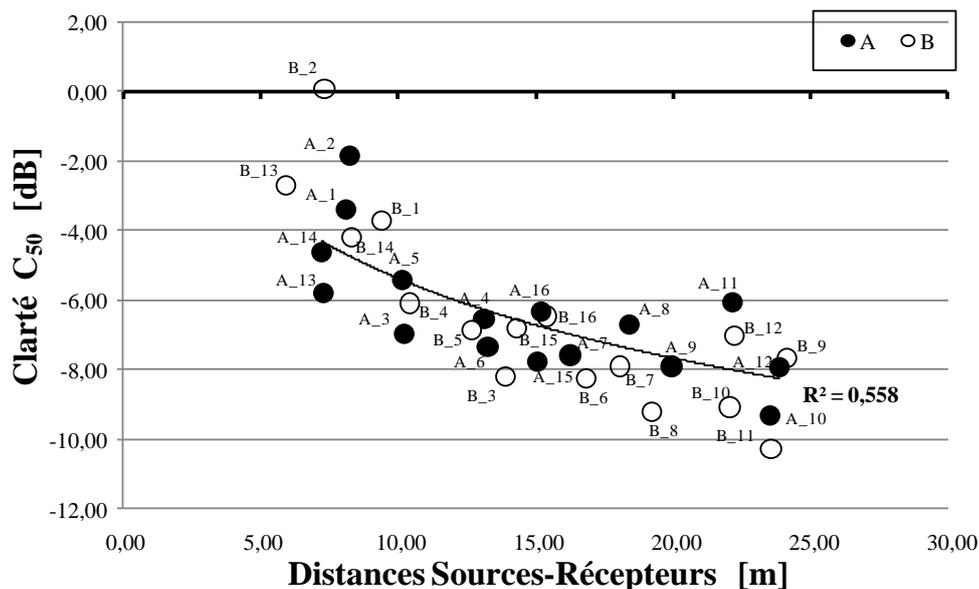


Figure 6.7. Valeurs de Clarté (C_{50}) dans la mosquée Ali-Bitchine. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.2.4. INDEX DE TRANSMISSION DU SON (STI).

Les valeurs STI reflètent une faible intelligibilité (l'ensemble des récepteurs situés au-delà de 10 mètres de la source), exception faite pour les récepteurs A_1, A_2, B_1, B_2 qui affichent des niveaux acceptables, car ils sont situés dans la première rangée. Un autre récepteur présente des valeurs acceptables malgré sa distance par rapport à la source (22

mètres), il s'agit de A_11 ; peut-être parce qu'il reçoit d'importantes réflexions du mur de fond. En ce qui concerne la source B (*Minbar*), la présence du Minbar réduit le nombre des récepteurs ayant exprimé des valeurs acceptables en un seul récepteur (B_2) (Benferhat et al, 2022).

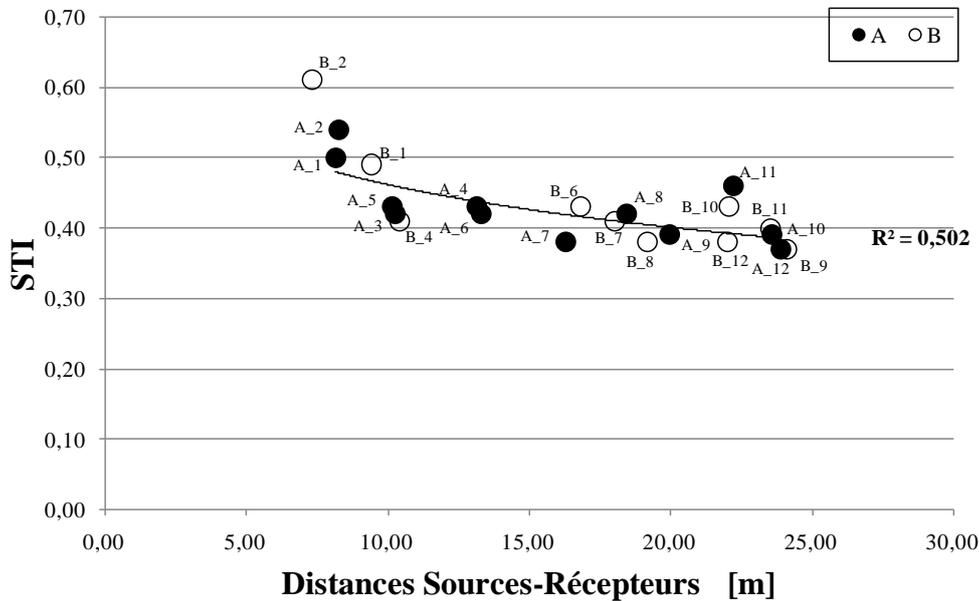


Figure 6.8. Valeurs du STI dans la mosquée Ali-Bitchine. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.3. LA MOSQUEE SAFIR.

6.1.3.1. LE TEMPS DE REVERBERATION (T_{20}) ET LE TEMPS DE DECROISSANCE PRECOCE (EDT).

Dans le cas de la mosquée Safir (figure 6. 10), étant le plus petit des bâtiments analysés ; les deux sources, EDT et T_{20} ont les mêmes résultats sur la plupart des fréquences, avec des valeurs proches de l'ordre de 1 s pour les moyennes et hautes fréquences (500 Hz - 4 kHz). Pour les fréquences les plus basses, les valeurs montent jusqu'à environ 2,5 s. Ce fort déséquilibre peut s'expliquer par une plus grande incidence de surfaces recouvertes de tapis, ce qui expliquerait également les valeurs T_{20} nettement inférieures à celles du masjid d'Ali-Bitchine, qui ne peuvent pas être expliquées uniquement par la différence de volume (Benferhat et al, 2022).

En ce qui concerne l'évolution des valeurs de l'EDT en fonction de la distance, la tendance est beaucoup moins claire en comparaison avec les deux cas précédents, essentiellement en raison des dimensions plus petites, ce qui provoque très peu variations

au niveau des réflexions précoces. En même temps, certains récepteurs se trouvent presque à la même distance de la source mais avec des variations importantes en valeurs de EDT (B_12, B_13 et B_15) ; probablement car ils se trouvent au-dessus de la mezzanine. Il est possible que le toit en gypse voûté qui recouvre la mezzanine (figure 6.9) soit responsable d'une diminution des réflexions précoces et que le garde-corps en bois (figure 6.9) de la mezzanine soit à l'origine d'un certain masquage des sons directs. Une interprétation plus claire sera obtenue en considérant également les autres paramètres discutés dans la prochaine rubrique.



Figure 6.9. L'intérieur de la mosquée **Safir**. **a)** : le toit en gypse de la mezzanine, **b)** : la densité du bois qui couvre la mezzanine (espace réservé aux femmes). (Source : Benferhat, 2022)

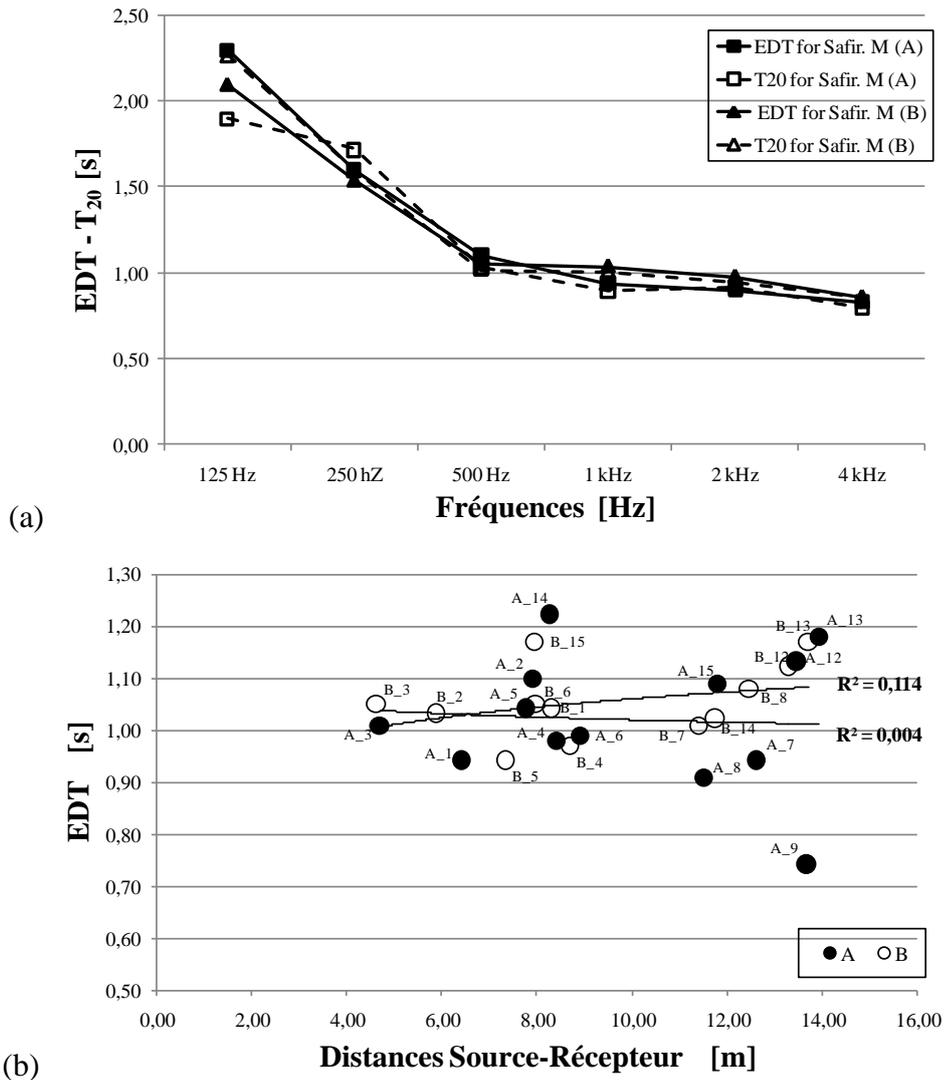


Figure 6.10. Valeurs de T₂₀ et EDT dans la mosquée **Safir** : (a) Valeurs moyennes en bandes de fréquences. (b) Valeurs d'EDT en fonction de la Distance. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.3.2. LA DEFINITION (D_{50}).

Les valeurs de D_{50} pour les deux sources sont très satisfaisantes. Étant donné que le bâtiment n'est pas trop grand, une légère décroissance des valeurs de D_{50} avec la distance a pu être observée. Une situation spécifique se présente pour la source A, avec des valeurs les plus élevées enregistrées aux niveaux des récepteurs les plus éloignés (R7, R8, R9).

Les mesures de D_{50} sont presque très positives sur toutes les fréquences. Toutefois, à partir des fréquences moyennes (500 Hz), la qualité de D_{50} pour les deux sources, dépasse 50%.

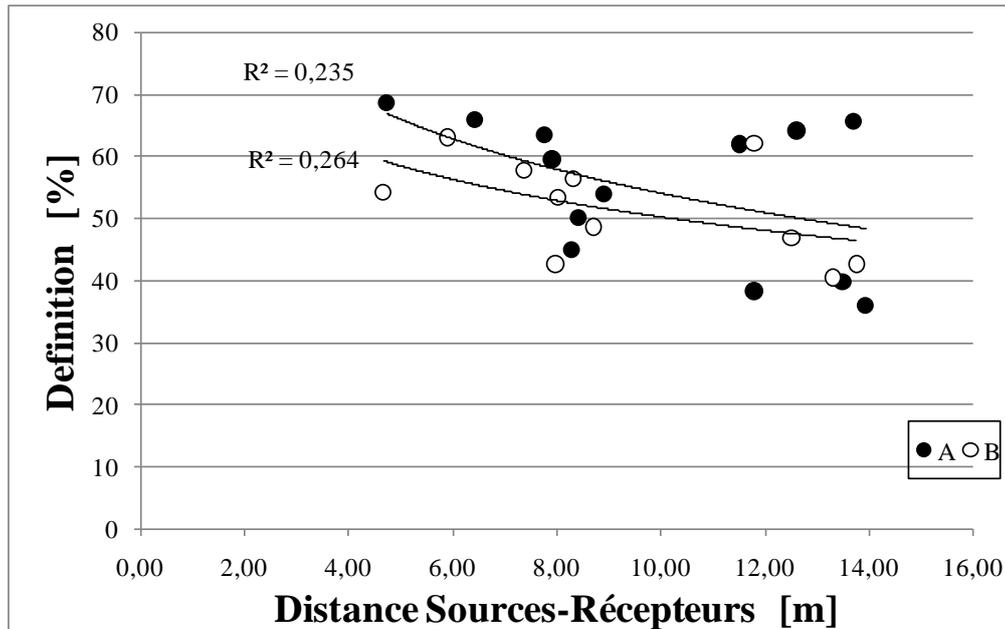


Figure 6.11. Valeurs de Définition (D_{50}) dans la mosquée **Safir**. (Source :Benferhat, 2022)

6.1.3.3. LA CLARTE (C_{50}).

Dans la mosquée Safir, la valeur moyenne du C_{50} en fréquences moyennes pour la source A est d'environ 0,8 dB, alors que pour la source B, elle est de 0,35 dB. Ces valeurs élevées résultent à la fois de la durée de réverbération plus courte et de la courte distance entre la source et les récepteurs (maximum 15 m), ce qui a permis d'éviter les bruits de fond et garantir une bonne contribution du son direct et des premières réflexions (Benferhat et al, 2022).

Une dispersion significative des valeurs a de nouveau été observée par rapport à la courbe de régression. Il est clair que les récepteurs de A_7, A_8 et A_9 ont reçu des réflexions accrues de la paroi arrière (figure 6.12), ce qui a permis d'obtenir une meilleure clarté malgré l'éloignement par rapport à la source, tandis que les récepteurs de 12 à 16 présentaient des valeurs nettement inférieures (avec des différences allant jusqu'à 4 dB). Ceci est tributaire, probablement, de leur emplacement sur la mezzanine, dévoilant ainsi une atténuation du son direct et des réflexions précoces (figure 6.13) (Benferhat et al, 2022).

Des différences sont également perceptibles entre les sources A et B, avec des valeurs les plus élevées pour la source A. Ces différences peuvent sembler contre-intuitives, mais c'est habituel de constater une clarté plus faible lorsque avec la source est positionnée

en « B », probablement en raison de la plus mauvaise visibilité des récepteurs (obstruction entre la source B et certains récepteurs par le Minbar) (Benferhat et al, 2022).

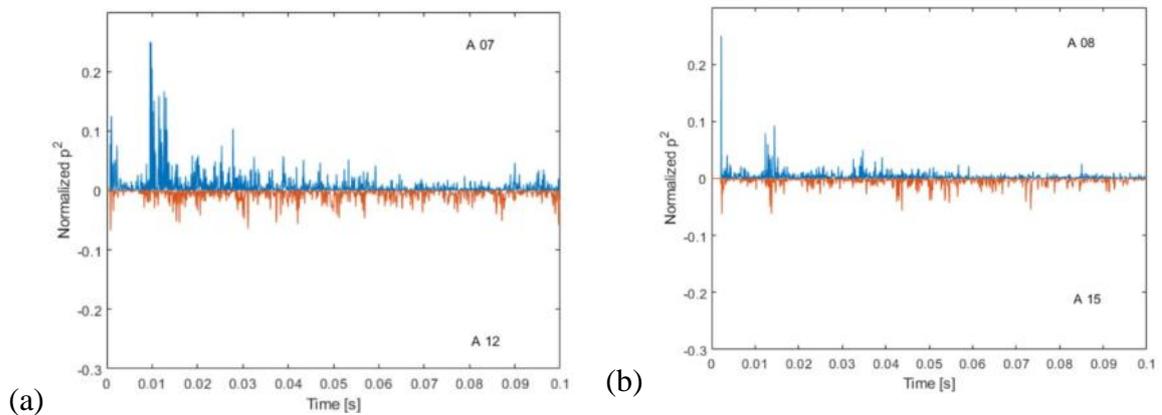


Figure 6.12 Comparaison de la pression au carré pour les récepteurs : (a) A_07 et A_12, (b) A_08 et A_15. (Source : Benferhat, 2022)

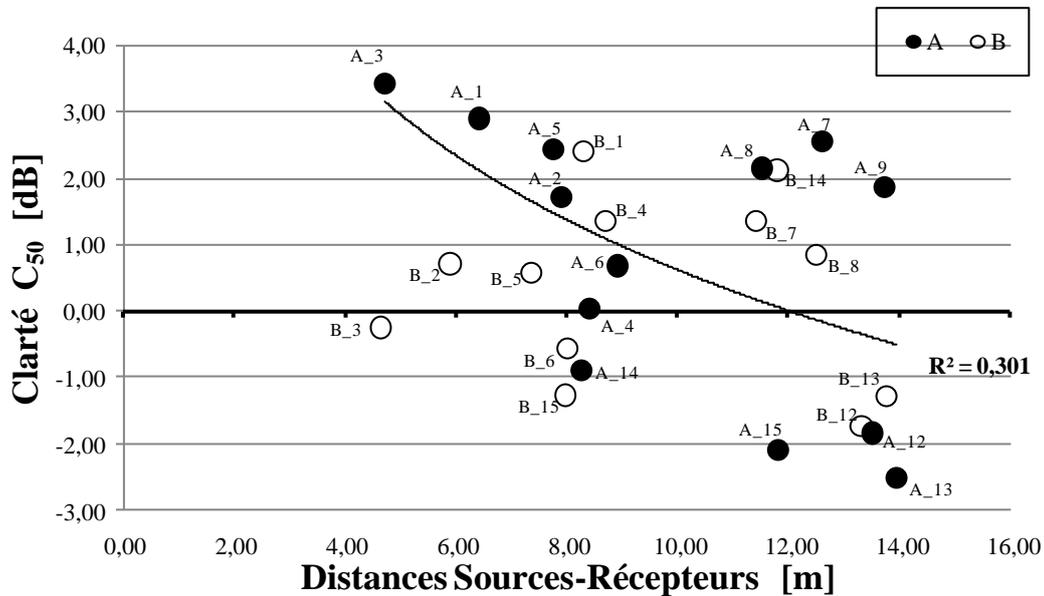


Figure 6.13. Valeurs de la Clarté (C_{50}) en fréquences moyennes (500Hz-1kHz) en fonction de la distance. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.3.4. INDEX DE TRANSMISSION DU SON (STI).

Les valeurs STI ont confirmé la tendance positive soulignée par C_{50} , avec des valeurs moins dispersées et toujours autour et/ou au-dessus de 0,60. Ces résultats prouvent une très bonne intelligibilité presque partout dans la salle de prière. Seul le récepteur A_4 (situé sous le demi-dôme) affiche une valeur STI de 0,59 pour la source A (Mihrab). Aucune différence significative n'apparaît entre les récepteurs symétriques. La mosquée

Safir possède les meilleurs résultats parmi les trois mosquées étudiées (Benferhat et al, 2022).

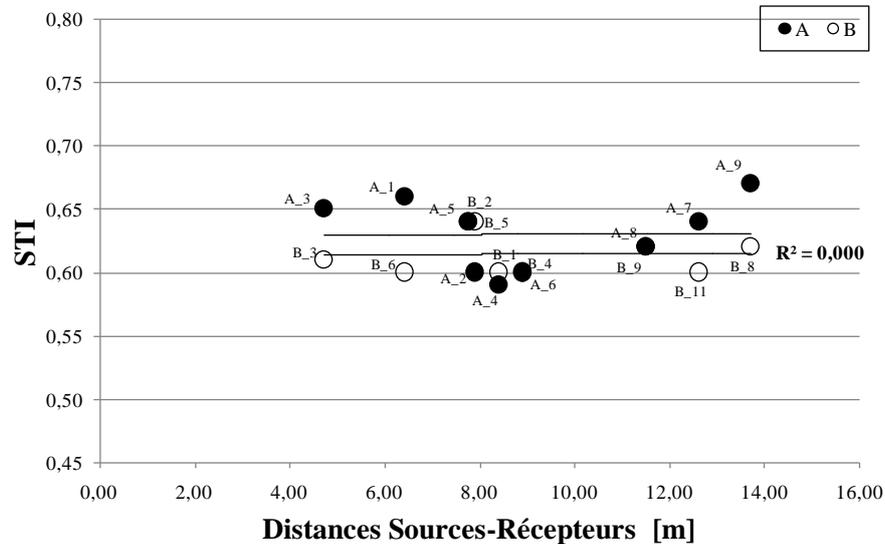


Figure 6.14. Valeurs Du STI en fréquences moyennes (500Hz-1kHz) en fonction de la distance. (Source : Benferhat, 2022)

6.1.4. INTERPRETATIONS DES MESURES IN-SITU.

Pour les trois mosquées, les valeurs d'EDT sont très proches de T_{20} , en particulier pour les mosquées Djedid et Safir. A partir de la figure 6.15 (a), (b) ; il paraît que les deux mosquées Djedid et Ali-Bitchine ont un comportement sonore similaire, notamment en moyennes et hautes fréquences ; dont la mosquée Ali-Bitchine atteint des valeurs de T_{20} et EDT très élevées malgré son volume moyen. En basses fréquences la différence a été renvoyée à l'importante présence du bois dans la mosquée Djedid. La mosquée Safir présente des T_{20} et EDT très courts ; vu sa taille petite et la forte absorption du à la moquette et au bois employé pour la mezzanine (surtout pour séparer l'espace réservé aux femmes). Il est clair que la suppression probable du *Mahfil*, à la mosquée Ali-Bitchine, soit à l'origine du temps de réverbération long.

Dans la mosquée Djedid, l'EDT présente une corrélation régulière avec la distance ($R^2=0,83$) (figure 6.1), plus importante que celle de la mosquée Ali-Bitchine ($R^2=0,54$) (figure 6.5). En revanche, dans la mosquée Safir ; la plus petite parmi les trois, les valeurs de l'EDT dévoilent une légère dépendance à la distance source-récepteur (figure 6.9). Il est possible de conclure que l'importance de la décroissance s'accroît avec l'importance du volume (le cas de la mosquée Djedid).

Quant à la définition (D_{50}) et à la clarté (C_{50}) ; les graphiques de comparaison (figure 6.15, (c), (d)) illustrent que les deux mosquées atteignent les niveaux les plus bas en moyennes fréquences, contrairement à la mosquée Safir. Ce qui signifie que les deux premières mosquées se caractérisent par une importante énergie tardive en comparaison avec l'énergie directe (réverbération importante), contrairement à la mosquée Safir (absorption importante).

La comparaison entre les graphiques du STI en fonction de la distance (pour les trois mosquées) révèle que pour des distances plus importantes, la mosquée de Safir offre une meilleure intelligibilité en comparaison avec les mosquées Djedid et Ali-Bitchine. Ces deux dernières, étant trop réverbérantes, présentent des risques d'incompréhension du message sonore lors des prières et/ou *Khotba*.

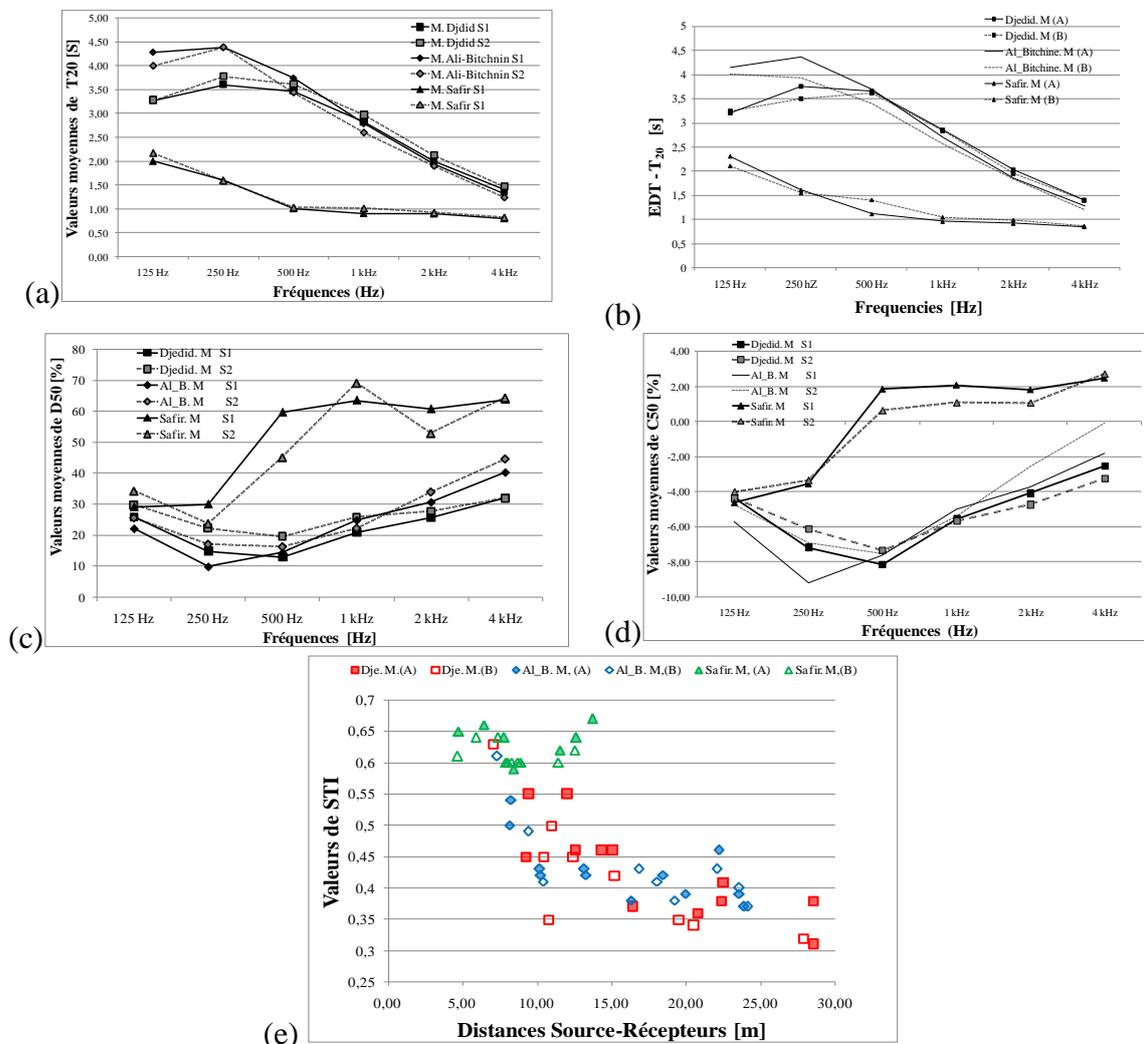


Figure 6.15. Comparaison des différents paramètres acoustiques entre les trois mosquées : (a) T20, (b) EDT, (c) D50, (d) C50, (e) STI. (Source : Benferhat, 2023)

Les trois mosquées objet de cette thèse ont été comparées avec les résultats cités dans la littérature, notamment la mosquée de *Sokullu* (une ancienne mosquée ottomane classique) et la mosquée de *Sisli* (une mosquée contemporaine conçue en béton selon une typologie ottomane) (Karabiber, Z. et S. Erdogan, 2002). Le choix de ces deux mosquées est fait en raison de leurs volumes comparables avec la mosquée Ali-Bitchine (figure 6.16), ainsi qu'à la disponibilité dans la littérature des valeurs des paramètres acoustiques pour les différentes bandes de fréquences.

La comparaison du temps de réverbération à toutes les fréquences entre les cinq mosquées révèle un comportement acoustique similaire entre la mosquée Ali-Bitchine et la mosquée *Sokullu*. La mosquée Djedid connaît également une évolution comparable du temps de réverbération à toutes les fréquences, à l'exception en basses fréquences. Par ailleurs, la mosquée de *Sisli* présente un temps de réverbération plus élevé en basses et moyennes fréquences (125-250 Hz et 500 Hz).

Pour les mosquées algériennes, l'augmentation du temps de réverbération en basses fréquences est de 6,08%, 25,71% et 46,74% respectivement, pour les mosquées Djedid, Ali-Bitchine et Safir ; ce qui signifie un résultat acceptable pour la mosquée Djedid conformément à Abdou ((Abdou, A.A, 2003).

La courbe du temps de réverbération (T_{20}) en fonction du volume (figure 6.17), est en parfait accord avec les valeurs observées dans les anciennes mosquées ottomanes (Sokollu masjid) (Topaktaş, 2003 ; Eldien, et Al Qahtani, 2012). En référence aux volumes ; la mosquée Djedid (10309m^3) présente un temps de réverbération plus court ($T=3.32$ s) en comparaison avec la mosquée Sokollu ($T=3.02$ s pour un volume de 5700m^3); ou encore la mosquée Ali-Bitchine (le volume le plus petit : 2742m^3) caractérisée par le plus long temps de réverbération $T=3.02$ s ; en rapport bien sûr avec son volume. La mosquée Safir présente le temps le plus court (1.02 s), qui correspond plus à son petit volume (1500m^3) (Karabiber, et Erdogan, 2002 ; Eldien, et Al Qahtani, 2012).

En général, le diagramme de comparaison montre que les mosquées, quelle que soit leur époque, prouvent une forte corrélation entre le volume et le temps de réverbération, particulièrement pour les volumes supérieurs à 2000m^3 . Évidemment ; les petites mosquées sont généralement beaucoup moins réverbérantes.

Selon les (figure 6.16, figure 6.17), les mosquées algériennes d'origine ottomane, ont un profil acoustique similaire à celui des mosquées ottomanes de Turquie (*Sokullu. M, Mihrima. M, Ahmet Pasha. M*) (Topaktaş, 2003). De plus, la comparaison entre les mosquées de volumes similaires; telle que la mosquée d'Ali-Bitchine (2742m³) avec la mosquée d'*Ahmet Pasha* (2900m³) est en faveur d'un temps de réverbération un peu plus court à la mosquée Ali-Bitchine (3,15 s contre 3,60 s à *Ahmet Pasha*. La mosquée ottomane Ketchaoua (Aleshkin et al, 2021), récemment restaurée, bien qu'ayant un volume similaire à celui de la mosquée Djedid (respectivement 11 000 m³ et 10 309 m³), présente un T₂₀ plus court (2,79 s) que celui de la mosquée Djedid (3,18 s).

La tendance des temps de réverbération en cas d'inoccupation suit une loi de puissance en fonction du volume, avec un coefficient de régression significativement élevé, ce qui est cohérent avec le comportement observé dans d'autres bâtiments de culte, telles que les églises catholiques et orthodoxes.

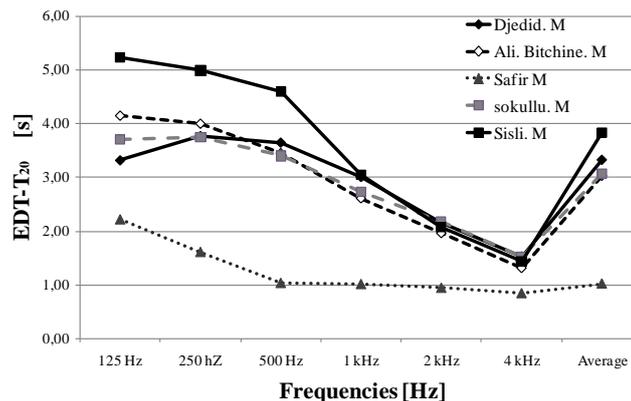


Figure 6.16. comparaison des valeurs moyennes d'EDT-T20 entre les mosquées (Djedid, Ali-Bitchine, Safir et Sisli, Sokullu). (Source : Benferhat, 2023)

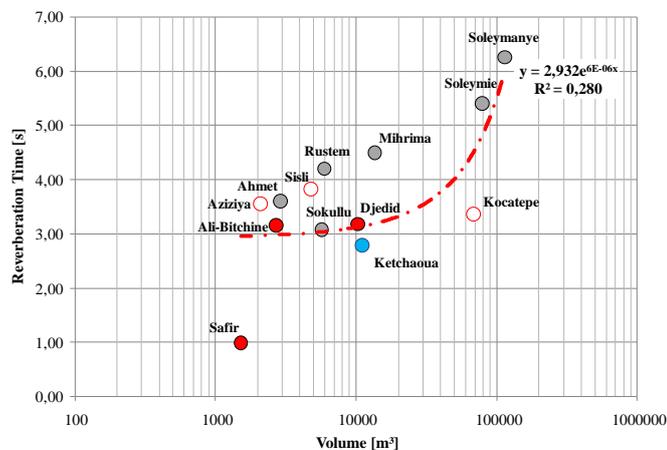


Figure 6.17. Corrélation Temps de réverbération –Volume entre les mosquées étudiées et les résultats de la littérature sur les mosquées Ottomanes en Turquie. (Source : Benferhat, 2023).

D'autres conclusions sur les résultats obtenus pourraient être établies en termes de volume par personne. En référence à Maekawa et Lord (Maekawa et Lord, 1993) ; le taux V/C (Volume/personne) recommandé est compris entre 4 et 6 m³/pers, mais cet intervalle a été jugé comme insuffisant (Elkhateeb., 2015, 2016, 2019), qui à son tour revendique des valeurs allant jusqu'à 15 m³/pers, dans des mosquées historiques.

Pour les trois mosquées considérées dans cette étude, les valeurs varient entre 4,1 m³/pers à Safir et 11,3 m³/pers à Djedid, passant par Ali-Bitchine étant plus proche de la limite inférieure avec un volume de 5,5 m³/pers. Ces valeurs confirment clairement la vocation à une plus grande clarté des deux plus petites mosquées, alors que Djedid semble apparemment se démarquer.

Comme indiqué dans le graphique du temps de réverbération représenté en fonction du volume par personne (figure 6.18), qui inclut de nombreuses mosquées ottomanes, il s'avère que la plupart des espaces historiques sont généralement caractérisés par des valeurs supérieures à 10m³/pers. Une augmentation adéquate du nombre de masjids à inclure dans une telle analyse pourrait contribuer à mieux clarifier cette question dans le futur.

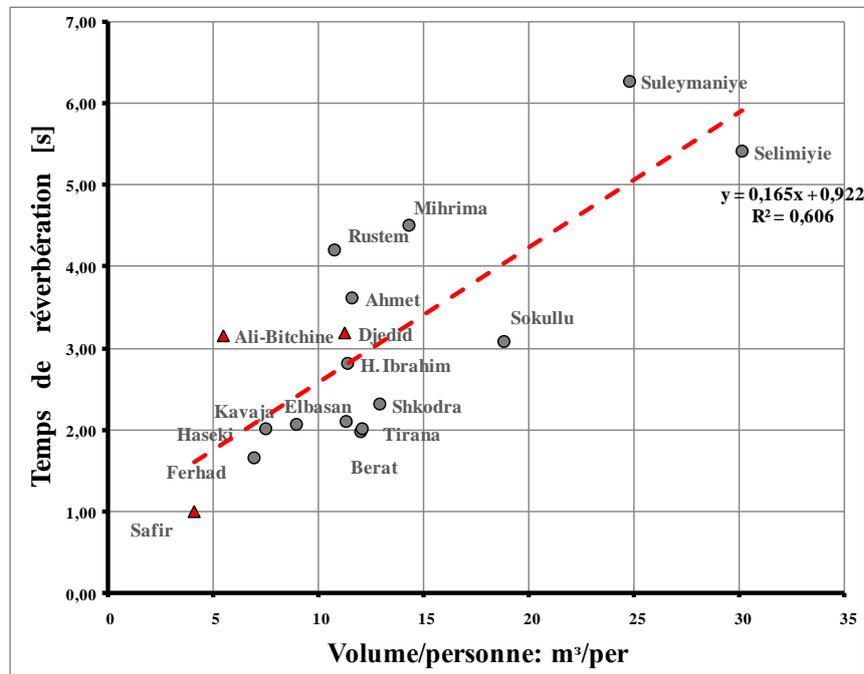


Figure 6.18. Corrélation du Temps de réverbération en fonction du Volume/personnes (T_{20} -V/per). (Source : Benferhat, 2022)

6.2. SIMULATIONS PAR CALCUL NUMERIQUE.

6.2.1. RESULTATS DE LA SIMULATION NUMERIQUE.

Selon les méthodes décrites dans le chapitre cinq (V) (Oldham, 2008 ; Elkhateeb, 2019 ; Sabbagh, 2021), les conditions d'occupation des trois mosquées peuvent être obtenues à l'aide de la simulation numérique. Cette dernière se base sur l'utilisation de formules de prédiction en supposant qu'une personne occupe une surface au sol de 80 cm sur 120 cm afin de les évaluer. Les résultats obtenus sont présentés dans la (figure 6.19) (Benferhat et al, 2022).

Les résultats du temps de réverbération, en situation d'occupation complète (figure 6.19), dévoilent une diminution impressionnante aux mosquées Djedid et Ali-Bitchine, avec des valeurs ayant chuté en fréquences moyennes jusqu'à 1,2 s et 0,8 s respectivement (Benferhat et al, 2022).

À Safir, en raison de la réverbération déjà courte, la variation est moins impressionnante, mais la valeur prédite a baissé jusqu'à 0,5 seconde. Aux hautes fréquences, des valeurs similaires ont été trouvées, alors qu'en raison de l'absorption sonore beaucoup plus faible en basses fréquences, il en résulte un déséquilibre tonal significatif, en particulier à Ali-Bitchine où le T_{20} à 125 Hz a atteint 3,9 secondes. Cependant, en ce qui concerne la parole, avec des résultats plus pertinents en moyennes fréquences (entre 250 et 2000 Hz), ce déséquilibre ne devrait causer qu'un effet négatif limité, mais il faut en tenir compte en ce qui concerne l'amplification des bruits indésirables en basses fréquences, provenant également de l'extérieur (Benferhat et al, 2022).

Compte tenu de la forte influence de l'absorption induite par les occupants, on s'attend à de grandes variations de l'acoustique des mosquées en présence d'un nombre variable de fidèles. Afin de ne pas encombrer la figure 6.19 avec plusieurs données, le tableau 1 résume les valeurs T_{20} en moyenne fréquence prédites pour différents niveaux d'occupation. Il est intéressant de noter que même avec seulement 1/3 des occupants répartis sur la surface au sol (approximativement l'occupation durant les prières quotidiennes), T_{20} a été presque réduit de moitié dans les deux mosquées les plus réverbérantes. À Safir, grâce à la fraction comparativement plus élevée de surfaces absorbantes, la variation était plus faible, mais néanmoins significative, ce qui souligne le rôle des occupants dans des bâtiments aussi grands et réfléchissants. Avec 2/3 des

occupants en place, le temps de réverbération a encore été réduit, offrant un son sec et clair dans tous les espaces sélectionnés (Benferhat et al, 2022).

Tableau 6.1. Temps de réverbération en situation d'Occupation (T_{occ}). (Source : Auteur)

Masjids	T_u	$T_{mid, 1/3 occup}$ (s)	$T_{mid, 2/3 occup}$ (s)	$T_{mid, full}$ (s)	$T_{Kayyili}$ (s)
Djedid	3.18	2.07	1.51	1.29	2.29
Ali-Bitchine	3.15	1.94	1.14	0.80	1.93
Safir	0.99	0.76	0.61	0.51	1.81

En raison de la modification significative du temps de réverbération, on s'attendait à ce que la clarté (et l'intelligibilité de la parole) puisse également bénéficier largement de cette absorption supplémentaire due aux occupants (Benferhat et al, 2022).

Grâce au "modèle affiné" déjà appliqué pour valider la fiabilité du modèle dans des conditions d'inoccupation, la figure 6.20 résume la nouvelle distribution des différentes valeurs C_{50} calculées en fréquences moyennes en fonction de la distance.

Afin de fournir un plus large champ d'analyse, en tenant compte des tendances similaires observées dans les valeurs mesurées de C_{50} et de STI, et de l'importance d'une telle corrélation entre ces deux paramètres conformément à la littérature existante ; la figure 6.20(b) présente le tracé de STI en fonction de C_{50} , pour l'ensemble des mosquées et indépendamment de la position de la source sonore (A et/ou B). Il en ressort une excellente corrélation, qui pourrait être utilisée pour obtenir une fonction de régression afin d'exprimer également les valeurs STI en fonction de C_{50} et, par conséquent, de mieux interpréter les valeurs prédites données dans la figure 6.20(a).

On peut observer qu'à la mosquée Djedid, la nouvelle valeur moyenne était de -1,4 dB contre la précédente valeur de -7,2 dB et que la distance de la source à laquelle on peut désormais obtenir des valeurs acceptables s'étend jusqu'à 15 m environ. À Ali-Bitchine, une amélioration similaire de -7 à 0,7 dB a été observée pour les valeurs moyennées de clarté dans l'ensemble de l'espace. Tous les récepteurs ayant des valeurs supérieures à -1 dB et la plupart d'entre eux ayant des valeurs positives (Benferhat et al, 2022). D'après l'équation de régression, cela signifie que la valeur de STI doit être toujours supérieure au seuil de Yilmazer et Acun, supposé être de 0,56 (Yilmazer et Acun, 2018).

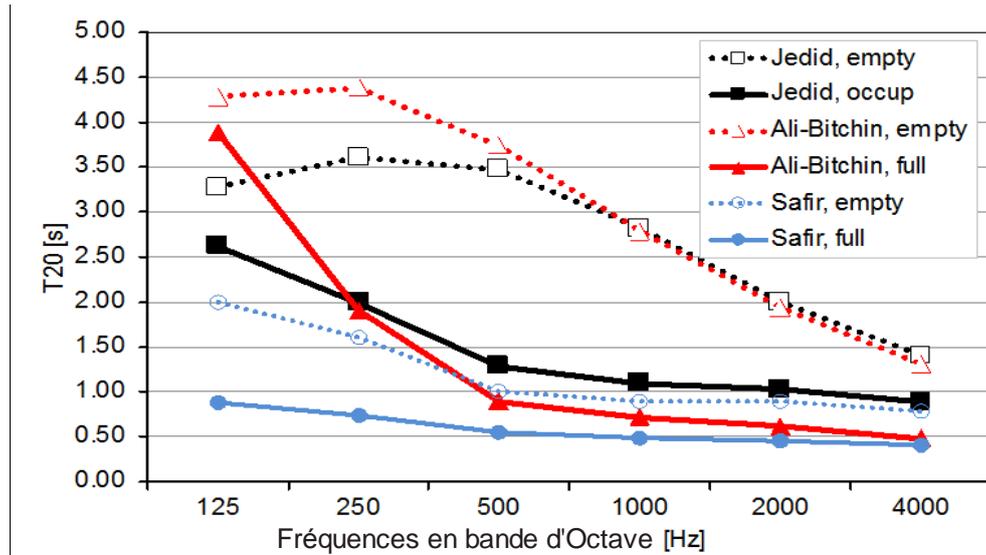


Figure 6.19. Comparaison du Temps de réverbération des trois mosquées entre situation d'inoccupation et d'occupation. (Source : Benferhat et al, 2022)

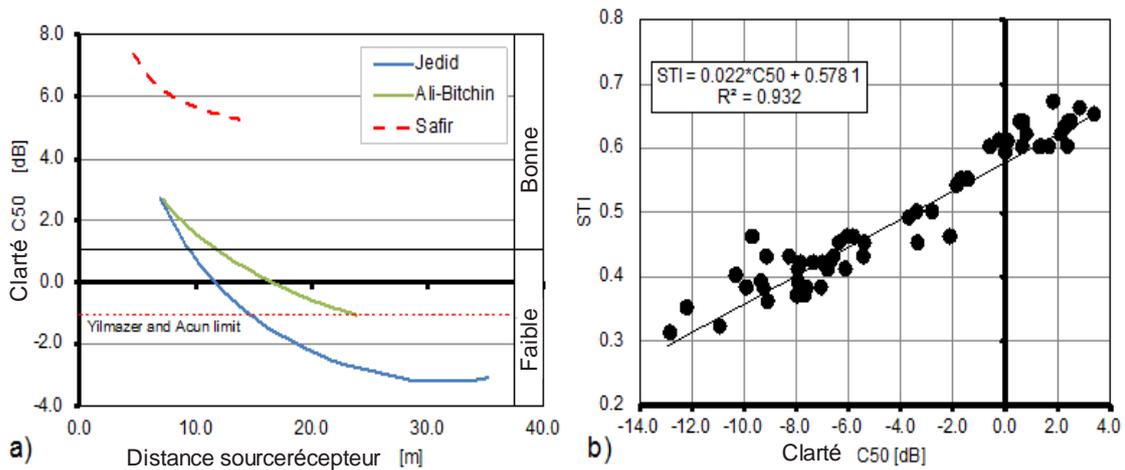


Figure 6.20. Comparaison du Temps de réverbération des trois mosquées entre situation d'inoccupation et d'occupation. (Source : Benferhat et al, 2022)

6.2.2. INTERPRETATION DES RESULTATS EN SITUATION D'OCCUPATION.

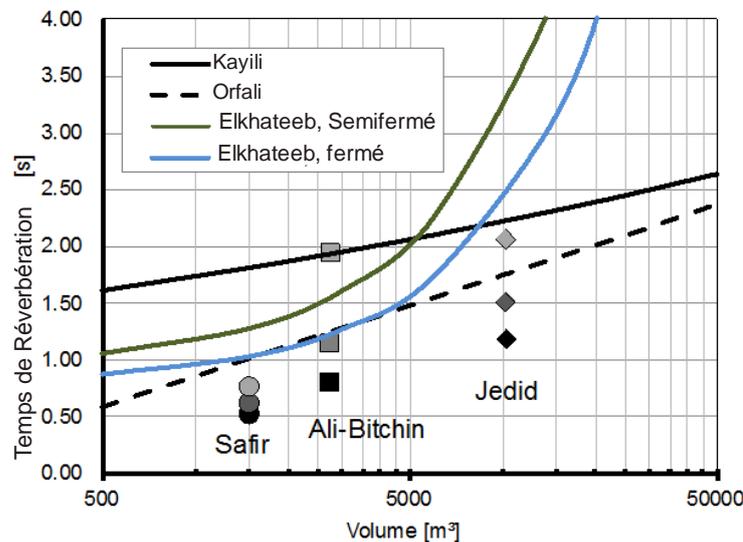
Le calcul des valeurs en conditions "d'occupation" pour les trois mosquées a permis de comprendre que les conditions acoustiques des espaces étudiés ne sont pas exactement en faveur d'une clarté appropriée à la parole dans une mosquée, même en présence d'un nombre limité de fidèles, les changements peuvent paraître très significatifs (Benferhat et al, 2022).

Une comparaison avec les valeurs de référence (Kayili, 2005 ; Orfali, 2007), montre dans la figure 6.21 ; que les trois mosquées semblent être relativement proches de la

fourchette du "consensus" tant que le taux d'occupation reste à 1/3. Inversement, en présence de niveaux d'occupation plus élevés ; 2/3 et 3/3 (plus appropriés pour les prières de vendredi et l'Aïd), les trois mosquées offrent un environnement sonore trop sec (sans réverbération). Cela pourrait être considéré comme une opportunité (avantage) pour la clarté (C_{50}), mais en contre partie, il ne semble pas convenir à l'atmosphère (environnement= vécu) souhaitée dans les lieux sacrés, qui nécessitent souvent un temps de réverbération encore plus long (Benferhat et al, 2022 ; Elkhateeb, 2015, 2016, 2019). Dans les trois cas cela semble loin d'être atteint (Benferhat et al, 2022).

La présence de mezzanines aux deux mosquées Djedid et Safir accentue encore cet effet de "surpeuplement", tandis qu'à la mosquée Ali-Bitchine, les conditions acoustiques restent plus équilibrées et appropriées à un espace de culte, même avec les 2/3 du niveau d'occupation maximum (Benferhat et al, 2022).

Cependant, l'analyse des conditions d'occupation laisse penser que même des valeurs comprises entre 10 et 15m³/pers pourraient ne pas suffire à fournir la réverbération attendue pour un espace de culte (Benferhat et al, 2022).



Conditions d'Occupation : ● 1/3 occup, ● 2/3 occup, ● entièrement occup

Figure 6.21. Comparaison des valeurs de T_{occup} avec le temps optimal recommandé par (Kayili, 2005), et (Orfali, 2007). (Source : Benferhat et al, 2022)

6.3. L'Enquête.

6.3.1. Résultats.

6.3.1.1. LA MOSQUEE DJEDID.

La comparaison entre les trois graphiques (figure 6.23) révèle des similitudes entre les appréciations de la distance chez les hommes et les femmes. L'indicateur de l'âge semble influencer l'appréciation de la distance, surtout pour les tranches d'âge 20-40 ans et 40-60 ans. Les personnes interrogées âgées de plus de 60 ans manifestent une meilleure appréciation pour les enregistrements effectués à petite distance (position proche de la source : B_02). Il n'y a pas de cohérence entre les réponses des interviewés quant au degré de fréquentation de la mosquée. La subjectivité est très visible dans l'évaluation de la distance par chaque catégorie. Cependant, la comparaison entre les trois positions étudiées (B_02, B_05 et A_06) montre une cohérence entre l'évolution de la distance et sa perception par chacune des catégories (figure 6.23).

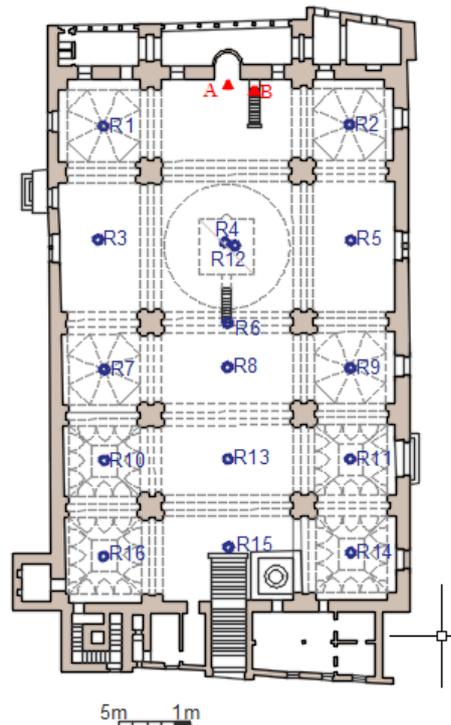


Figure 6.22. Position des récepteurs dans la mosquée Djedid. (Source : Benferhat, 2023)

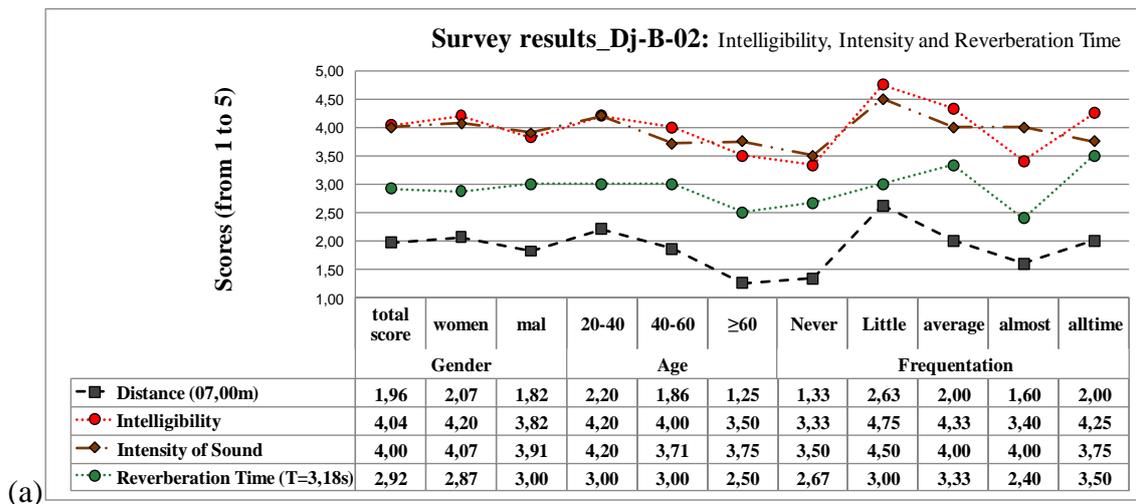
En termes d'intelligibilité, les femmes évaluent mieux l'intelligibilité lorsqu'elles sont proches de la source (B_02), contrairement aux hommes qui donnent des scores plus élevés lorsqu'ils sont plus éloignés de la source (il semblerait que les hommes apprécient

les espaces réverbérant contrairement aux femmes). L'âge affecte également l'intelligibilité ; par rapport à la distance, l'âge peut jouer un rôle déterminant. D'après la figures 6.23 (a, b, c), quand la source est relativement proche, le score d'intelligibilité est d'autant plus élevé que l'âge est élevé. Cependant, dans le cas des deux récepteurs (B_05 et A_06) qui se trouvent au-delà de 12 m, les deux tranches d'âge (20-40 ans et ≥ 60 ans) se rapprochent, tandis que la tranche d'âge (40-60 ans) conserve le même score d'intelligibilité (4 sur une échelle de 5). Le degré de fréquentation de la mosquée semble ne pas constituer un facteur influençant l'intelligibilité.

Le genre (homme/femme) est sans influence sur l'évaluation de l'intensité sonore. De même, l'âge paraît négligeable, bien que la catégorie (40-60 ans) obtienne souvent des scores plus élevés (pour les récepteurs éloignés) : B_05 et A_06. De plus, le facteur de la fréquentation se révèle aussi non déterminant.

Les scores pour l'évaluation de la réverbération sont assez proches entre le score total et les catégories de genre et d'âge. Les variations sont apparentes entre les différentes catégories de fréquentation de la mosquée. Par ailleurs, une disparité des scores est constatée selon les valeurs pour les différents niveaux de fréquentation.

Le graphique de synthèse (Figure 6.24), fait état de l'influence absolue de la distance sur les paramètres acoustiques évalués par les utilisateurs. Au fur et à mesure que l'on augmente la distance entre la source et le récepteur (quelle que soit la source : A, B), on constate que les réverbérations augmentent et que l'intensité et l'intelligibilité diminuent.



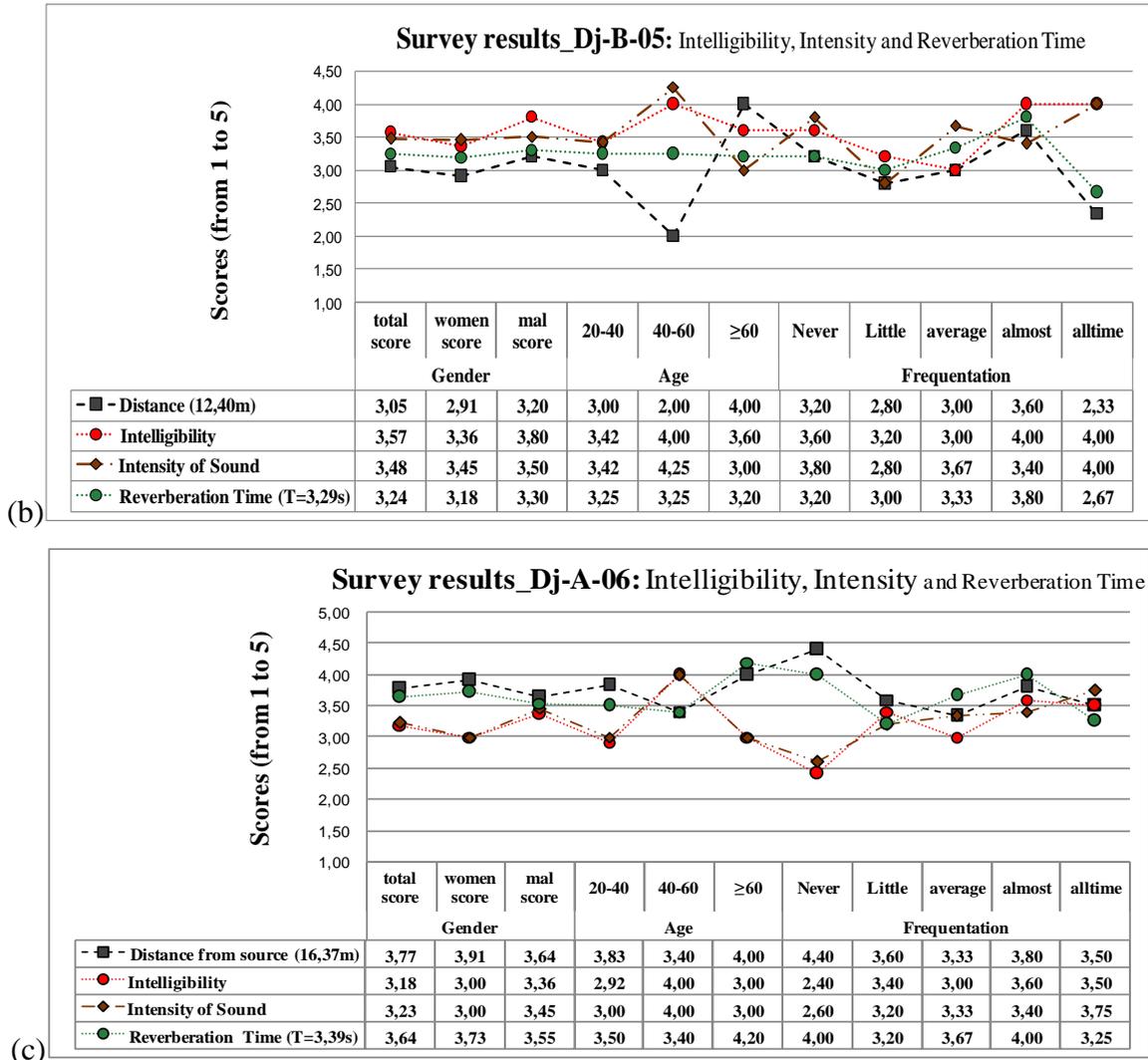


Figure 6.23. Graphiques des résultats de l'enquête à la mosquée Djedid. (Source : Benferhat, 2023)

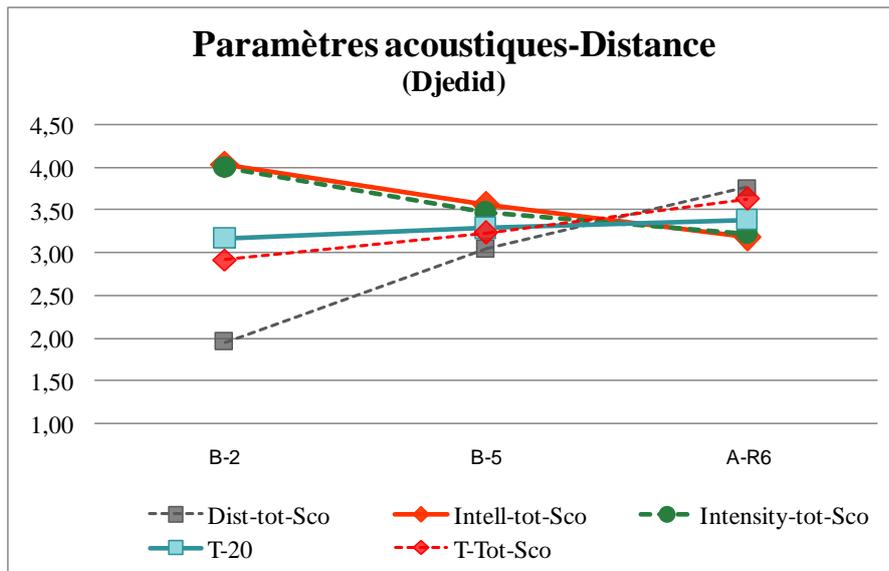


Figure 6.24. Corrélation entre la distance des récepteurs et les scores de l'enquête à la mosquée Djedid. (Source : Benferhat, 2023)

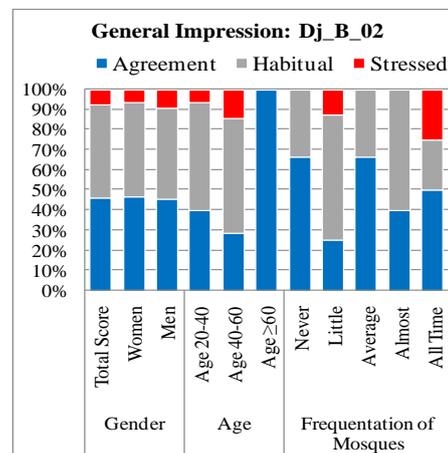
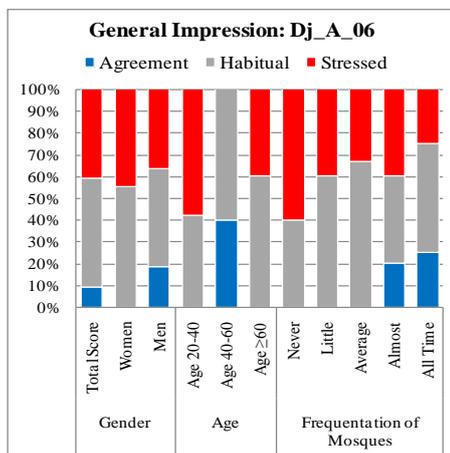
Pour les trois positions sélectionnées (B_02, B_05 et A_06), il semblerait que la distance source-récepteur soit décisive ; avec des distances de : 07.00m, 12.40m et 16.37m, relatives aux temps de réverbération : 3,18s, 3,29s et 3,39s.

En effet, on observe de manière générale, que plus la distance entre le récepteur et la source est grande, plus l'appréciation d'Agrément diminue, conduisant à un sentiment de Stress. L'impression D'agrément est plus ressentie au niveau du récepteur B_02, avec un taux de 100% auprès de la catégorie " d'âge ≥ 60 ans ". Des taux aussi élevés pour les catégories de personnes qui fréquentent le moins les mosquées (*Never, Average*). A partir du récepteur B_05, situé à 12,40m de la source, la perception d'agrément diminue au profit d'une perception habituelle du message sonore, de manière similaire pour les deux genres (Hommes, Femmes) ; avec un accroissement du taux de stress pour toutes les autres catégories.

Plus le récepteur (le prieur) s'éloigne de la source à la mosquée Djedid (l'exemple du récepteur : A_06), plus l'impression d'agrément disparaît pour les femmes (Genre), pour la population la plus jeune (20-40ans) et pour celle plus âgée (≥ 60 ans), ainsi que pour les catégories qui fréquentent peu les mosquées (*Never, Little, Average*).

Il semble que les « Hommes » entre 40 et 60ans d'âge, qui sont les plus habitués des mosquées (prière tous les jours) tolèrent plus les conditions extrêmes.

En ce qui concerne la comparaison entre les différents enregistrements sonores des trois mosquées objet du cas d'étude, la mosquée Djedid présente des taux très faibles surtout pour les récepteurs lointains (B_05, A_06). Le récepteur « B_02 » révèle que certaines personnes interviewées peuvent apprécier un espace réverbérant (3.18s) caractérisé d'une importante intensité.



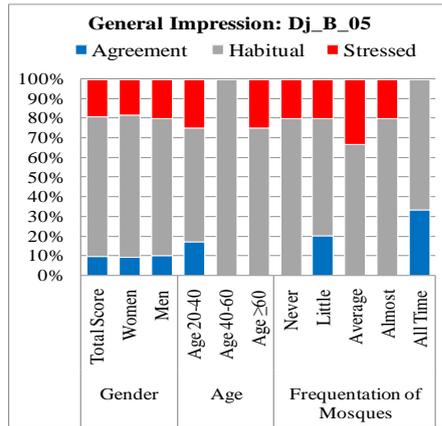


Figure 6.25. Appréciation générale des échantillons sonores choisis (A_06, B_02 et B_05). (Source : Auteur)

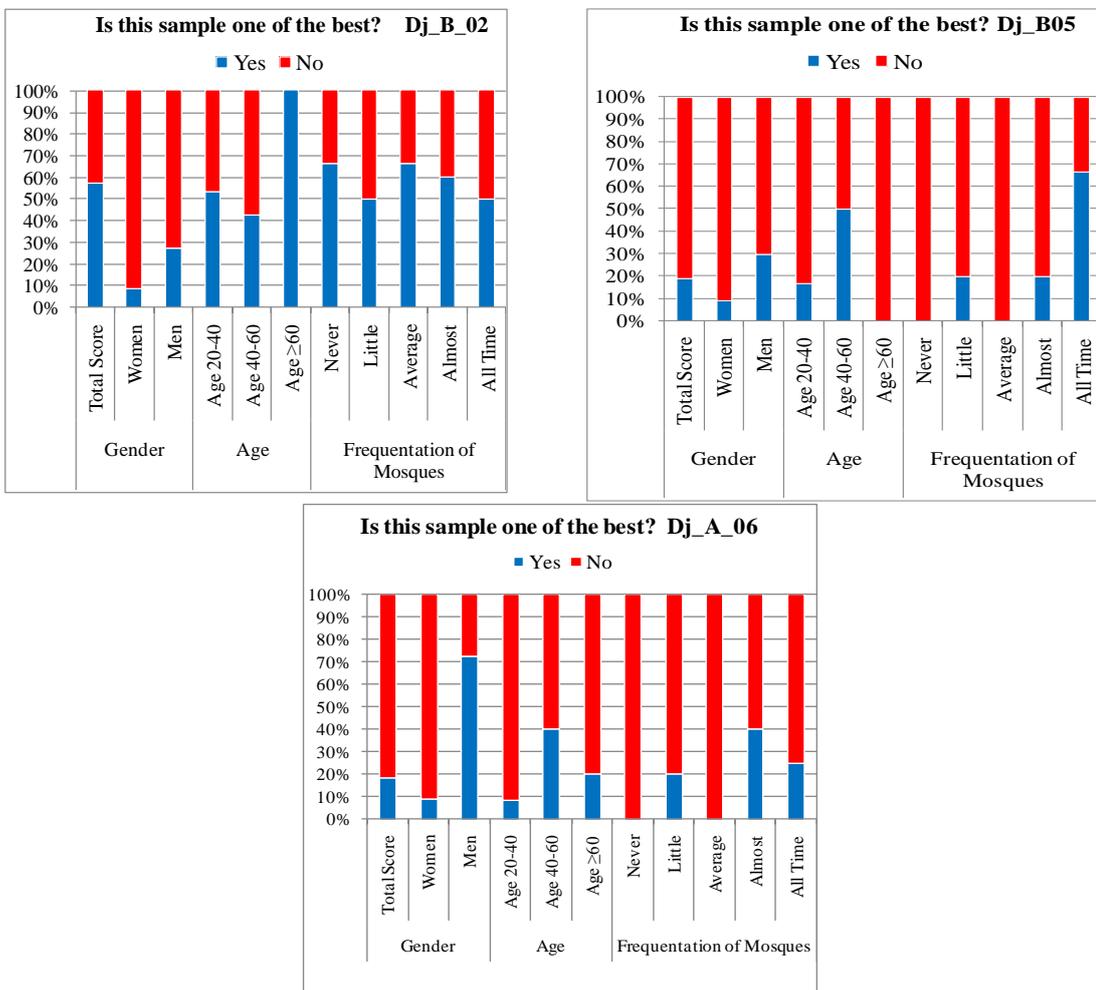


Figure 6.26. Réponses des interviewés sur la classification des échantillons sonores choisis (A_06, B_02 et B_05). (Source : Auteur)

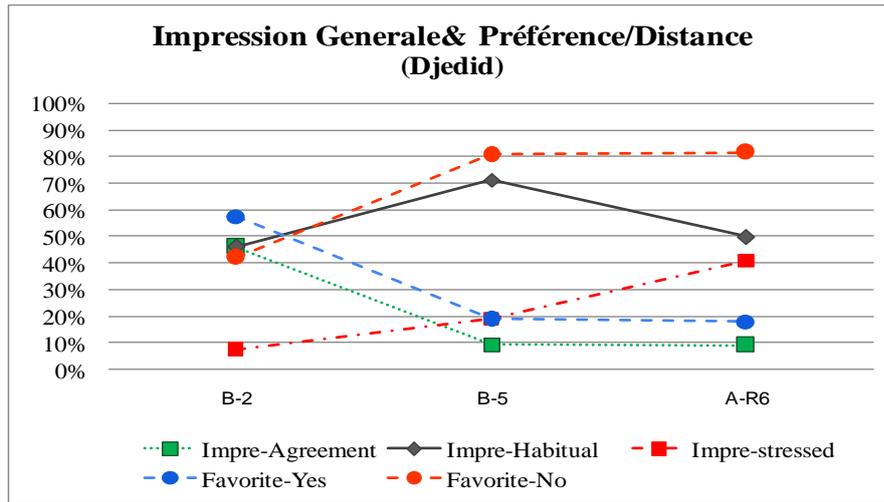


Figure 6.27. L'appréciation générale selon la distance. (Source : Auteur)

6.3.1.2. LA MOSQUEE ALI-BITCHINE.

La comparaison entre les cinq graphiques (figure 6.29 : (a), (b), (c), (d) et (e)) évoque une surestimation de la distance par les femmes, en comparaison avec les hommes, surtout pour les grandes distances (au-delà de 8 mètres).

Quant au critère d'âge ; la catégorie jeune (20-40ans) présente des scores proches aux scores de l'ensemble de personnes interviewées. Cependant la catégorie d'âge (40-60ans) manifeste des sous-estimations pour la source A et des surestimations pour la source B, contrairement à la catégorie d'âge de plus de 60ans.

En ce qui concerne le facteur de fréquentation des mosquées, il ne présente aucun ordre ni selon la distance (pour la même catégorie de fréquentation) ni entre les différents degrés (niveaux) de fréquentations. Donc ce dernier (fréquentation des lieux de culte) n'influence pas la perception de la distance, contrairement aux catégories de genre et d'âge.

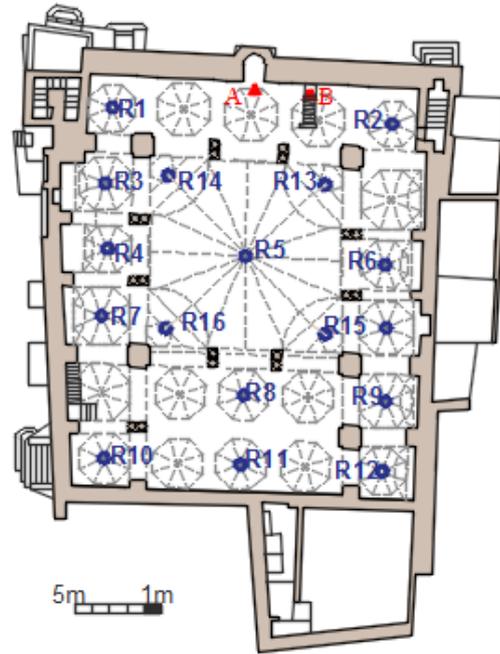


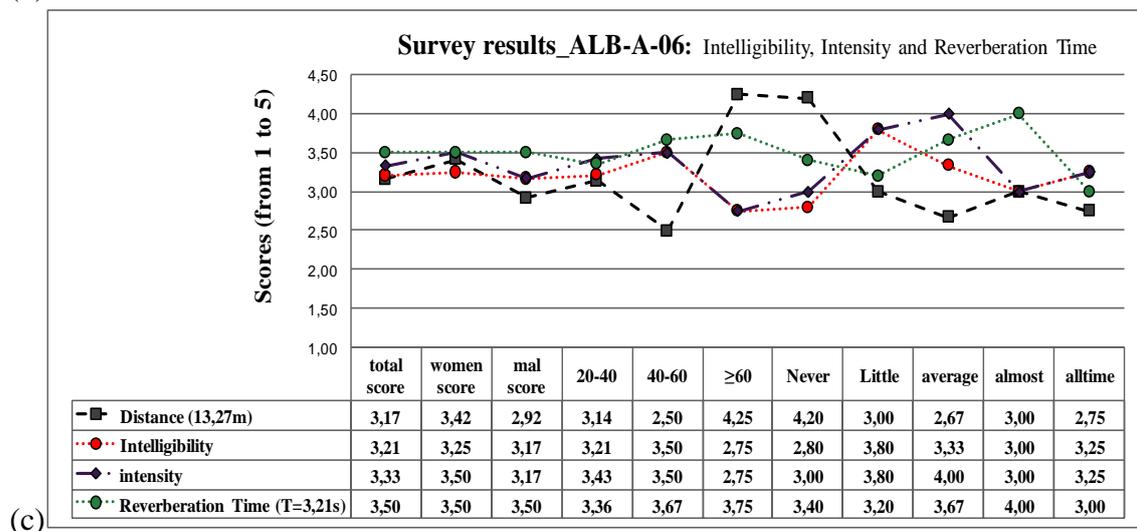
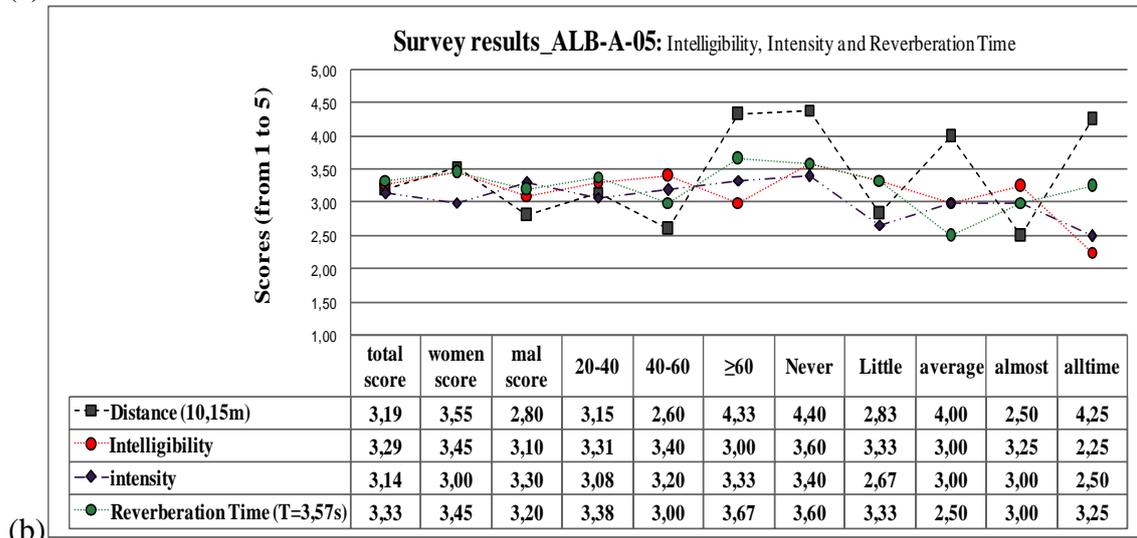
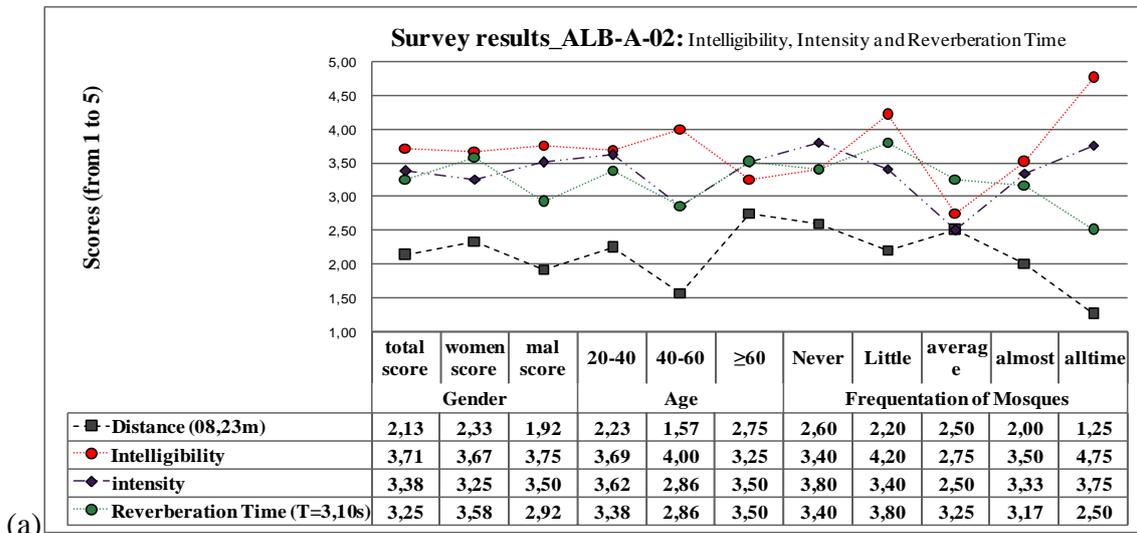
Figure 6.28. Positions des récepteurs dans la mosquée Ali-Bitchine. (Source : Auteur)

En matière d'intelligibilité, les scores entre femmes et hommes sont plutôt proches avec un taux souvent plus élevé chez les femmes à l'exception du récepteur 2 pour les deux sources (A, B). La perception de l'intelligibilité selon l'âge est dépendante de la position de la source. En fait, pour la source A (source au *Mihrab*), la catégorie d'âge (40-60ans) présente le score d'intelligibilité le plus élevé parmi les trois catégories d'âge, avec des valeurs proches de la catégorie des plus jeunes (20-40ans). En revanche, pour la source B (*Minbar*), la situation s'inverse, la catégorie (40-60ans) exprime des scores très bas, avec des valeurs plus proches de la catégorie d'âge des plus de 60ans. La catégorie des plus jeunes (20-40ans) manifeste des niveaux d'intelligibilité plus importants. Le degré de fréquentation ne dévoile pas une logique claire de l'évolution des scores (perceptions) de l'intelligibilité en rapport avec le degré de fréquentation.

L'intensité est aussi, différemment appréciée, entre hommes et femmes, tantôt les femmes expriment des scores plus hauts (A_06, B_05), tantôt ce sont les hommes (A_02, A_05 et B_02). Il semble que la combinaison Distance-Source est plutôt déterminante. Le degré de fréquentation des mosquées ne présente toujours pas une tendance ascendante ou descendante.

Enfin, en ce qui concerne la réverbération ; à la mosquée Ali-Bitchine, les femmes expriment des niveaux des réverbérations plus élevés que les hommes. Avec

l'augmentation de la distance par rapport à la source (récepteur A_06) les scores deviennent identiques (3.50/5 pour les deux genres : Hommes, femmes).



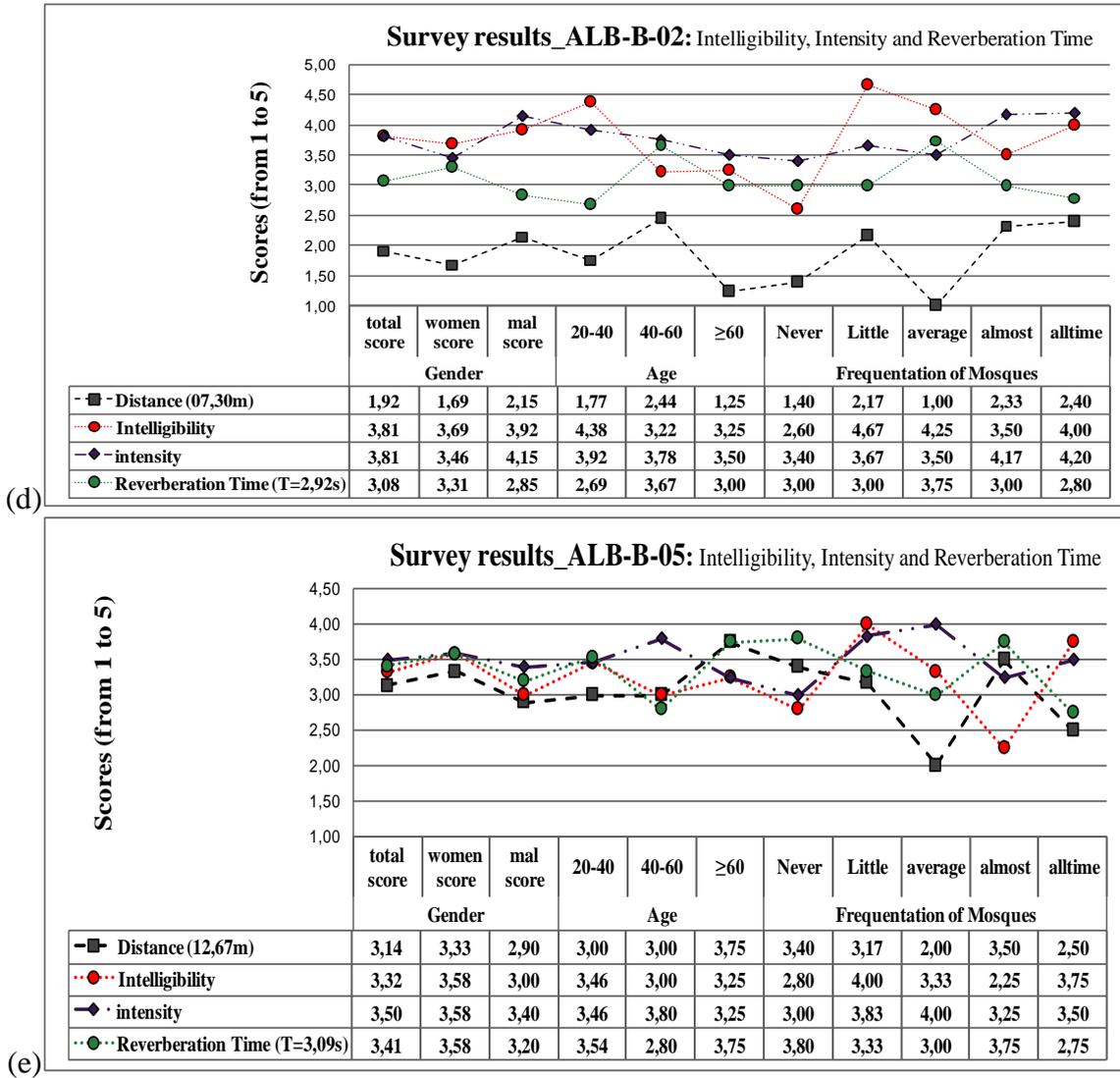


Figure 6.29. Graphiques des résultats de l'enquête à la mosquée Djedid. (Source : Benferhat, 2023)

A partir du graphique ci-après, nous notons une confirmation de l'influence de la distance Source-récepteur sur la perception de l'intelligibilité et de l'intensité du son par les usagers. Il semble aussi que la position de la source par rapport à la coupole centrale, en l'absence du *Mahfil* ait aussi un impact sur la perception de l'intensité du son (le cas du récepteur 5 : A_05, B_05).

L'intensité et l'intelligibilité évoluent de façon identique. Les scores de la réverbération ressentie par les interviewés correspondent au temps de réverbération mesuré (T₂₀). Une parfaite corrélation de perception des différents paramètres acoustiques (l'intelligibilité, l'intensité et la réverbération) avec la distance. Cependant, à partir du récepteur A_05 (sous la coupole centrale) les différences sont devenues négligeables. La

suppression (inexistence) du *Mahfil* au centre la salle de prière de la mosquée Ali-Bitchine avait influencé les résultats de la perception du message sonore.

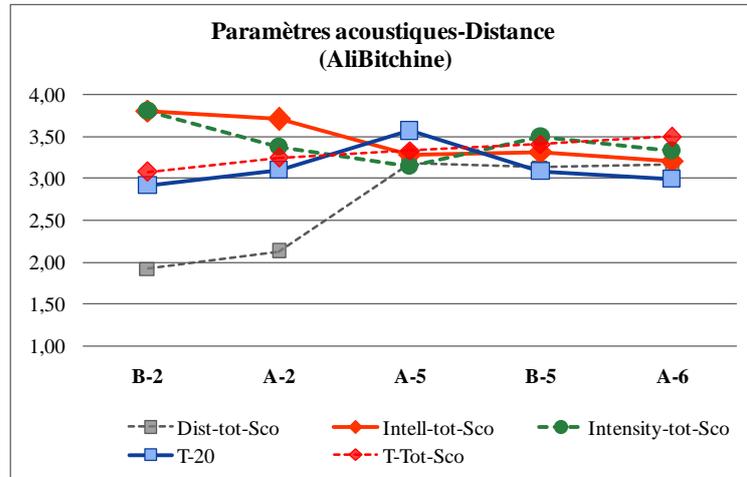
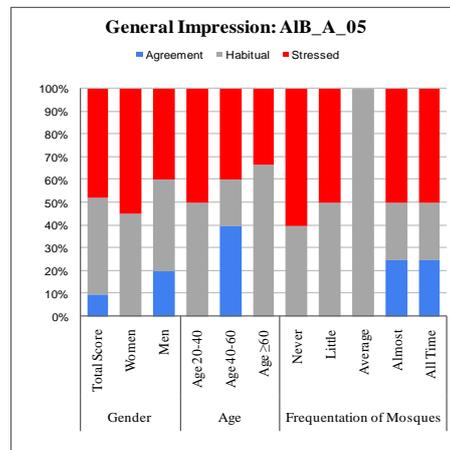
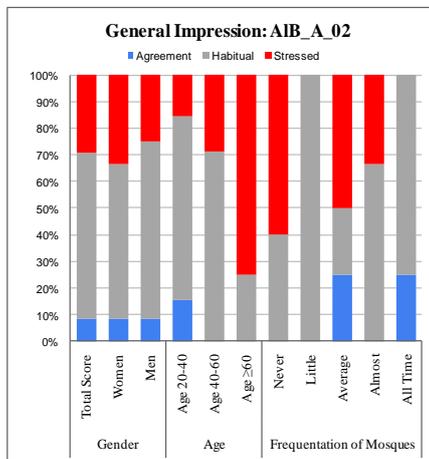


Figure 6.30. Corrélation entre la distance des récepteurs et les scores de l’enquête à la mosquée Djedid. (Source : Benferhat, 2023)

Dans le cas de la mosquée Ali-Bitchine l’impression générale reflète plus une sensation **habituelle** avec des niveaux de stress plus ou moins élevés. Le genre ne reflète aucune influence sur l’impression générale des personnes interviewées, à l’exception du cas des récepteurs A_05 et B_05 (centre de la coupole centrale). En effet, pour le récepteur A_05 les interviewés ont exprimé le niveau de stress le plus élevé (lorsque la source est positionnée au niveau du mihrab).

Il est difficile de lier l’impression générale avec les critères de genre, d’âge et de fréquentation des mosquées ; cela peut être renvoyé aux conditions sonores extrêmes (fortes réverbérations de la salle malgré son volume modéré).



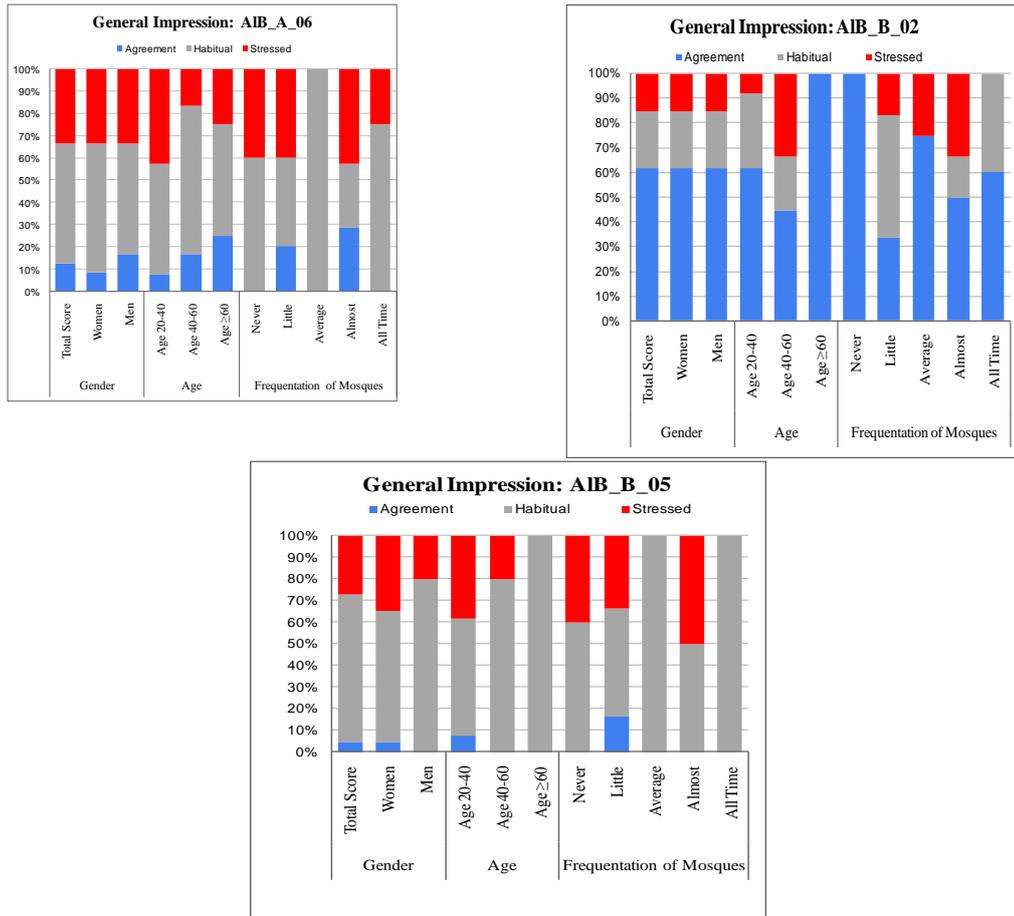


Figure 6.31. Appréciation générale des échantillons sonores choisis (A_02, A_05, A_06, B_02 et B_05). (Source : Benferhat, 2023)

En ce qui concerne la comparaison entre les différents enregistrements sonores des trois mosquées objet du cas d'étude, la mosquée Ali-Bitchine présente des taux très faibles surtout pour les récepteurs lointains (A_02, A_05, B_05). Les récepteurs présentant des évaluations positives (plus de réponses Oui : « Yes ») correspondent au temps de réverbération le plus court (2.92s pour B_02 et 2.99s pour A_06). Il s'avère que l'environnement sonore à la mosquée Ali-Bitchine ne correspond pas aux désirs (références sonores) des usagers.

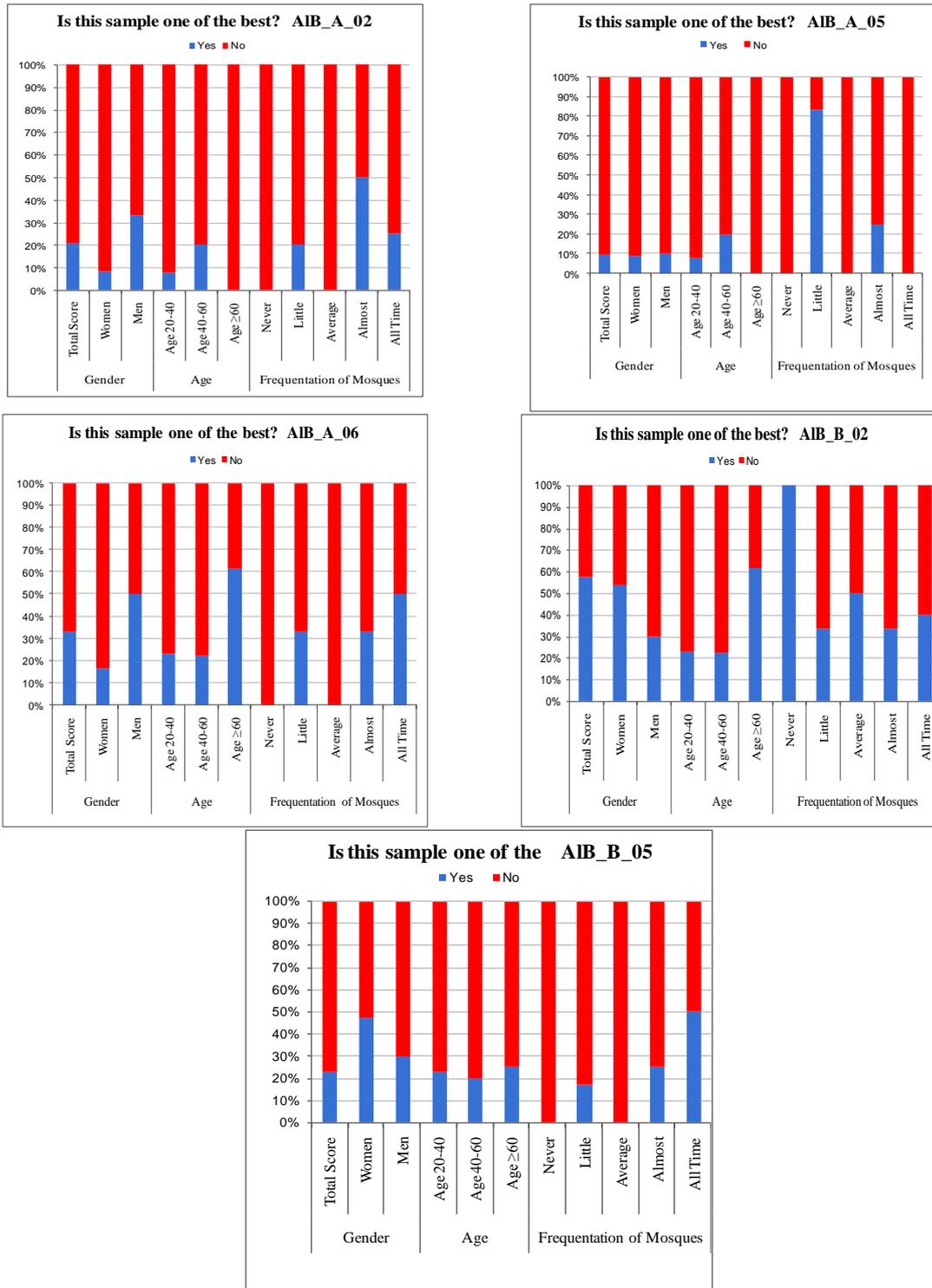


Figure 6.32. Réponses des interviewés sur la classification des échantillons sonores choisis (A_02, A_05, A_06, B_02 et B_05). (Source : Benferhat, 2023)

Le graphique suivant rapporte la relation existante entre la distance Source-récepteur et les taux d'impression générale : Agrément, habituelle, stressante, ainsi que le classement des enregistrements sonores (de la mosquée Ali-Bitchine) parmi les meilleurs des trois mosquées étudiées. A partir de la comparaison, la distance Source-Récepteur est

aussi déterminante mais la forte réverbération de la salle de prière semble provoquer plus de confusion (surtout pour l'impression générale : « habituelle »).

Le récepteur sous la coupole centrale (A_05) correspond au haut niveau de stress.

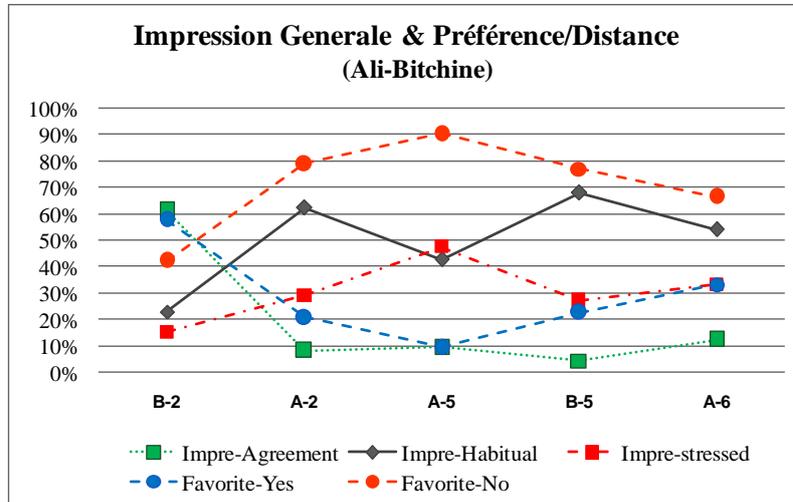


Figure 6.33. L'appréciation générale selon la distance. (Source : Auteur)

6.3.1.3. LA MOSQUEE SAFIR.

Les moyennes des scores obtenus en réponse à la question sur la distance, montre que la différence du genre ne manifeste aucune influence importante sur la perception de la distance ; avec une très légère surestimation des femmes par rapport aux hommes. Il en est de même pour le facteur « âge » ; qui ne se révèle pas comme déterminant, sauf pour les distances importantes (A_09, B_09) auxquelles la catégorie des plus de 60ans qui aperçoivent la source plus distante (se sentent plus éloignés) que les autres catégories d'âges, en exprimant un score très élevé par rapport au score total. Le degré de fréquentation n'exprime aucune influence sur la perception de la distance, en même temps c'est le critère qui présente le plus d'hétérogénéité entre ses différentes catégories (*Never, Little, Average, Almost, Alltime*). Les personnes interviewées s'accordent sur la courte distance entre les récepteurs et les sources (A, B) vu la petite taille de la mosquée.

Quant à l'intelligibilité, on note des différences entre les genres pour la source A (*Mihrab*) contrairement à la source B (*Minbar*) dont les différences sont négligeables. Alors que pour les catégories d'âge, la perception de l'intelligibilité diminue de manière très infime avec l'âge ; jusqu'à disparaître entre les deux catégories (20-40ans) et (≥ 60 ans) pour les récepteurs éloignés (A_09 et B_09). Le degré de fréquentation ne signifie aucunement une influence sur la perception de l'intelligibilité.

En ce qui concerne l'intensité ; sa perception est identique à la perception de l'intelligibilité, pourtant il est très difficile de distinguer l'influence constante d'une catégorie sur le reste, vu le rapprochement des scores.

La perception de la réverbération chez les femmes est plus accentuée que chez les hommes. Comme elle est plus ressentie chez les sujets âgés par rapport aux plus jeunes. Pour la mosquée Safir, vu le temps de réverbération le plus court, il s'avère que les catégories qui fréquentent souvent les mosquées expriment les scores les plus faibles contrairement aux catégories qui les fréquentent peu et/ou moyennement.

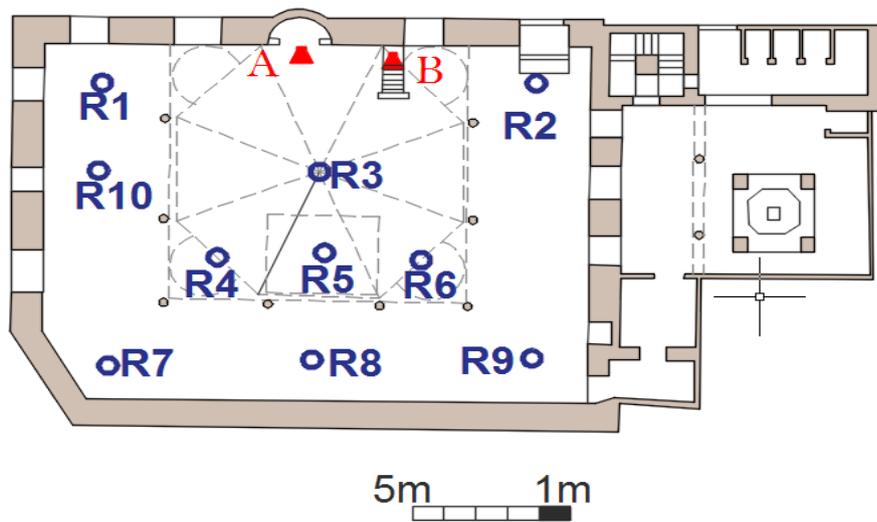
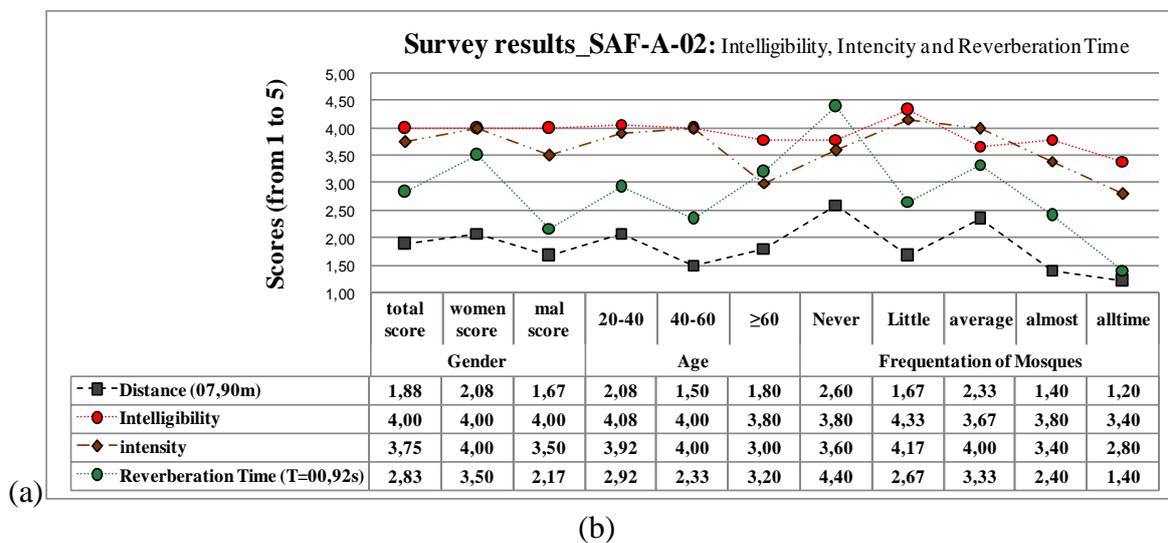
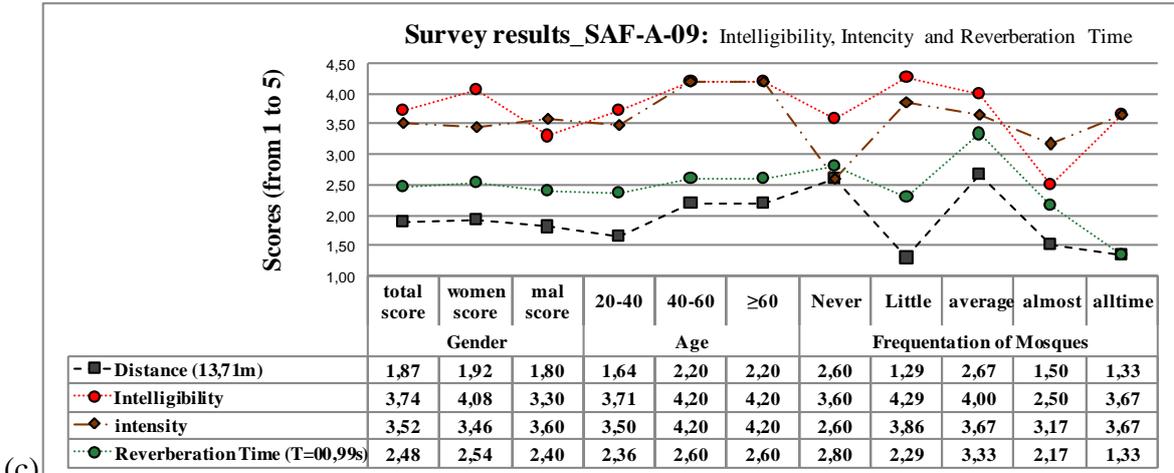
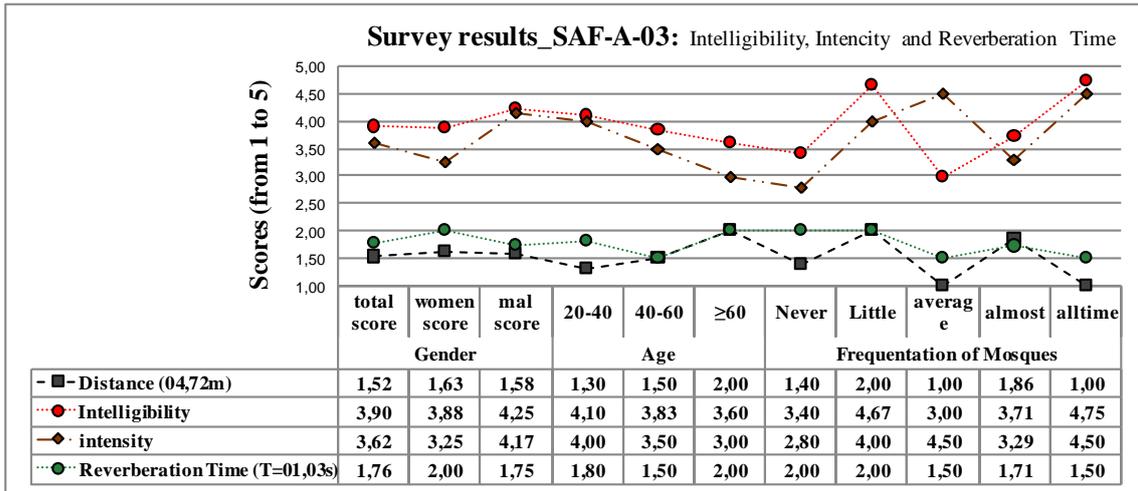


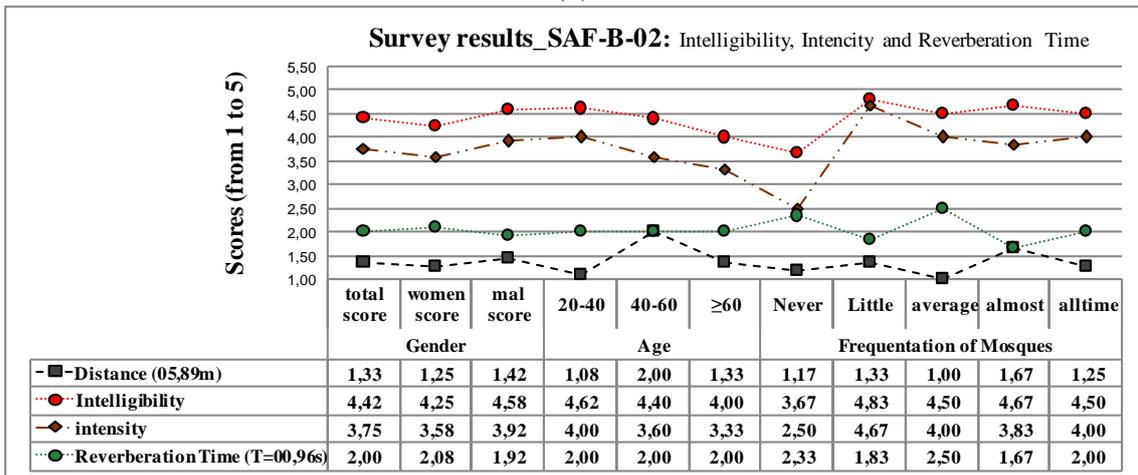
Figure 6.34. Positions des récepteurs dans la mosquée Safir. (Source : Benferhat, 2023)





(c)

(d)



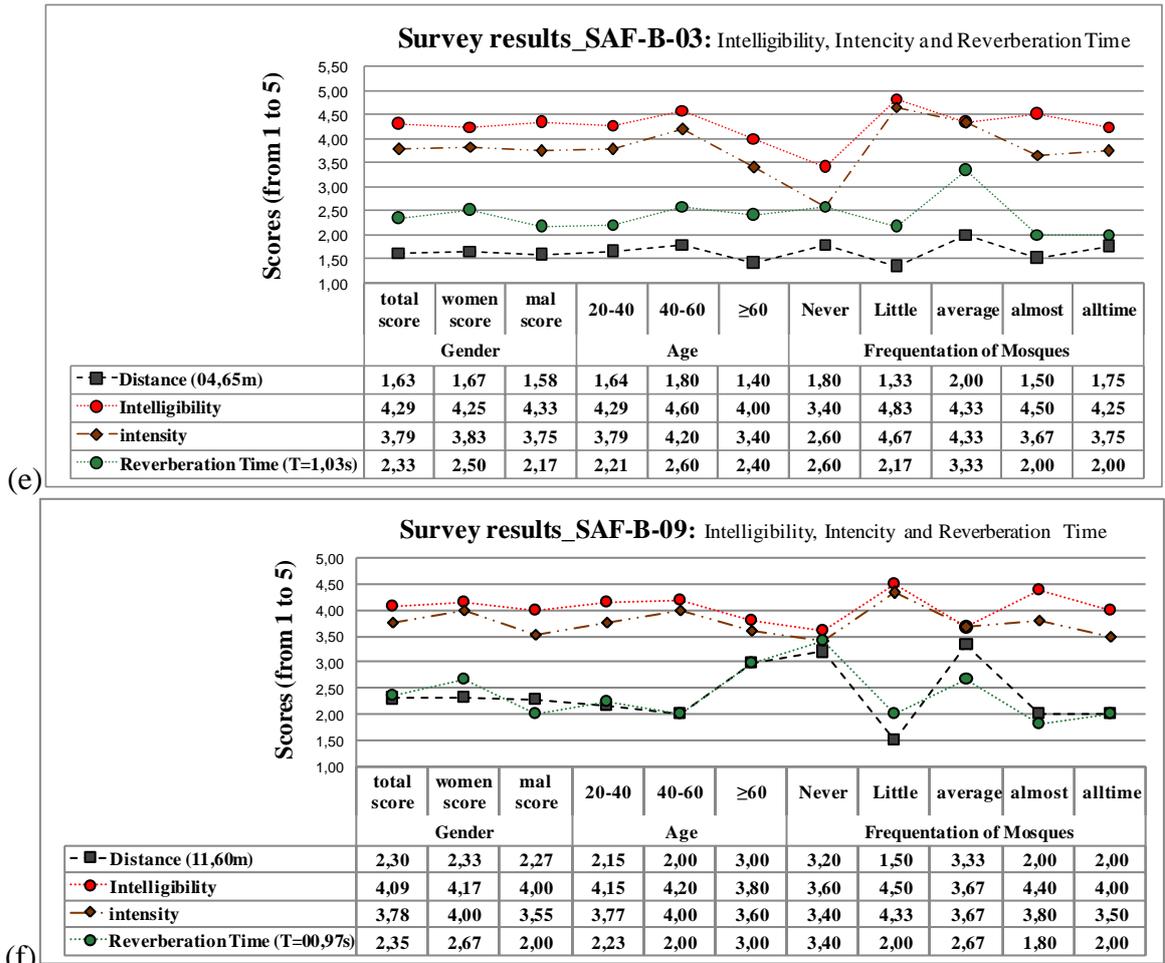


Figure 6.35. Graphiques des résultats de l'enquête à la mosquée Djedid. (Source : Benferhat, 2023)

Le graphique de synthèse (figure 6.36) démontre que les petits oratoires de prière (petites distances sources-récepteurs) ont un moindre impact sur la perception des différents paramètres acoustiques (Intelligibilité, Intensité et temps de réverbération) ce qui est en parfaite harmonie avec les mesures *in-situ*.

Dans le cas de la mosquée Safir l'impression générale est dominée par une sensation d'agrément sur l'ensemble de la salle de prière. Avec des taux de sensation habituelle, de faibles à moyens, alors que pour la sensation de stress, elle est presque inexistante (un faible taux qui diminue pour atteindre 0/5).

Certains récepteurs (tel que : A_03) balance uniquement entre l'habituelle et l'agrément. En fait la situation est presque à l'inverse des deux mosquées précédentes. La faible réverbération de la salle de prière (qui varie entre 0.71s et 1.07s) fait les interviewés

avait une préférence pour le récepteur (A_03, B_03) qui exprime le plus long temps de réverbération 1.03s (parmi les six combinaisons de sources-récepteurs).

Le récepteur 9 (A_09, B_09) étant situé à environ 13 mètres de la source, exprime le plus haut niveau de stress, vu le son sec (en-dessous du seuil toléré).

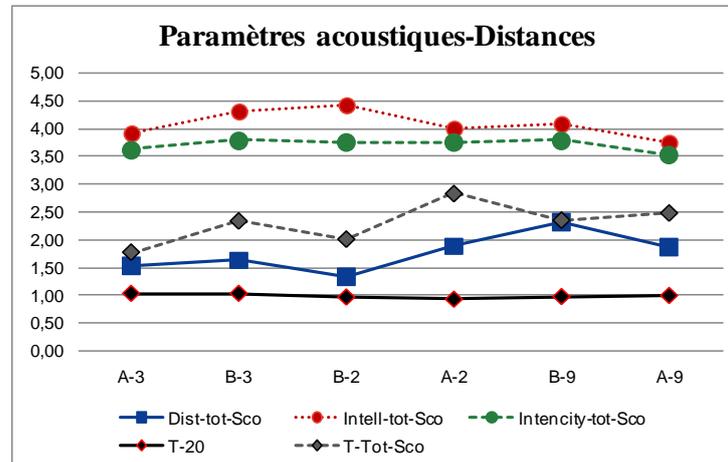


Figure 6.36. Corrélation entre la distance des récepteurs et les scores de l'enquête à la mosquée Djedid. (Source : Benferhat, 2023)

L'analyse de l'impression générale (agrément, habitude ou stress) en fonction des différentes catégories d'utilisateurs (genre, âge et fréquentation de la mosquée) ne dévoile pas un impact important du genre sur l'appréciation du message sonore. Il est possible de constater des différences de 08% entre les deux genres avec une faveur pour les femmes, pour les récepteurs : A_09, B_02 et B_03. De même pour l'âge ; il n'y a pas une croissance ou décroissance claire (ni selon l'âge, ni selon la distance de la source) pour les deux sentiments (habituel ou agrément). Cependant, le sentiment de stress s'accroît avec la distance ; au fur et à mesure que le récepteur s'éloigne de la source le sentiment de stress s'accroît. Enfin, la fréquentation qui ne semble pas influencer les paramètres acoustiques (intelligibilité, intensité et réverbération) ; se révèle décisive pour l'impression générale d'agrément. En fait, le sentiment d'agrément semble s'atténuer avec les personnes qui fréquentent le plus les lieux de culte (le cas des récepteur : A_02, A_09 et B_02).

Quant à la préférence du message sonore (classement des enregistrements des trois mosquées), la mosquée Safir présente les taux les plus importants. Le genre ne présente pas un facteur influençant l'appréciation du message sonore ; les scores exprimés par les femmes sont assez proches de scores exprimés par les hommes. Cependant l'âge constitue un facteur décisif, mais de deux manières différentes ; c'est-à-dire, les récepteurs (A_02,

A_03, A_09 et B_02) présentent des scores plus élevés pour les plus jeunes (20-40ans) ; et une décroissance par rapport à l'âge. Cependant pour les deux autres récepteurs (B_03 et B_09) la situation s'inverse, avec une courbe ascendante avec l'âge ; dont la catégorie des plus de 60ans (+60ans) déclare un taux de 100%. Enfin, le taux de fréquentation ne représente pas une influence pourtant le récepteur A_02 présente une évolution ascendante au fur et à mesure de l'augmentation de la fréquentation des mosquées. Pour le reste des récepteurs, il n'est pas possible de distinguer une logique claire quant au choix du meilleur enregistrement sonore.

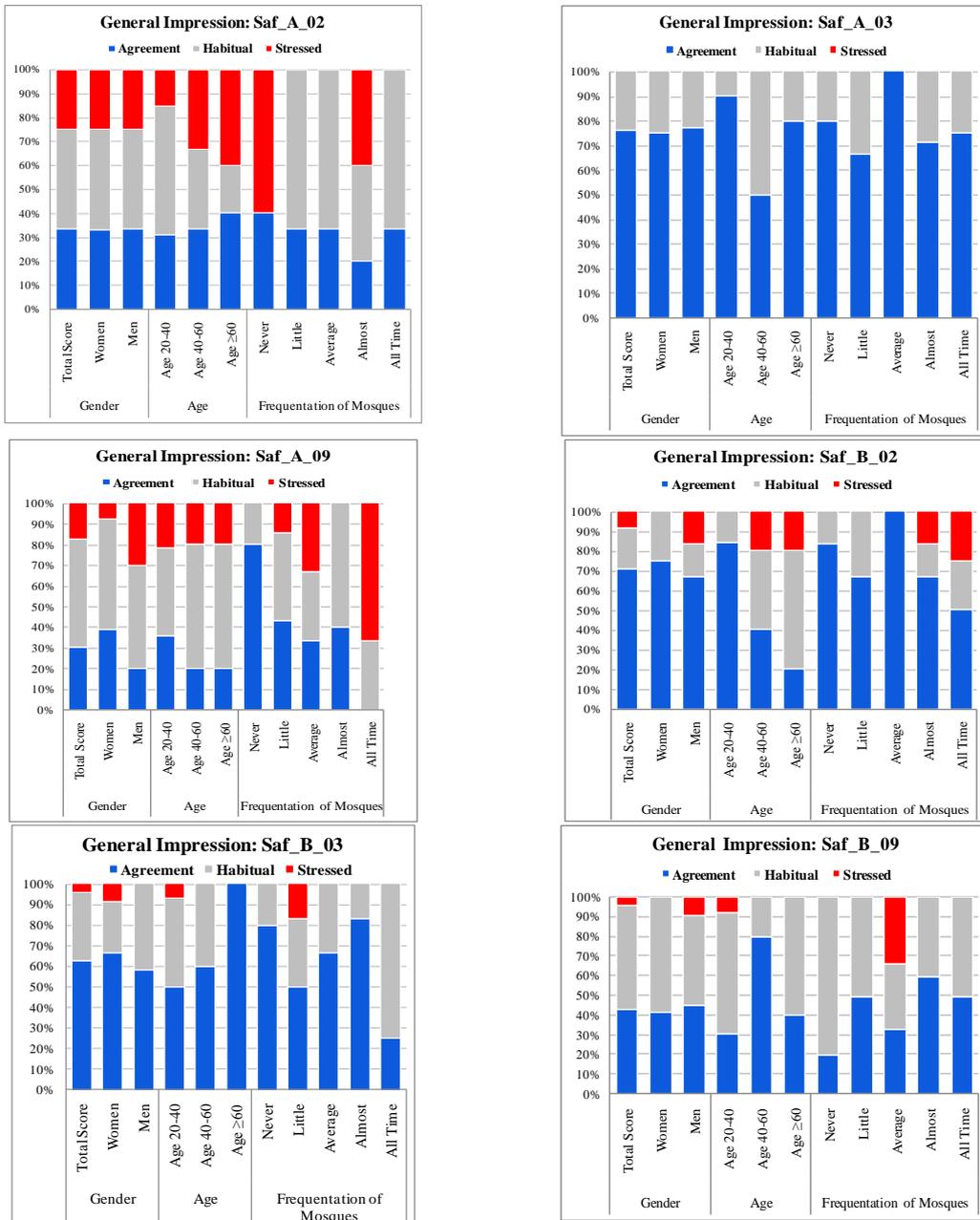


Figure 6.37. Appréciation générale des échantillons sonores choisis (A_06, B_02 et B_05). (Source : Auteur)

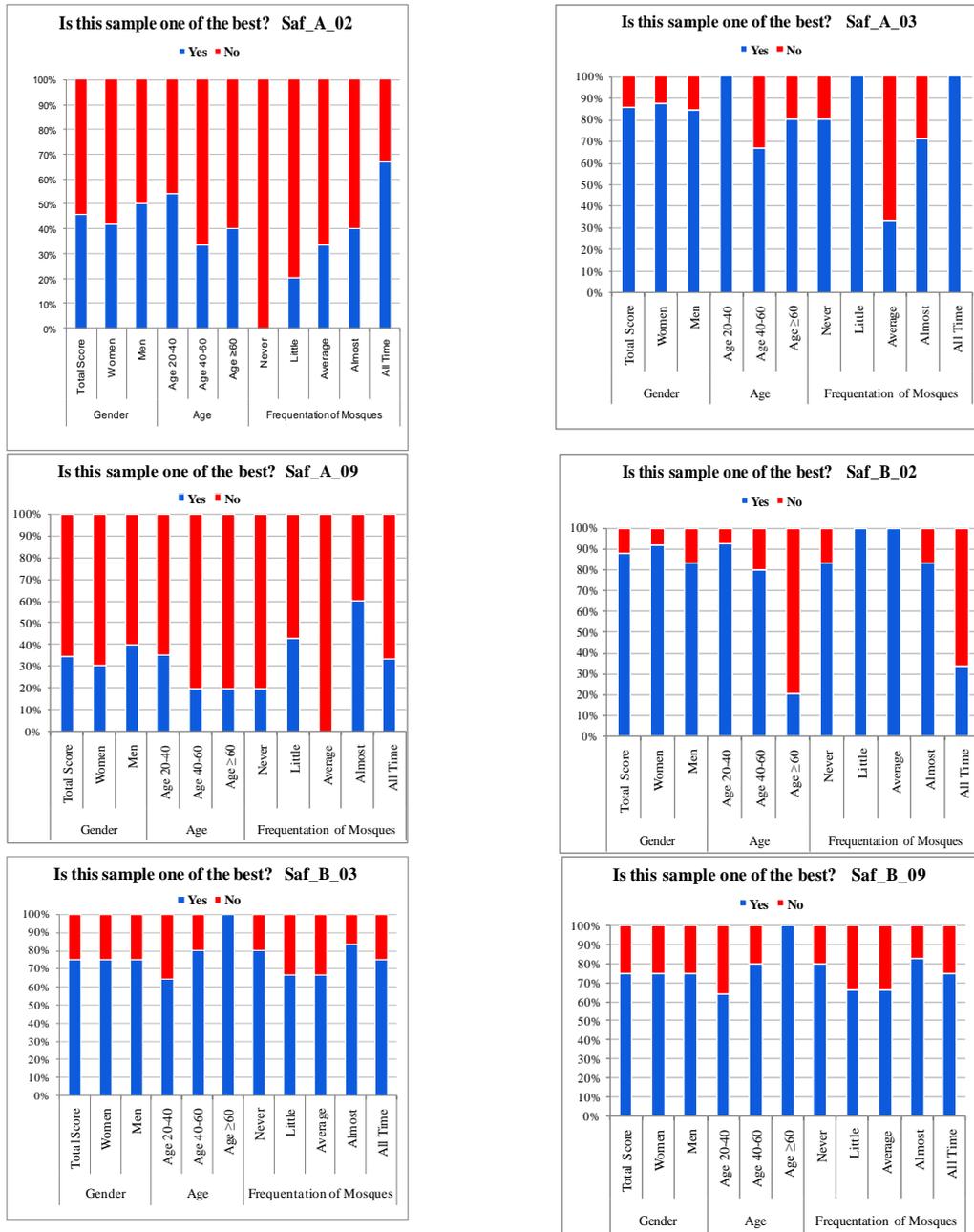


Figure 6.38. Réponses des interviewés sur la classification des échantillons sonores choisis (A_06, B_02 et B_05). (Source : Auteur)

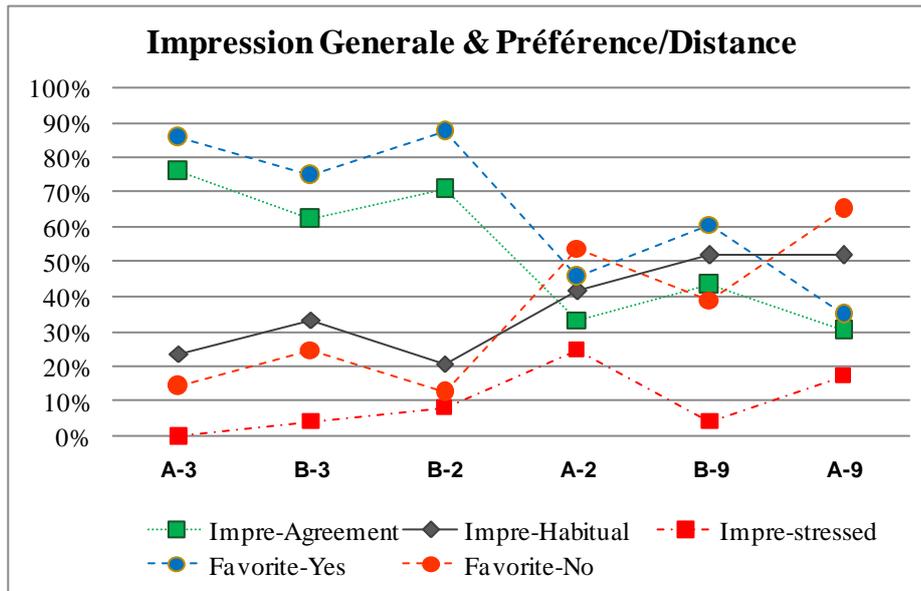


Figure 6.39. Appréciation générale selon la distance. (Source : Auteur)

6.3.2. INTERPRETATIONS DES RESULTATS DE L'ENQUETE.

Suite à la première lecture des résultats obtenus à partir de l'enquête menée sur les trois mosquées, il est possible de conclure ce qui suit :

6.3.2.1. LA DISTANCE.

- L'appréciation de la distance selon le genre, ne dévoile aucune différence au niveau de la mosquée Djedid, contrairement à la mosquée Ali-Bitchine et la mosquée Safir. Ces deux dernières affichent une légère surestimation de la distance par les femmes pour les sons qui sont enregistrés à plus de 8 mètres de la source.
- Pour la mosquée Djedid ; il est possible d'observer que la catégorie d'âge des plus de soixantaines (+60ans) ont tendance à surestimer la distance lorsqu'elle est assez importante (au-delà de 12mètre). Pour les deux mosquées Ali-Bitchine et Safir, l'âge ne semble pas influencer l'appréciation de la distance. Comme il n'y a pas non plus de différences d'appréciation selon les différentes catégories de fréquentation de lieux de culte pour les trois mosquées.

6.3.2.2. INTELLIGIBILITE.

- Les femmes ont tendance à exprimer des taux d'intelligibilité plus élevés que les hommes quand il s'agit de récepteurs proches de la source (mosquées Djedid et Ali-Bitchine). Les hommes estiment une meilleure intelligibilité que

les femmes pour les récepteurs éloignés de la source (mosquée Djedid). Il semble donc, que l'intelligibilité pour les femmes est en rapport avec un son direct et les réverbérations précoces, contrairement aux hommes qui apprécient plus les sons contenant des réverbérations tardives.

- Il est difficile de distinguer une relation unifiée et claire entre âge et perception de l'intelligibilité pour les trois mosquées. En fait, à la mosquée Djedid, les usagers âgés de plus de 60 ans expriment un niveau d'intelligibilité plus élevé lorsque le récepteur se trouve proche de la source. Alors à la mosquée Ali-Bitchine, l'âge est lié à la position de la source ; en fait pour la source A, c'est la catégorie d'âge entre 20-40ans qui expriment des taux élevés. Pour la source B, la relation paradoxale entre âge et appréciation ; de manière similaire à la mosquée Safir.
- La fréquentation ne constitue aucune influence sur l'intelligibilité du son.

6.3.2.3. INTENSITE.

- La perception de l'intensité par les usagers ne semble avoir ni un rapport avec le genre, ni avec la catégorie d'âge et non plus avec la fréquentation des mosquées.

6.3.2.4. REVERBERATION.

- Pour la mosquée Djedid, le genre n'a pas d'impact sur la perception de la réverbération du son, contrairement aux deux autres mosquées Ali-Bitchine et Safir ; dont la configuration spatiale est identique. Pour ces deux mosquées ; la réverbération est plus élevée chez les femmes.
- Quant à l'âge ; c'est uniquement la mosquée Safir, qui révèle une éventuelle corrélation directe entre âge et perception de la réverbération.
- La fréquentation ne constitue toujours pas une influence sur la perception du message sonore.

6.3.2.5. IMPRESSION GENERALE.

- Plus la distance entre le récepteur et la source est grande, plus l'appréciation d'Agrément diminue, conduisant à un sentiment de Stress. Les catégories de genre, âge et fréquentation n'influencent pas l'appréciation générale (agrément,

habituel ou stress) comme dans les conditions extrêmes (forte réverbération, distance très importante de la source). L'impact de la distance est plus observé, tout d'abord chez les femmes, les plus jeunes et les personnes peu et/ou pas habituées des mosquées. Le genre masculin présente des valeurs positives correspondantes aux personnes habituées des mosquées, ce qui en fait, peut justifier une appréciation positive malgré le niveau très élevé de réverbération. Le stress se révèle synonyme à un temps de réverbération élevé.

- La forme de la salle de prière semble avoir un effet sur la perception du message sonore, car à la mosquée Ali-Bitchine (avec un T20 élevé), il paraît que la forme centrale de la salle de prière (autour d'une coupole) semble atténuer le niveau de stress en faveur d'une appréciation habituelle.
- L'enquête prouve une corrélation de l'appréciation de l'agrément avec une faible réverbération ; mais pas avec les taux très faible de réverbération (moins d'une seconde). Il semble que le temps de réverbération idéale pour les prieurs est d'environ 1.03s, ce qui correspond le mieux à un lieu occupé qu'à une salle vide comme il était le cas dans cette enquête.
- La fréquentation des mosquées est synonyme d'expérience des lieux de culte (notamment les mosquées), c'est pour cette raison, que lorsque le temps de réverbération est très court (mosquée Safir) le taux de fréquentation commence à se montrer influent.

CONCLUSION.

En conclusion, il a été noté beaucoup de paramètres influence la conception acoustique des salles de prières ; tels que la configuration spatiale, la forme de toiture et les matériaux de construction.

Commençant par la configuration spatiale. La forme oblongue (plus profonde) à la mosquée Djedid assure plus d'énergie tardive, nécessaire pour que ondes sonores atteignent les dernières rangées. En effet, la hauteur de la coupole, vient ici favoriser une propagation plus harmonieuse.

L'importance de la hauteur de la coupole est plus ressentie du côté de la mosquée Djedid, notamment entre la source A (hauteur : 1.55m) et la source B (hauteur : 2.80m). Cela reste difficile à vérifier, car la formule proposée par Orfali, n'est pas directement applicable.

En contre partie, La forme centralisée (concentrique), caractéristique des deux mosquées Ali-Bitchine et Safir, est en faveur d'une propagation uniforme des ondes sonores (son direct) ; permettant ainsi de réduire l'impact de la distance source-récepteurs, pour les dernières rangées.

Les différentes transformations opérées sur les mosquées, sont à l'origine de certaines différences (hétérogénéités) avec les mosquées ottomanes étudiées dans la littérature. A l'exemple du *Mahfil* qui se confirme comme élément positif dans les mosquées ottomanes. Car, dans le cas de la mosquée Ali-Bitchine ; le *Mahfil* permet une atténuation des réverbérations en provenance de la coupole centrale. Son rôle, consiste dans l'absorption du surplus de réflexions, susceptibles de créer de l'écho, permettant ainsi d'éviter de probables confusions du message sonore. Sa suppression au niveau de la mosquée Ali-Bitchine, confirme son importance dans un système acoustique propre aux mosquées ottomanes classiques.

D'autres transformations moins importantes, mais qui ne laissent pas l'environnement sonore sans influence, sont à signaler. Il s'avère que les colonnes jumelées en un grand pilier, dans la mosquée Ali-Bitchine, sont la cause principales du masque empêchant certains récepteurs ; proches de la source, de recevoir de l'énergie des premières réflexions et/ou du son direct.

Une autre modification qui a été à l'origine de la forte absorption des réflexions précoces ; à la mosquée Safir ; est le changement du revêtement mural, qui fut à l'origine en carreaux de céramique, semble augmenter l'absorption des réflexions précoces, notamment en moyennes fréquences. Ce qui est en faveur d'un court temps de réverbération, jugé parfois comme trop court, surtout en situation d'occupation, provoquant ainsi, un environnement sonore, plutôt sec (*dry*) non envisageable dans les lieux de prière.

Le bois est un matériau très important pour la régulation de l'environnement sonore, à l'intérieur des mosquées. Alors, fort présent dans la mosquée Safir ; car utilisé pour séparer l'espace réservé aux femmes, ou à l'opposé, presque inexistant, dans le cas de la mosquée Ali-Bitchine ; après la suppression du *Mahfil*, perturbe l'absorption des réflexions non désirables en basses et moyennes fréquences.

Plus le volume est grand ; il en résulte une parfaite corrélation entre la distance séparant la source du récepteur, et les différents paramètres acoustiques (EDT, T_{20} , D_{50} , C_{50} et STI), confirmés aussi, par la perception auprès des usagers.

Les mosquées algériennes d'origine ottomane, se caractérisent par une importante énergie tardive ; qui semble positive en situation d'occupation (mosquée Djedid, mosquée Ali-Bitchine).

La comparaison de T_{20} des trois mosquées avec les mosquées Ottomanes classiques ; révèle un comportement acoustique similaire entre les mosquées de volumes similaires. Comme il s'avère que le matériau employé pour la coupole, dans les anciennes mosquées (pierre et brique), assure un temps de réverbération plus adéquat en comparaison avec le béton (utilisée à la mosquée *Sisli*).

Un profil acoustique similaire à celui des mosquées ottomanes de Turquie (Sokullu. M, Mihrima. M, Ahmet Pasha. M) ; pourtant, elles sont réalisées durant un large intervalle de temps (entre le 16^{ème} et le 18^{ème} siècle). La corrélation faite entre le volume de la salle de prière et le temps de réverbération ; prouvent une forte corrélation entre le volume et le temps de réverbération, particulièrement pour les volumes supérieurs à 2000m³.

La tendance des temps de réverbération en cas d'inoccupation suit une loi de puissance en fonction du volume, avec un coefficient de régression significativement

élevé, ce qui est cohérent avec le comportement observé dans d'autres bâtiments de culte, telles que les églises catholiques et orthodoxes.

Une bonne conception acoustique pour une mosquée, exige un taux V/N (volume/personne) plus élevé que la norme recommandée par Maekawa et Lord (4 à 6 m³/pers). Elkhateeb recommande un minimum de 7m³/per, Or, les mosquées ottomanes en Turquie, dépassent 10m³/per. Les mosquées Ali-Bitchine et Safir présentent des taux beaucoup plus bas ; proches de la norme de Maekawa et Lord. Plus le taux V/N est relativement élevé (entre 7 et 15m³/per) ; plus la salle de prière offre un environnement sonore approprié aux lieux de culte ; perçu comme porteur de symbolisme et de splendeur.

En fait, il est important de prévoir de grands volumes en rapport avec le nombre de personnes, conjugué avec l'emploi de matériaux réverbérants ; cela semble assurer une bonne intelligibilité dans les mosquées. Ceci est confirmé dans les mosquées ottomanes en situation d'occupation.

La simulation numérique nous a permis une démonstration des environnements sonores en situation d'occupation. Cette déduction fut nécessaire pour une évaluation en rapport avec l'usage ; donc plus pertinente qu'en situation d'inoccupation.

Les résultats du temps de réverbération, en situation d'occupation complète (*full occupancy*), dévoilent une diminution impressionnante aux mosquées Djedid et Ali-Bitchine, avec des valeurs ayant chuté en fréquences moyennes jusqu'à 1,2 s et 0,8 s respectivement. À Safir, en raison de la réverbération déjà courte, la variation est moins impressionnante, mais la valeur prédite a baissé jusqu'à 0,5 seconde.

Il est intéressant de noter que même avec seulement 1/3 des occupants répartis sur la surface au sol (approximativement l'occupation durant les prières quotidiennes), T₂₀ a été presque réduit de moitié dans les deux mosquées (Djedid et Ali-Bitchine). Avec 2/3 des occupants en place, le temps de réverbération a encore été réduit, offrant un environnement sonore sec et clair dans tous les espaces sélectionnés. Ce qui confirme la nécessité d'accorder un volume par personne plus important.

Les meilleurs résultats des différents paramètres acoustiques ; mesurés in-situ, et/ou obtenus à partir de l'enquête, se trouvent à moins de 7mètres de la source (6 mètres dans le cas des mosquées ottomanes classique, en référence aux mosquées ottomanes (Vallet, et a,

2002). Entre 7 et 12 mètres les résultats sont acceptables ; alors ils deviennent médiocres au-delà de 12 mètres. Mais cette distance s'améliore en situation d'occupation.

C'est essentiellement le cas de la clarté pour le discours (*speech*) ; qui s'améliore considérablement en situation d'occupation, ce qui justifie l'importance d'un long temps de réverbération dans la mosquée Djedid et la mosquée Ali-Bitchine. En fait, la nouvelle valeur moyenne de clarté est devenue -1,4 dB contre la précédente valeur de -7,2 dB. Une influence permettant d'élargir la zone, de clarté acceptable, jusqu'à 15 mètres de la source. Parallèlement, Ali-Bitchine a connu aussi une amélioration, passant de **-7 dB** à **0,7 dB**. Tous les récepteurs ayant des valeurs supérieures à **-1 dB** et la plupart d'entre eux ayant des valeurs positives (Benferhat et al, 2022). L'équation de régression nous assure que la valeur de STI est toujours supérieure au seuil recommandé par Yilmazer et Acun (0,56).

Une comparaison avec les valeurs de référence (Kayili, 2005 ; Orfali, 2007), montre que les trois mosquées semblent être relativement proches de la fourchette du "consensus" tant que le taux d'occupation reste à 1/3. Inversement, en présence de niveaux d'occupation plus élevés ; 2/3 et 3/3 (plus appropriés pour les prières de vendredi et l'Aïd), les trois mosquées offrent un environnement sonore trop sec (sans réverbération). Cela pourrait être considéré comme une opportunité (avantage) pour la clarté (C_{50}), mais en contre partie, il ne semble pas convenir à l'atmosphère (environnement= vécu) souhaitée dans les lieux sacrés, qui nécessitent souvent un temps de réverbération encore plus long.

A partir de l'enquête, on peut déduire que les hommes habitués des mosquées (qui fréquentent régulièrement) tolèrent un temps de réverbération un peu plus long que les personnes moins habituées. Pourtant, la fréquentation n'influence pas l'appréciation de la distance, ni l'intelligibilité, ni l'intensité.

L'intensité semble indépendante du changement du temps de réverbération. Les résultats de mesures *in-situ*, ainsi que l'enquête, dévoilent une préférence à l'environnement sonore produit par la source A (Mihrab).

L'enquête menée auprès des usagers, dévoile que la perception de l'environnement sonore est peu subordonnée au critère de l'âge et de la fréquentation. Cependant, le genre constitue, parfois, un facteur influent dans les situations extrêmes (très loin de la source, forte réverbération de l'espace).

Les femmes ont tendance à surestimer les distances importantes (>8mètres) ; l'intelligibilité, lorsque la source est proche des récepteurs ; ainsi que les réverbérations. Contrairement aux hommes, qui surestiment plus l'intelligibilité pour des récepteurs lointains. Il semble donc, que les femmes préfèrent l'intelligibilité des sons directs ; alors que les hommes favorisent un son amplifié avec des réverbérations précoces.

Souvent, les personnes âgées préfèrent l'intelligibilité lorsque la source est proche.

Le stress se révèle synonyme à un temps de réverbération élevé. Alors que le sentiment d'agrément est plus relatif à la distance de la source ; plus la source est proche, plus une impression générale d'agrément est ressentie chez les usagers.

CONCLUSION GENERALE.

Ce travail de recherche vient renforcer les connaissances dans le domaine de l'acoustique des mosquées. Ce domaine très peu investi avant les vingt dernières années, malgré les recherches entreprises depuis, reste ouvert sur plusieurs problématiques.

Le sujet traité se focalise sur l'apport de l'architecture ottomane à l'acoustique des lieux de culte. En effet, à partir du projet *CAHRISMA* ; nombreux sont les chercheurs qui ont essayé d'explorer ce vaste domaine restait inexploré pour autant.

L'Algérie, très vaste pays et très riche par son histoire et son patrimoine architectural ; a accueillie les ottomans pendant près de trois siècles ; du 16^{ème} au 19^{ème} siècle. Ce patrimoine architectural ottoman est largement considéré et prospecté du point de vue historique, typologique, décoratif...etc, mais l'a rarement été du point de vu qualité spatiale et encore moins en acoustique architecturale.

L'espace architectural contribue énormément par son volume à améliorer l'intelligibilité du message sonore ; car il existe une relation transitive entre le volume et le gain d'énergie dans l'espace; plus le volume est grand, plus l'énergie sonore est stockée dans l'espace. Le volume conditionne le temps de réverbération optimal ; qui est le principal indicateur sur la qualité d'un environnement sonore.

L'état de l'art nous a permis l'identification des principaux paramètres acoustiques significatifs pour l'acoustique des lieux de culte ; et plus précisément pour les mosquées ; à savoir le temps de réverbération (T), EDT, D₅₀, C₅₀ et STI. Ces indicateurs s'avèrent les plus pertinents pour une évaluation d'un environnement sonore ; dont la source principale est la voix humaine de l'*Imam*.

Les lieux de culte étant riches en symbolisme, généralement, ressenti de manière anonyme par tous les humains ; ils impressionnent les usagers avec une qualité acoustique

appropriée. Ce symbolisme est le résultat de la combinaison du **style architectural-sources- utilisateurs**.

L'apport de Prodi[5], et El-Khateeb[6] dans l'étude de l'acoustique dans les mosquées est considérable, de même que Baumann[3], Kleiner[4]. Leurs contributions concernant le temps de réverbérations nous ont été d'une grande utilité. En effet, nous avons constaté que le temps de réverbération des salles de prière des mosquées diffèrent des salles destinées à la parole (Speech room). La satisfaction des usagers de ces espaces est tributaire de l'importance d'un long temps de réverbération. Du coup, l'assimilation du temps de réverbération des mosquées à celui des salles de conférences, en se basant uniquement sur le seul critère de « la parole » est infondée, car il en résulte des salles de prière dotées d'une ambiance plutôt sèche (*dry*), inappropriées aux mosquées.

L'étude des nombreux documents; notamment historiques, nous a prouvé l'apport considérable des scientifiques musulmans dans le domaine de l'acoustique. Ils étaient bien les précurseurs à démontrer que le son se propage dans l'air sous forme d'ondes circulaires. Comme ils comprirent l'influence des usagers dans l'absorption des ondes sonores. Ils ont acheminé les ondes sonores ; provenant d'une source connue, et les ont orienté dans des directions précises pour assurer une clarté et une intensité, par l'intermédiaire des calculs numériques ; en optimisant l'usage des surfaces concaves dans la réflexion du son. Comme ils étaient conscients du phénomène de l'écho.

Nous avons démontré tout le long de ce travail à travers les mesures acoustiques effectuées et l'exploration de manuscrits sur les monuments historiques; la maîtrise de solutions architecturales adaptées pour une qualité acoustique optimale. Nous avons aussi démontré que l'architecte Sinan, avait développé une conception acoustique appropriée aux mosquées, qui se basait sur une organisation spatiale centrale ; combinée avec l'emploi de dispositifs, tels que le *Mahfil*, les détails ornementaux (des muqarnas en plâtre). Comme il a réapproprié l'usage des cavités résonante pour la correction du temps de réverbération ; Sans oublier un choix précis de matériaux. Il s'agissait, déjà de son époque, d'un système très développé et très harmonieux avec l'usage spécifique des mosquées ottomanes (rite hanafite) en particulier. En effet, la comparaison entre l'acoustique des églises et des mosquées, dévoile un temps de réverbération plus long en faveur des mosquées Ottomanes et Mamlouks [17]. Ainsi leur spécificité se caractérisaient par un ratio de volume par personne supérieur à 10 m³/per ; contrairement au ratio défini par Maekawa et Lord, qui

est situé entre 4 et 6 m³/pers. Quant au critère d'intelligibilité ; Yilmazar et Acun concluait qu'un STI à 0.56 satisfait l'attente des usagers des mosquées (donc, inférieur à la norme qui est 0.6), ce qui met les mosquées de conception ottomane hautement favorables et nettement plus attrayantes en matière de confort acoustique.

Nous sommes arrivés à affirmer que les conditions d'écoute changent avec le changement du nombre d'usagers. Ces derniers étant, susceptibles d'absorber une partie de l'énergie sonore ; pourraient influencer l'environnement sonore de différentes manières ; selon le taux d'occupation.

Les principaux résultats obtenus ; à partir des expérimentations, viennent en réponses à nos hypothèses en particulier à la première confirmant la similitude entre les environnements sonores des mosquées algériennes de style ottoman avec celui des mosquées ottomanes turques. La forme oblongue (plus profonde) à la mosquée Djedid assure plus d'énergie tardive, nécessaire pour les dernières rangées. En effet, la hauteur de la coupole, vient ici favoriser une propagation plus harmonieuse.

En contre partie, La forme centralisée (concentrique), caractéristique des deux mosquées Ali-Bitchine et Safir, est en faveur d'une propagation uniforme des ondes sonores (son direct) ; permettant ainsi de réduire l'impact de la distance source-récepteurs, pour les dernières rangées. Au final nous avons noté que les mosquées algériennes d'origine ottomane, se caractérisent par une importante énergie tardive ; qui semble positive en situation d'occupation (mosquée Djedid, mosquée Ali-Bitchine).

La comparaison de T_{20} des trois mosquées avec des mosquées Ottomanes classiques ; révèle un comportement acoustique similaire entre les mosquées de même volumes. Comme il s'avère que le matériau employé pour la construction de la coupole, dans les anciennes mosquées (pierre et brique), assure un temps de réverbération plus adéquat en comparaison avec le béton (utilisée à la mosquée *Sisli*). La corrélation faite entre le volume de la salle de prière et le temps de réverbération ; prouvent une forte corrélation entre le volume et le temps de réverbération, particulièrement pour les volumes supérieurs à 2000m³.

La tendance des temps de réverbération en cas d'inoccupation suit une loi de puissance en fonction du volume, avec un coefficient de régression significativement

élevé, ce qui est cohérent avec le comportement observé dans d'autres bâtiments de culte, telles que les églises catholiques et orthodoxes.

Une bonne conception acoustique pour une mosquée, exige un taux V/N (volume/personne) plus élevé que la norme recommandée par Maekawa et Lord (4 à 6 m³/pers). Elkhateeb recommande un minimum de 7m³/per, Or, les mosquées ottomanes en Turquie, dépassent 10m³/per. Les mosquées Ali-Bitchine et Safir présentent des taux beaucoup plus bas ; proches de la norme de Maekawa et Lord. Plus le taux V/N est relativement élevé (entre 7 et 15m³/per) ; plus la salle de prière offre un environnement sonore approprié aux lieux de culte ; perçu comme porteur de symbolisme et de valeur.

Ainsi il est important de prévoir de grands volumes en rapport avec le nombre de personnes, conjugué avec l'emploi de matériaux réverbérants ; cela semble assurer une bonne intelligibilité dans les mosquées. Ceci est confirmé dans les mosquées ottomanes en situation d'occupation. Aussi la simulation numérique effectuée dans ce travail nous a permis une démonstration des environnements sonores en situation d'occupation. Cette déduction fut nécessaire pour une évaluation en rapport avec l'usage ; donc plus pertinente qu'en situation d'inoccupation.

Les résultats du temps de réverbération, en situation d'occupation complète (*full occupancy*), dévoilent une diminution impressionnante du temps de réverbération aux mosquées Djedid et Ali-Bitchine, avec des valeurs ayant chuté en fréquences moyennes jusqu'à 1,2 s et 0,8 s respectivement. À Safir, en raison de la réverbération déjà courte, la variation est moins impressionnante, mais la valeur prédite a baissé jusqu'à 0,5 seconde.

Il est intéressant de noter que même avec seulement 1/3 des occupants répartis sur la surface au sol (approximativement l'occupation durant les prières quotidiennes), T₂₀ a presque été réduit de moitié dans les deux mosquées (Djedid et Ali-Bitchine). Avec 2/3 des occupants en place, le temps de réverbération a encore été réduit, offrant un environnement sonore sec et clair dans tous les espaces sélectionnés. Ce qui confirme la nécessité d'accorder un volume par personne plus important.

Les meilleurs résultats des différents paramètres acoustiques ; mesurés in-situ, et/ou obtenus à partir de l'enquête, se trouvent à moins de 7mètres de la source (6 mètres dans le cas des mosquées ottomanes classique, en référence à Vallet, 2002). Entre 7et 12mètres les résultats sont acceptables ; alors ils deviennent moins satisfaisants jusqu'à médiocres au-

delà de 12mètres. Mais cette distance s'améliore en situation d'occupation. C'est essentiellement le cas de la clarté pour le discours (*speech*); qui s'améliore considérablement en situation d'occupation, ce qui justifie l'importance d'un long temps de réverbération dans la mosquée Djedid et la mosquée Ali-Bitchine. En fait, la nouvelle valeur moyenne de clarté est devenue -1,4 dB contre la précédente valeur de -7,2 dB. Une influence permettant d'élargir la zone, de clarté acceptable, jusqu'à 15 mètres de la source. Parallèlement, Ali-Bitchine a connu aussi une amélioration, passant de **-7 dB** à **0,7 dB**. Tous les récepteurs avaient des valeurs supérieures à **-1 dB** et la plupart d'entre eux affichaient des valeurs positives [1]. L'équation de régression nous assure que la valeur de STI est toujours supérieure au seuil recommandé par Yilmazer et Acun (0,56).

Une comparaison avec les valeurs de référence (Kayili[16], Orfali[18]), montre que les trois mosquées semblent être relativement proches de la fourchette du "consensus" tant que le taux d'occupation reste à 1/3. Inversement, en présence de niveaux d'occupation plus élevés ; 2/3 et 3/3 (plus appropriés pour les prières de vendredi et l'Aïd), les trois mosquées offrent un environnement sonore trop sec (sans réverbération). Cela pourrait être considéré comme une opportunité (avantage) pour la clarté (C_{50}), mais en contre partie, il ne semble pas convenir à l'atmosphère (environnement= vécu) souhaitée dans les lieux sacrés, qui nécessitent souvent un temps de réverbération encore plus long.

Toutefois, il nous a été difficile de procéder à la vérification de la présence des cavités résonatrices (*helmholtz resonators*); objet de notre deuxième hypothèse. Cette dernière considérait les différentes altérations effectuées sur les mosquées qui empêchaient la vérification de la présence de dispositifs acoustiques. Cependant le rôle de *Mahfil* a été confirmé.

Les différentes transformations opérées sur les mosquées, sont à l'origine de certaines différences (hétérogénéités) avec les mosquées ottomanes abordées dans l'état de l'art. Le *Mahfil* se confirme comme un dispositif positif dans les mosquées ottomanes. Car, dans le cas de la mosquée Ali-Bitchine; le *Mahfil* permet une atténuation des réverbérations en provenance de la coupole centrale. Son rôle, consiste dans l'absorption du surplus de réflexions, susceptibles de créer de l'écho, permettant ainsi d'éviter de probables confusions du message sonore. Sa suppression au niveau de la mosquée Ali-Bitchine, confirme son importance dans un système acoustique propre aux mosquées

ottomanes classiques. Les résultats obtenus sont en faveur d'une atténuation des réflexions tardives, dans la partie centrale (sous la coupole centrale ; grâce au *Mahfil*).

Un autre dispositif indispensable dans les mosquées ottomanes classiques s'avère être la grande coupole centrale. Son rôle a été confirmé dans la prolongation des réflexions (notamment précoces) à travers la salle de prière, mais ceci sous des conditions spécifiques. En fait, la compréhension de l'impact nécessitera plus d'exploration dans des travaux à venir, dédiés particulièrement au rôle de la coupole, car il dépasse le cadre de cette thèse.

Par rapport à la même hypothèse, un autre constituant du système acoustique des mosquées Ottomanes a été vérifié ; c'est le(s) matériau(x) de revêtement. L'interprétation des résultats dans la mosquée Safir, dévoile l'impact du changement du matériau de revêtement ; essentiellement du mur de la qibla, sur l'acoustique de la salle de prière, en particulier en situation d'occupation. Cette influence négative, a été renforcée par l'ajout de panneaux en bois pour séparer l'espace de prière réservé aux femmes ; dont, il résulte, un environnement sonore inapproprié aux mosquées, malgré la petite taille de l'espace.

D'autres transformations moins importantes, mais qui ne laissent pas l'environnement sonore sans influence ; les colonnes jumelées en un grand pilier, qui s'avèrent être, dans la mosquée Ali-Bitchine, la cause principale du masque empêchant certains récepteurs ; proches de la source, de recevoir de l'énergie des premières réflexions et/ou du son direct.

Une autre modification, qui a été à l'origine de la forte absorption des réflexions précoces à la mosquée Safir est le changement du revêtement mural, qui fut à l'origine en carreaux de céramique. Ce dernier augmente l'absorption des réflexions précoces, notamment en moyennes fréquences ; ce qui est en faveur d'un court temps de réverbération, jugé parfois comme trop court, surtout en situation d'occupation, provoquant ainsi, un environnement sonore, plutôt sec (*dry*) non envisageable dans les lieux de prière.

Nous soulignons aussi l'importance du matériau bois dans la régulation de l'environnement sonore, à l'intérieur des mosquées. Il est fort présent dans la mosquée Safir ; pour séparer l'espace réservé aux femmes, ou presque inexistant, dans le cas de la

mosquée Ali-Bitchine ; après la suppression du *Mahfil*, car le bois est responsable de l'absorption des réflexions non désirables en basses et moyennes fréquences.

Toutefois, il nous a été impossible de vérifier la troisième hypothèse, vu l'inexistence de travaux établis qui élucident l'acoustique des mosquées locales (style maghrébin) et/ou en proposent des solutions précises. Nous rappelons que cette hypothèse concerne les mosquées réalisées sous la régence turque, se caractérisant par l'emploi de solutions acoustiques qui émanent de la fusion du style local avec le style ottoman.

Il ya cependant, Driouèche qui énonce la fusion du savoir faire local avec l'apport de l'architecture ottomane. Cette fusion se traduit dans l'usage de la coupole octogonale ; qui reste insuffisant pour se prononcer sur la présence de solutions acoustiques particulières en Algérie pré-ottomane.

D'autres conclusions sont plutôt relatives à l'acoustique des mosquées de manière générale et qui se résument, selon nos résultats, comme suit :

- L'importance de la distance source-récepteur ; il en résulte une parfaite corrélation entre la distance séparant la source du récepteur, et les différents paramètres acoustiques (EDT, T_{20} , D_{50} , C_{50} et STI), confirmés aussi, par la perception auprès des usagers.
- L'évaluation subjective par l'intermédiaire de l'enquête, nous a permis de réaliser des différences minimales entre les hommes et les femmes dans la perception du message sonore. Il semble que les personnes les plus habituées des mosquées, tolèrent un temps de réverbération un peu plus long que celles qui les fréquentent le moins. Pourtant, la fréquentation n'influence pas l'appréciation de la distance, ni l'intelligibilité, ni l'intensité.
- L'intensité perçue semble indépendante du changement du temps de réverbération. Les résultats de mesures *in-situ*, ainsi que de l'enquête, dévoilent une préférence à l'environnement sonore produit durant la prière (source A : Mihrab).
- L'enquête menée auprès des usagers, montre que la perception de l'environnement sonore est peu subordonnée au critère de l'âge et de la fréquentation. Cependant, le genre constitue, parfois, un facteur influent

dans les situations extrêmes (très loin de la source, forte réverbération de l'espace).

- Les femmes ont tendance à surestimer les distances importantes (>8mètres) ; l'intelligibilité, lorsque la source est proche des récepteurs ; ainsi que les réverbérations. Contrairement aux hommes, qui surestiment plus l'intelligibilité pour des récepteurs lointains. Il semble que les femmes préfèrent l'intelligibilité des sons directs ; alors que les hommes favorisent un son amplifié avec des réverbérations précoces.
- Le stress se révèle plus lié à un temps de réverbération élevé ; alors que le sentiment d'agrément est plus relatif à la distance de la source. Plus la source est proche, plus une impression générale d'agrément est ressentie chez les usagers.

Perspectives futures de recherches

- Evaluation des environnements sonores en situation d'occupation par un logiciel de simulation.
- Etudier de près les performances acoustiques des matériaux de revêtements des mosquées historiques.
- Etablir des modèles de mosquées inspirées des mosquées ottomanes.
- Elargir le corpus d'étude.
- Evaluation de l'acoustique dans les mosquées maghrébines.

BIBLIOGRAPHIE.

Abdou, A.A. (2003). Comparison of the acoustical performance of mosque geometry using computer model studies. in Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands

Afridi, M.A. (2013). Contribution of Muslim Scientists To the World. An Overview of Some Selected Fields. International Islamic University Malaysia.

Aleshkin, V. M. Et al. (2021). Acoustics of the Ketchaoua Mosque in Algeria. *Journal of Acoustical Physics. Vol. 67, No.3.pp. 302-311. Pleiades Publishing, LTD., 2021.*

Álvarez-Morales, L., et al. (2014). A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. *Journal of Building and Environment.*

Arrar, M. (2014). Elaboration D'une Base De Donnees Des Mosques Du Beylik El Gharb : La Methode CE.S.A.D.A. (UNESCO), in Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger, Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger.

Article de Presse. (1852). Journal des Débats Politiques et Littéraires. p. 2. Paris. France.

Atay, G. and Z.S. Gül. (2020). Clay pots of Ottoman Architecture: Acoustics, structure and ventilation. in Proceedings of Meetings on Acoustics 179ASA. 2020. Acoustical Society of America.

Bacha, A.F. (1998). علوم أخرى منسوبة في تراث المسلمين.

Baumann, D., et al. (2008). Acoustics in sacred buildings, in Sacred Buildings, Birkhäuser.

Belabed Sahraoui, B. (2007). Politique municipale et pratique urbaine: Constantine au XIXe siècle. *Insaniyat/إنسانيات. Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales, 2007(35-36): p. 109-129.*

Benbella, Kh. (2008). معهد الآثار 2007-2008, جامعة الجزائر, المنشأة الدينية بالجزائر خلال العهد العثماني الجزائر, الجزائر

Benferhat, M.L., et al. (2022). Acoustical characterization of three Ottoman masjids built in Algeria. *Building Acoustics*, 2022: p. 1351010X221113000.

Berjon, M. (2007). Analyse des réflexions précoces. 2007

Beranek, L.L. (2006). Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006. **120**(3): p. 1399-1410.

Berardi, U., E. Cirillo, and F. Martellotta. (2009). A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009. **126**(4): p. 1838-1849.

Bouaziz, Y. (2002). المساجد العتيقة في الغرب الجزائري 2002, الأبيار, الجزائر.

Bourouiba, R. (1986). Apports de l'Algérie à l'Architecture Religieuse Arabo-Islamique. Office des Publication Universitaires, Alger.

Bouty, E., WALLACE-C. SABINE. (1901). Architectural Acoustics. Part. I. Reverberation (Acoustique architecturale. 1re partie. Réverbération).—Reprints of the American Architect, 1900. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1901. **10**(1): p. 38-48.

Burkhardt, T. (1985). L'Art de l'Islam, langage et signification, ed. S.-A. Sud 1985, Paris.

Carvalho, A.P.O. (1995). The use of the Sabine and Eyring reverberation time equations to churches. 129th meeting of the Acoustical Society of America. Washington DC. May 30-June 03, 1995.

Commission, I.E. (2003). Sound System Equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. IEC 60268-16 Ed. 3.0, 2003.

Chakroun, L. (2016). Analyse morphologique de quelques minarets de l'époque ottomane : essai de définition d'un 'style' ottoman. in Communication au 7ème Congrès sur : Le Corpus d'Archéologie Ottomane dans le monde Fondation Temimi, . 2016. Tunis, Tunisie: Cercle des Chercheurs sur le Moyen-Orient.

Desvallées, A. (2003). De la notion privée d'héritage matériel au concept universel et extensif de patrimoine: retour sur l'histoire et sur quelques ambiguïtés sémantiques. *Médias et patrimoine*, 2003: p. 19-35.

Devoulx, A. (1870). Les Eriges Religieuses De Ancien Alger, in *Revue Africaine* 1870: Algiers.

Driouèche Nadjiba-Kheira. (2001). Contribution à l'enrichissement de l'Architecture Platine. Dar Aziza Bey. Mémoire de la Djenina d'Alger, in *Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU) 2001*, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme.

Haëdo, D.D. (1612). Topographie Et Histoire Générale D'alger. 1612(<http://www.algerie-ancienne.com>).

Bouchareb A. (2006). CIRTA OU LE SUBSTRATUM URBAIN DE CONSTANTINE La région, la ville et l'architecture dans l'antiquité (Une étude en archéologie urbaine), in *Département d'Architecture et d'Urbanisme 2006*, Mentouri Constantine: Constantine, Algérie.

Eldien, H.H. and H. Al Qahtani. (2012). The acoustical performance of mosques main prayer hall geometry in the eastern province, Saudi arabia. in *Acoustics 2012*. 2012.

El-Khateeb, A.A. and M.R. Ismail. (2007). Sounds from the past the acoustics of Sultan Hassan Mosque and Madrasa. *Building Acoustics*, 2007. **14**(2): p. 109-132.

Elkhateeb, A., et al. (2015). The acoustics of Masjids, why they differ from the classical speech rooms. in *The 22nd International Congress on Sound and Vibration*. 2015.

Elkhateeb, A., et al. (2016). Are Our Masjids Suffering Excessive Reverberation! in *23rd International Congress on Sound & Vibration (ICSV23)*, Athens, Greece 10-24 July 2016. 2016.

Elkhateeb, A. (2019). What should the reverberation inside a masjid be?: A study exploring the demands of Imams, in *Worship Sound Spaces 2019*, Routledge. p. 77-103.

Elkhateeb, A. and S. Eldakdoky. (2021). The acoustics of Mamluk masjids: A case study of Iwan-type masjids in Cairo. *Applied Acoustics*, 2021. **178**: p. 107988.

Engel, Z. and K. Kosala. (2004). Reverberation indices in acoustic assessments of sacral structures. *Archives of Acoustics*, 2004. **29**(1).

- Fausti, P., R. Pompoli, and N. Prodi. (2003).** Comparing the acoustics of mosques and Byzantine churches. in 19th International Symposium CIPA. 2003. Citeseer.
- Foteinou, A. (2013).** Perception of Objective Parameter Variations in Virtual Acoustic Spaces, 2013, *Thesis of Doctor of Philosophy*, Department of Electronics, University of York.
- Galindo, M., T. Zamarreño, and S. Giron. (1999).** Clarity and definition in Mudejar-Gothic churches. *Building Acoustics*, 1999. **6**(1): p. 1-16.
- Garai, M., et al. (2015).** Acoustic measurements in eleven Italian opera houses: Correlations between room criteria and considerations on the local evolution of a typology. *Building and Environment*, 2015. **94**: p. 900-912.
- Gérard, K., René, Yezou, Frédéric, Kuznik. (2009).** Acoustique du bâtiment. Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- Golvin, L. (1985).** Le legs des Ottomans dans le domaine artistique en Afrique du Nord. *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée*, 1985. **39**(1): p. 201-226.
- Hafsi, F.Z. (2013).** Pour une conservation intégrée des sites archéologiques dans la politique nationale de l'aménagement du territoire exemple d'étude.
- Howard, D. and J. Angus. (2012).** *Acoustics and psychoacoustics* 2013: Routledge.
- ISO 3382-1.** Acoustics— Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces.
- Joanne, P. (2003).** L'espace sensible du monastère cistercien aux origines: essai de caractérisation des ambiances architecturales, 2003, Nantes.
- Karabiber, Z. (1999).** Acoustical problems in mosques: A case study on the three mosques in Istanbul. in *Forum Acusticum*, Berlin. 1999.
- Karabiber, Z. and S. Erdogan. (2002).** Comparison of the Acoustical Properties of an Ancient and a Recent Mosque. in *Forum Acusticum*. 2002. Spanish Acoustical Society (SEA) Seville,, Spain.
- Karabiber, Z. (2002).** The conservation of acoustical heritage. in *Proceedings of the First International Workshop on 3D Virtual Heritage*, Geneva, 2–3 October. 2002.

- Kassim, D., A. Putra, and M. Nor. (2015).** The acoustical characteristics of the Sayyidina Abu Bakar Mosque, UTeM. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2015. **10**(1): p. 97-110.
- Kayili, M Akustik, S.E. (1989).** Turk Vakif medeniyeti Cercevesinde ‘‘Mimar Sinan ve Donemi Sempozyumu’’. Vakiflar Genel Mudurlugu publications, Istanbul, 1989.
- Kayili, M. (2002).** Evolution of Acoustics and Effect of Worship Buildings on it. in *Forum Acousticum*. 2002.
- Kayili, M. (2005).** Acoustic solutions in classic ottoman architecture. Manchester: Aasiya Alla FSTC Limited, 2005.
- Kleiner, M., D.L. Klepper, and R.R. Torres. (2010).** *Worship space acoustics 2010*: J. Ross Publishing.
- Koumas Ahmed, N.C. (2003).** L'Algérie et son patrimoine, Dessins français du XIX siècle, in *Editions du patrimoine* 2003. p. 206
- Lallemand, C. (1891).** L'Ouest de l'Algérie. Réseaux exploités par la compagnie de l'Ouest-Algérien, lignes de l'Ouest-Algérien et de la Cie franco-algérienne, texte et dessins de Ch. Lallemand 1891: Challamel.
- Leipp, E. (1982).** Actes du Colloque international Viollet-le-Duc, Paris, 1980-1982: Nouvelles éditions latines.
- Letowski, T.R, and A.A. Scharine (2017).** Correlational analysis of speech intelligibility tests and metrics for speech transmission, 2017, US Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground United States.
- Long, M. (2005).** *Architectural acoustics* 2005: Elsevier.
- Maekawa, P et Lord, ZL. (1993).** *Environmental and Architectural Acoustics*. NY: CRC Press, 1993.
- Magrini, A. and P. Ricciardi. (2003).** Churches as auditoria: analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality. *Building Acoustics*, 2003. **10**(2): p. 135-157.

- Martellotta, F. (2009).** A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009. **125**(3): p. 1281-1284.
- Martellotta, F., et al. (2009).** Guidelines for acoustical measurements in churches. *Applied Acoustics*, 2009. **70**(2): p. 378-388.
- Martellotta, F. (2008).** Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *Journal of Sound and Vibration*, 2008. **317**(1-2): p. 378-399.
- Marsilio, M., N. Prodi, and R. Pompoli. (2001).** On the effect of floor inside mosques. in 17th International Congress on Acoustics. 2001.
- Mercier, E. (1903).** histoire de Constantine 1903: J. Marle et F. Biron.
- M'hiris, M. (2009).** بن عكنون, الجزائر. المساجد العثمانية بوهران و معسكر
- Oldham, D.a.E.A. (2008).** The absorption characteristics of Muslim worshippers. *Build Acoust*, 2008. **15**(4): p. 335-348.
- Orfali, W.A.(2007).** Sound parameters in mosques. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 153ASA*. Acoustical Society of America., (2007, June). **Vol. 1, No. 1, p. 035001.**
- Othman, A.R. and M.R. Mohamed. (2012).** Influence of Proportion towards Speech Intelligibility in mosque's praying hall. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012. **35**: p. 321-329.
- Palazzo-Bertholon, B., J.-C. Valière, and P. Carvalho. (2009).** Les vases acoustiques dans les églises médiévales: analyse des sources et études de cas. in *Actes du VIIe colloque biennal*. 2009.
- Palazzo-Bertholon, B. (2013).** La spatialisation des pots acoustiques dans l'espace liturgique et la matérialisation du son. *Acustica*, 2013. **99**: p. 70-81.
- Papier, A. (1890).** La Mosquée de Bone, in *La Revue Africaine* 1890, Adolphe Jourdan, Libraire-Editeur: Aler. p. 14.
- Pinson, D. (1993).** L'usage dans les doctrines architecturales, 1993, L'Harmattan.

- Prodi, N., M. Marsilio, and R. Pompoli. (2001).** On the prediction of reverberation time and strength in mosques. Proceedings of the 17th ICA, Rome, 2001.
- Ravoisié, A, (1846).** Exploration Scientifique de l'Algérie pendant les années 1840, 1841, 1842. Didot.
- Raymond, A. (1979).** La conquête ottomane et le développement des grandes villes arabes. Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée, 1979. **27**(1): p. 115-134.
- Sabbagh, M. and A. Elkhateeb. (2021).** Effect of body posture on sound absorption by human subjects. Applied Acoustics, 2021. **183**: p. 108317.
- Saoud, R. (2004).** Muslim architecture under Ottoman patronage (1326-1924). FSTC Limited, Manchester, 2004.
- Sciences, A.F.p.l.A.d. (1887).** Oran & l'Algérie en 1887 [Texte imprimé] : notices historiques, scientifiques et économiques / Association française pour l'avancement des sciences, [XVIIe session], congrès d'Oran, 1888. 1888. Oran: P.Perrier, 1888.
- Soeta, Y., et al. (2012).** Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. **131**(2): p. 1206-1220.
- Sü Gül, Z. and M. Çalışkan. (2013).** Acoustical Design of Turkish Religious Affairs Mosque. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013. **133**(5): p. 3404-3404.
- Sü Gül, Z. (2015).** Assessment of non-exponential sound energy decays within multi-domed monuments by numerical and experimental methods. 2015.
- Sü Gül, Z. (2019).** Acoustical impact of architectonics and material features in the lifespan of two monumental sacred structures. in Acoustics. 2019. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Topaktaş, İ.L. (2003).** Acoustical properties of classical Ottoman mosques: Simulation and measurements. 2003.
- Toufane, K.H. (1960).** العلوم عند العرب 1960. : مكتبة مصر

Valière, J.-C., et al. (2013). Acoustic pots in ancient and medieval buildings: literary analysis of ancient texts and comparison with recent observations in French churches. *Acta Acustica united with Acustica*, 2013. **99**(1): p. 70-81.

Vallet, M., et al. (2002). Psycho-perceptive judgements on acoustical qualities in old Turkish mosques. in *Forum acusticum Sevilla 2002: 3rd European Congress on Acoustics Sevilla*. 2002.

Vecco, M. (2010). A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible. *Journal of Cultural Heritage*, 2010. **11**(3): p. 321-324.

Weitze, C.A., et al. (2002). Comparison between In-situ recordings and Auralizations for Mosques and Byzantine Churches. in *Proceeding of joint Baltic-Nordic Acoustical Meeting*. 2002.

Xiang, N. (2020). Generalization of Sabine's reverberation theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020. **148**(3): p. R5-R6.

Yilmazer, S. and V. Acun. (2018). A grounded theory approach to assess indoor soundscape in historic religious spaces of Anatolian culture: A case study on Hacı Bayram Mosque. *Building Acoustics*, 2018. **25**(2): p. 137-150.

SITE WEB.

Kaynak. (2013). Bursa Valiliği, B.İ.K.v.T.M. 2013 [01 Octobre 2022]; Available from: <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/bursa/gezilecekyer/bursa-ulu-cami>.

La mosquée El-Djedid ou la Pêcherie. (2016). Barzakh:[Available from: <http://elconum.huma-num.fr/mosquee-de-la-pecherie.html>.

Mascara-Mosquée Sidi El-Hassen. (2014). [cited 2018; Eurêka:[Available from: https://www.delcampe.net/en_GB/collectables/postcards/algeria-other-cities/mascara-mosquee-sidi-el-hassen-edition-eureka-272102104.html#tab-terms.