République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Seddik BENYAHIA – Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Architecture

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :
MASTER ACADEMIQUE

Filière :
ARCHITECTURE

Spécialité :
ARCHITECTURE

Présenté par :
GUESSOUM Rafik
ALLAM Ishak

THEME :
Évolution de la mosquée en tant que patrimoine architectural religieux - Cas d'étude : Evaluation et réhabilitation de la mosquée de Sidi Ghanem- Mila

Date de la Soutenance : 15/09/2021.

Composition du Jury :

Ouari Mounia	MAA, université de Jijel, Président du jury
Djehaichia Salima	MAA, université de Jijel, Encadrant de mémoire
Djaber Khadidja	MAA, université de Jijel, Encadrant de projet
Kihal Hanane	MAA, université de Jijel, Membre du Jury

Année universitaire : 2020 - 2021

Sommaire :

Dédicace :…….

Remerciements :……....

Liste des figures :……..

Liste des tableaux :……

Liste des cartes :……

Chapitre I : Evolution de la mosquée en tant que patrimoine architectural

Introduction 4

I. Les éléments les plus communs de l'architecture de la mosquée 4

I.1 Les éléments constants : 4

I.2 Les éléments récurrents : 5

I.3 Les éléments transition : 5

I.2. Les principales caractéristiques de l'art architectural islamique à travers les siècles 6

I.2.1 L'époque des Fatimides d'Egypte (969-1171) : 6

I.2.2 L'époque des Seldjoukides : 10

I.2.3 L'époque des Ayyoubides (1174-1260) : 14

I.2.4 L'époque des Mamelouks (1260-1516) 18

I.2.5 L'époque des Ottomans : 21

Conclusion ..... ……26

Chapitre II : Matériaux et comportement de la maçonnerie

Introduction 27

II.1 Description des maçonneries : des constituants aux structures 27

II.1.1 Les éléments corps 27

II.1.2 Les éléments joints 32

II.2 Structuration des murs 33

II.2.1 Les murs d'appareil 33

II.2.2 Les murs constitués de deux parements en pierres de taille 35

II.2.3 Les murs 'organiques' (ou mixtes) 36

II.3 Propriétés des maçonneries 36

II.3.1 Comportement en compression 36

II.3.2 Comportement en traction 40

II.3.3 Comportement de la maçonnerie en flexion 42

II.3.4 Comportement de la maçonnerie en cisaillement 44

Conclusion 45

<u>Chapitre III :Méthodes d'auscultations et techniques de réhabilitation et/ou renforcement des structures en maçonnerie historiques</u>

Introduction 46

III.1 Problèmes de la maçonnerie 46

III.1.1 Formes d'altérations liées aux matériaux 47

III.1.2 Formes d'altérations liées à la structure 48

III.2 Méthodes d'auscultations des structures historiques 49

III.2.1 Auscultations non destructives 49

III.2.2 Auscultations destructives 54

III.3 Techniques de réhabilitation ou de renforcement des structures en maçonneries historiques ……..……..56

III.3.1 Renforcement traditionnel 56

III.3.2 Renforcement métallique ou avec du béton armé 57

III.4 Renforcement par matériaux composites 61

III.4.1.FRP 61

III.4.2 Exemple d'insertion de NSM FRP près de la surface 65

III .5 Matrice cimentaire renforcée par textiles 65
III .5.1.Renforcement par matériaux composite en utilisant une matrice cimentaire 67
III .5.2.Caractérisation de l'adhérence : types d'essais 68
Conclusion 68

Chapitre IV : Analyse et réhabilitation de la mosquée de sidi Ghanem – Cas d'étude

Introduction 70
IV.1 .Aperçu historique 70
IV.2 .situation de la ville de Mila 72
IV.3. Caractéristiques de la vieille ville de Mila 74
IV.4. Présentation de la mosquée de Sidi Ghanem- Cas d'étude 76
IV.4.1. Réutilisation de la mosquée de Sidi Ghanem 77
IV.4.2. Architecture et motifs ornementaux 81
IV.5. Dégradation de la mosquée 86
IV.6. L'intervention dans la structure pour le renforcer 86
IV.6.1. Intervention sur les voutes 86
IV.6.2. Intervention sur les murs porteurs 87
IV.6.3. Intervention sur les planchers 90
IV.6.4. Intervention pour les toitures 98
IV.6.5. Intervention pour les travaux secondaires 99
Conclusion 100

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents

De m’avoir laissé libre dans mes choix

D’avoir prié pour moi

Je leurs exprime ma profonde reconnaissance pour leur amour, leur confiance, leur soutien moral ainsi que pour leurs efforts,

Sacrifices et encouragements durant tout

Mon parcours

A mon encadreur

A mes Frères Zine Eddine et Abdelaziz et Alla Eddine

A mes ami(e)s avec lesquels j'ai partagé mes meilleurs moments

RAFIK

Remerciements

Tout d'abord, je remercie ALLAH tout puissant qui m'a

Donné, la volonté, le courage, la patience et l'endurance et

Qui a guidé mes pas vers le droit chemin pour réaliser ce

Travail.

J'adresse toute ma gratitude et mes remerciements à mes

Encadreurs Pr.DJEHAICHIA Salima et Pr. DJABAR Khadidja qui m'a proposé et dirigé ce travail. Je la remercie pour ses conseils, ses encouragements et sa confiance le long de la réalisation de

Ce travail

Un très grand merci à mes parents pour leur soutien inconditionnel tout au long

De mes études et la confiance qu'ils m'ont toujours témoignée. Merci à toute ma famille

Et mes amies

Pour leur présence à mes côtés.

Merci à tous…

Liste des Figures :

Fig. I.1 : La mosquée d'Al-Azhar 07
Fig. I.2 : La cour de la mosquée Al-Azhar 08
Fig. I.3 : Décor de stuc fatimide 09
Fig. I.4 : La mosquée du Shah Ispahan 11
Fig. I.5 : Plan de masse de la mosquée Shah Ispahan 11
Fig. I.6 : Demi-coupole et encadré par deux minarets 12
Fig. I.7 : Une cour symétrique à quatre iwans et un bassin central 12
Fig. I.8 : Salle de prière, couronnée d'une coupole couverte de céramiques sur ses faces intérieures et extérieures 13
Fig. I.9 : Décor en céramique de la mosquée 14
Fig. I.10 : Le complexe d'al-Malik al-Salih Najm al- Din Ayyub 15
Fig. I.11 : Plan du complexe 15
Fig. I.12 : Le magnifique portail en pierre sculptée avec motif islamique du minaret du complexe 16
Fig. I.13 : Minaret de madrasa al-Salih Najm al-Din Ayyub 17
Fig. I.14 : Mausolée d'al-Salih Najm al-Din Ayyub 17
Fig. I.15: Madrasa et le Mausolée d'al Malik al-Salih Najm al-Din Ayyub 18
Fig. I.16 : Complexe du sultan al-Nasir Hasan 19
Fig. I.16 : L'entrée du complexe 20
Fig. I.17 : Dôme de vestibule, Sultan Hasan complexe 20
Fig. I.18 : Mihrab et minbar en pierre sculptée dans la salle de prière du complexe 21
Fig. I.19 : La mosquée de Soliman à Istanbul 23
Fig. I.20 : Plan d'étage de la mosquée Süleymaniye 24
Fig. I.21 : Coupe transversale et longitudinale de la mosquée 24
Fig. I.22 : Coupole de la Mosquée de Suleymaniye 25
Fig. I.23: Galeries à arcades 25
Fig. I.24 : Décoration en céramique (pendentif et mihrab) 25
Fig.II.1 : Brique en terre cuite pleine 28
Fig. II.2 : Brique perforée 28
Fig. II.3 : Brique creuse 28
Fig. II.4 : Roche de granite 30
Fig. II.5 : Roche concassée 30

Fig. II.6 : Roche concassée 30
Fig. II.7 : Roche meulière 30
Fig. II.8 : Roche de marne 30
Fig. II.9 : Ardoise noire 30
Fig. II.10 : Illustration d'une boutisse parpaigne 31
Fig. II.11 : différentes types de mortiers 33
Fig. II.12 : Les principaux appareils de la maçonnerie en pierre 35
Fig. II.13 : Murs constitués de deux parements en pierres de taille 35
Fig. II.14 : Murs avec chaînages verticaux et horizontaux 36
Fig. II.15 : État de contrainte dans la maçonnerie, sous compression uniaxiale 37
Fig. II.16 : Résultats d'essais en compression uniaxiale -Courbes force-déplacement obtenues par Kaushik et. al. Mortier (Ciment: Chaux: Sable) , a) faible, b) fort et c) intermédiaire 39
Fig. II.17 : Modes de rupture en compression uniaxiale 40
Fig. II.18 : Essai de traction parallèle au lit de pose proposé par Backes 41
Fig. II.19 : Modes de rupture en traction uniaxiale, selon l'angle d'orientation des joints µ, d'après Samarasinghe 42
Fig. II.20 : Ruptures en flexion possibles ; V2, V1 : flexion verticale ; H : flexion horizontale ; O, U, C, L : flexion biaxiale 43
Fig. II.21 : Mécanismes de rupture locaux à l'origine de la rupture en flexion horizontale 43
Fig. II.22 : Modes de rupture possibles d'un mur chargé latéralement 45
Fig.III.1 : Le scléromètre 50
Fig.III.2: (a) Modes de transmission de l'onde acoustique,
(b) Caractérisation de la profondeur d'une fissure 51
Fig.III.3:(a) Technique de tomographie sonique, (b) Profil de vitesse de propagation du son et estimation de la profondeur de fissure 52
Fig.III.4: Radar 53
Fig.III.5 : Profil radar du dôme de la Basilique de l'immaculée conception à Baltimore 53
Fig.III.6 : Principe de l'essai de relâchement de contrainte 56
Fig.III.7 : Renforcement des ouvertures des éléments de maçonnerie 57
Fig.III.8 : Renforcement de la maçonnerie avec contrefort et ancrage de la pierre 58
Fig.III.9 : Comportement de cisaillement des murs renforcés avec remplacement de 2 à6 cm de mortier des joints : (a) sans utilisation des barres transversales (b) avec utilisation des barres transversales 59

Fig.III.10 : Renforcement des joints de mortier de la maçonnerie (a) avec cordes d'UHMWPE (b) avec barres d'aciere 61
Fig.III.11 : Renforcement avec bandes de CFRP comportement de cisaillement cyclique 62
Fig.III.12 : Formes de quelques barres, et Essai de de lamelles de FRP utilisées dans lémure renforcé Renforcement NSM 62
Fig.III.13 : Modes de rupture du joint collé 68
Fig. IV.1 : Plan du RDC de l'époque avant 1830 (OGEBC, Mila) 78
Fig. IV. 2 : Plan du RDC de l'époque d'avant 1837-1962 (OGEBC , Mila) 79
Fig. IV 3 : Plan du 1er étage -1837-1962- (OGEBC , Mila) 79
Fig. IV.4 : Plan du RDC actuellement (OGEBC, Mila) 80
Fig. IV. 5 : Plan du 1er étage actuellement (OGEBC, Mila) 81
Fig .IV.6 : Murs en brique de terre crue employée pour rehausser le niveau de la toiture 84
Fig .IV.7 : Vu sur les arcs 84
Fig .IV.8 : Vu sur les colonnes 84
Fig .IV.9 : Le minaret de la mosquée d'après Ravoisié 1846. 84
Fig .IV.10 : Décor de façade du mur de la cour 85
Fig .IV.11 : Décor des murs de la salle de prière 85
Fig .IV.12 :vue sur les voutes 87
Fig .IV.13 : les murs porteurs en pierre taillé 87
Fig .IV.14 : traitement des murs porteurs 90
Fig .IV.15 : vue sur les planchers 90
Fig .IV.16 : Consolidation par soudure de plaque d'aciers 92
Fig .IV.17 : Consolidation par ajout de poutrelles 94
Fig .IV.18 : La toiture (charpente en bois + tuile en panne) 94

Liste des tableaux :

Tableau II.1 Propriétés mécaniques des éléments corps 31
Tableau II.2 : Propriétés mécaniques des joints suivant le dosage..... 33
Tableau II.3 : Résistance moyenne à la compression de mortier 37
Tableau II.4 : Facteur de forme δ 38
Tableau II.5 : Différentes valeurs des paramètres K,α, et β 38
Tableau III.1 : Comportement d'acier et de FRP classé selon la nature des fibres 63
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques moyennes des résines époxy 63
Tableau III.3 : Propriétés de fibres employées dans le TRC en comparaison aux l'acier et la résine 66

Liste des cartes :

Carte N° 01 : La situation géographique de la wilaya de Mila 73
Carte N° 02 : La situation administrative du chef-lieu de la wilaya de Mila..... 73
Carte N° 03 : La situation administrative du chef-lieu de la wilaya de Mila..... 74
Carte N° 04: Les quatre portes de la veille Ville de Mila 75
Carte N° 05 L'Accessibilité du vieux Mila, Direction de la culture de la wilaya de Mila..... 75
Carte N°06 : La situation de la Mosquée de sidi Ghanem par rapport à la veille ville de Mila..... 77

Introduction générale

La civilisation islamique s'illustre par une architecture très riche est diversifiée, et la mosquée en occupe une place très importante. La mosquée, monument religieux particulier au culte musulman, elle sert d'institution sociale et éducative. Elle sert aussi de lieu de rencontres et d'échanges sociaux. L'architecture de la mosquée a connue une évolution partant de l'installation du premier pilier de la première mosquée dans l'islam et passant par les différentes civilisations qui ont laissées leurs empreintes sur cet édifice. Nous mettrons en évidence dans ce mémoire les principales caractéristiques de l'art architectural islamique à travers les siècles (L'époque des Fatimides, Seldjoukides, Ayyoubides, Mamelouks et Ottomans). En donnant et analysant des exemples afin de montrer la spécificité de l'architecture de la mosquée pour chaque époque.

La plus part des monuments historiques ont été réalisés en maçonnerie. Les constructions en maçonnerie sont très répandues, car elles sont relativement facile à réaliser et peu coûteux. La maçonnerie se divise en plusieurs catégories, chaque catégorie a des particularités et est utilisée pour différentes raisons. Dans ce travail, nous décrivons les constituants les plus usuels des maçonneries et comment ils peuvent être assemblés pour former les principaux types de maçonneries. Ensuite, nous donnerons quelques indications sur le comportement global des maçonneries sous différentes sollicitations.

Le patrimoine a constitué une problématique pour toutes les civilisations en termes de vulnérabilité. Généralement, les pathologies dans les constructions en maçonneries sont classées en deux types : les pathologies liées aux matériaux et à la structure.
Les monuments historiques vulnérables sont des structures difficiles à analyser, et nécessitent une méthodologie d'intervention pour réduire le niveau d'endommagement. L'analyse de ces structures nécessite des informations sur la géométrie, les détails au niveau des sections et les techniques de construction de l'époque. Il importe aussi de savoir les propriétés et le comportement local des matériaux, ainsi le comportement global des éléments de la structure
L'examen des structures en maçonnerie emprunte deux voies complémentaires : une voie non-destructive et une voie destructive. Dans le cadre d'étude de monuments historiques, le diagnostic devra toujours privilégier les méthodes in situ non destructives préservant au mieux l'édifice.

Problématique

Dans ce mémoire, nous orienterons notre recherche vers l'un des monuments les plus importants en Algérie, c'est la mosquée de Sidi Ghanem. Cette grande mosquée du vieux Mila pose un véritable problème, tout d'abord nous ne connaissons pas sa forme originelle et nous ne savons pas comment elle a évolué dans le temps.

Ajouté à cela la dégradation de ce monument à cause d'une accélération potentielle de son altération du fait de l'influence des conditions environnementales, ainsi de son réutilisation à l'époque coloniale. Par conséquentes, le processus de réhabilitation et/ ou renforcement de cette mosquée constitue assurément l'un des problèmes les plus délicat.

Méthodologie

Actuellement, la mosquée de Sidi Ghanem fait l'objet de diverses études de restauration et de réhabilitation qui n'a pas encore abouti, elle demeure un champ de recherche et d'études archéologiques toujours en cours. Au regard à la symbolique et à l'importance de ce monument, notre objectif consiste à faire une analyse et une évaluation de cette mosquée, à déterminer les causes de dégradation, trouver des solutions pour la réhabiliter, la remettre à l'état fonctionnel, et découvrir des méthodes et techniques de renforcement. Afin d'atteindre notre objectif de recherche, le présent manuscrit est composé en quatre chapitres comme suit :

Structuration du mémoire

Dans le premier chapitre, seront exposés les éléments les plus communs de l'architecture de la mosquée et l'évolution de la mosquée en tant que patrimoine architectural, en présentant les principales caractéristiques de l'art architectural islamique à travers les siècles (L'époque des Fatimides d'Egypte, Seldjoukides, Ayyoubides, Mamelouks et Ottomans). En donnant des exemples afin de montrer la spécificité de l'architecture de la mosquée pour chaque époque

Le deuxième chapitre présente une introduction générale sur la maçonnerie, en détaillant la nature des éléments corps et des éléments joints et la structuration des murs en maçonnerie. On expose ensuite, d'un point de vue mécanique l'importance du choix des matériaux dans une maçonnerie. Enfin, on montre le comportement des maçonneries face à diverses sollicitations extérieures (compression, traction et cisaillement).

Dans le troisième chapitre, seront exposés différentes problèmes et pathologies de la maçonnerie, deux familles d'investigations des monuments historiques ont été répertoriées : les méthodes destructives et les méthodes non destructives, ainsi de présenter les différentes techniques de réhabilitation ou de renforcement des structures en maçonneries historiques.

Enfin le quatrième chapitre (qui présente le cas d'étude- la mosquée de Sidi Ghanem) est consacré à traiter des données existantes sur la question de la réutilisation de ce monument historique, son analyse en termes de son architecture, la technique de sa construction et l'ornementation de ses murs qui portent l'empreinte de plusieurs époques. Nous montrons aussi les causes de la dégradation de cette mosquée, ainsi de proposer des techniques de réhabilitation / et ou renforcement de quelques éléments endommagés de ce monument.

Introduction

La civilisation islamique s'illustre par une architecture très riche est diversifiée, et la mosquée en occupe une place très importante et particulière. Une mosquée est un lieu de culte où se rassemblent les musulmans pour les prières communes. L'ensemble architectural est le plus souvent entouré d'une ou plusieurs tours, ou minarets, dont le nombre n'est pas limité. Le toit est souvent en forme de dôme. C'est du haut d'un des minarets que le mouadh-dhin appelle à la prière au cours de l'adhan. Une mosquée est plus qu'un lieu de culte ; elle sert d'institution sociale et éducative : elle peut, ainsi, être accompagnée d'une madrassa, d'une bibliothèque, d'un centre de formation, voire d'une université. Elle sert aussi de lieu de rencontres et d'échanges sociaux.

La mosquée a constitue un facteur de richesse et un élément constructif dans la dynamique de l'évolution de l'architecture et de l'urbanisme à travers les différentes périodes qui ont traversé son territoire. L'architecture de la mosquée a connue une évolution partant de l'installation du premier pilier de la première mosquée dans l'islam et passant par les différentes civilisations qui ont laissées leurs empreintes sur cet édifice.

I. Les éléments les plus communs de l'architecture de la mosquée

I.1 Les éléments constants :

- **La salle de prière *:*** une des caractéristiques de l'islam qui n'a pas besoin de temples spéciaux pour exprimer la foi. La prière peut se faire n'importe où selon le prophète, « la terre entière est un masdjid, une mosquée ». Le prophète n'éprouve le besoin de bâtir que lorsqu'il se fait exilé à Médine. La forme de la salle de prière dépend des styles, peut-être de type hypostyle (soutenue par des colonnes ou des piliers), plus profonde que large (Médine, Kairouan), soit plus large que profonde (Espagne, Maroc, Algérie).

- **Le mihrab *:*** Le mihrab est une niche qui signale architecturalement la qibla, orientée en direction de La Mecque, vers laquelle on se tourne pour accomplir les prières quotidiennes. Le calife ou son représentant, qui dirigeait officiellement la prière (imam), devait se tenir dans le mihrab ou à son seuil. Cette coutume a contribué à faire du mihrab un lieu privilégié de la décoration architecturale. Il était placé dans une travée surmontée d'une coupole et décorée de mosaïques, de céramiques ou de plâtre

ouvragé. Il va sans dire que le mihrab n'est pas un sanctuaire ; il n'y a pas d'endroit particulièrement sacré dans la mosquée.

- **Le minbar *:*** Une des principales cérémonies qui se déroulent à la mosquée est la Prière du Vendredi où est prononcée la khutba, à laquelle tout musulman adulte doit assister. La khutba est un sermon prononcé par le guide de la communauté ou son représentant légitime et qui, dans les débuts de l'Islam du moins, avait un contenu politique autant que moral. L'orateur parle au-dessus d'une chaire, le minbar, située à la droite du mihrab et que l'on a décorée de plus en plus richement au fil des siècles. Cependant, la hauteur de la chaire, le nombre de marches, l'inclinaison de l'escalier et même la présence ou l'absence de dais semblent déterminés uniquement par des questions de goût.

I.2 Les éléments récurrents :

- **La cour *:*** la cour jouait un grand rôle dans la maison du Prophète à Médine, construction devenue, en fait le premier masdjid. Il était ainsi naturel que l'architecture religieuse musulmane accordait à la cour une place de première importance, surtout que L'islam est né dans un climat chaud ou la pluie est très rare, d'où la possibilité de faire la prière en plein air.

- **Le minaret *:*** du haut de laquelle le mouadh-dhin faisait les cinq appels à la prière par jour. La mosquée du prophète à Médine était dépourvue de minaret. Bilai faisant l'appel à la prière (Adhân) du haut du toit d'une maison voisine, puis, ensuite, après la prise de la Mecque, du haut de la Kaaba. Fort possible que l'apparition du minaret fut en (88 H/ 706 ap-jc) 47 lors de la reconstruction de la mosquée de Médine par le Calife omeyyade Al-Walid. Les minarets sont des éléments signalétiques qui marquent les visages des villes et leurs impriment un caractère authentique. Eléments importants des mosquées qui sont « des témoignages fort intéressants sur les courants artistiques et culturels qui ont traversé le pays », les minarets sont susceptibles de représenter une identité culturelle relative à un temps et un espace donnés qui se manifeste en styles architecturaux.

- **La galerie à portique** *:* dans la plupart des cas, la cour fut bordée de galeries couvertes, ou les fidèles pouvaient se mettre à l'ombre et, souvent, Elle fut plantée d'arbres qui remplissaient le même buta.

I.3 Les éléments transition :

- **La Grille :** De nombreux édifices islamiques étaient éclairés par la cour centrale, mais des fenêtres étaient parfois nécessaires, soit pour améliorer l'éclairage, soit, en claires-voies, pour mettre en valeur le chemin axial conduisant au mihrab. La lumière jouait un rôle esthétique beaucoup plus important et les fenêtres étaient souvent vitrées, avec des verres de couleurs vives. Même dans ce cas, leur rôle dans la décoration architecturale extérieure demeure mince.

- **La Madrasa :** La madrasa était (et reste) l'institution islamique type d'enseignement supérieur où l'on pouvait apprendre l'exégèse du Coran, la tradition et le droit islamiques ainsi que diverses autres disciplines.

I.2. Les principales caractéristiques de l'art architectural islamique à travers les siècles

I.2.1 L'époque des Fatimides d'Egypte (969-1171) :

L'Egypte fut le centre du pouvoir du califat fatimide entre 969 et 1171. La mosquée-université d'al-Azhar au Caire est considérée comme l'une des édifications religieuses fatimides les plus importantes, cette dernière est le produit d'un mélange entre l'architecture tunisienne et l'architecture locale, en outre parmi les autres bâtiments emblématiques de la dynastie fatimide d'Egypte on trouve la mosquée al-Hakim.
Pour ce qui est des constructions civiles, il ne reste des nombreux châteaux construits par les Fatimides que des descriptions mettant en exergue leur splendeur. Notons qu'en Algérie les architectes fatimides construisirent divers châteaux et citadelles comme la citadelle de Banî Hamâd, le château Dâr al-Bahr qui se caractérise par son immense étang ou encore le château d'al-Manâr qui est l'édifice le plus marqué par les influences fatimides.
Les éléments architecturaux les plus significatifs de cette époque sont les mihrabs, les arcs fermés, les niches de lampe, les vases ou les marqueteries, la période des Fatimides d'Egypte est considérée en outre comme la période de l'enracinement de l'ornementation islamique [I.1]

- **La mosquée al-Azhar**

La mosquée et l'université Al-Azhar se situent au cœur du Caire depuis le Xe siècle (datant de l'époque fatimide en Egypte). Centre religieux majeur de l'Egypte et du monde sunnite dans son ensemble, elle exerce depuis sa création une réelle influence sur la société égyptienne. Son histoire millénaire et son emplacement au centre du monde arabe lui ont permis d'acquérir un statut incomparable dans le monde musulman. L'origine de son nom n'a pas fait l'unanimité mais il semblerait que les Fatimides l'aient appelée « Al-Azhar » en hommage à Fâtimah Az-Zahrâ'.

Fig. I.1 : La mosquée d'Al-Azhar **[I.2]**

Elle fut édifiée dans la nouvelle ville du Caire sur ordre du calife fatimide Al- Muizz. Dès 988-989, elle devint madrasa et fut dotée, par le calife al-Azîz, d'un enseignement chiite, permettant de former des missionnaires. Très importante durant toute l'histoire du Caire, elle a été largement reprise, agrandie, aménagée et restaurée au fil du temps. De plan arabe, elle se composait à l'origine d'une salle de prière hypostyle rectangulaire à cinq nefs parallèles à la qibla, une travée centrale perpendiculaire plus large, magnifiant le mihrâb. Ce schéma

reprenait celui d'Ibn Tulûn et, plus lointainement, celui de la Grande Mosquée de Damas. L'allée centrale était bordée de couples de colonnes, comme à Kairouan [I.2].

La cour était alors entourée d'un portique à colonnes sur deux côtés seulement, à l'instar de mosquées de l'Occident musulman, comme celles de Cordoue et, Kairouan, ce qui pourrait rappeler l'épisode maghrébin de la dynastie fatimide (909 – 969), précédant leur arrivée en Égypte. Il y aurait eu trois dômes, l'un devant le mihrâb, les deux autres aux angles du mur qibla de la salle de prière. Deux nouveaux portiques à colonnes autour de la cour et un dôme à l'entrée du transept furent ajoutés sur ordre du calife Al-Hafiz (1131 – 1149). Le revers de l'entrée et l'entrée de la nef centrale furent alors signalés par des groupes de trois colonnes.

Fig. I.2 : La cour de la mosquée Al-Azhar [I.2]

La mosquée présente encore par endroits un riche décor de stuc fatimide, où se mêlent des éléments végétaux naturalistes (palmiers) ou stylisés, des motifs géométriques comme des rosaces et des calligraphies en kufique fleuronné

La plupart des motifs de stuc dérivent de ceux des mosquées de Samarra (Irak, deuxième moitié IXe siècle) et Ibn Tulûn, mais d'autres décors rappellent des oeuvres byzantines, en particulier les pendentifs de Sainte-Sophie

Fig. I.3 : Décor de stuc fatimide [I.2]

L'édifice fut abandonné sous les Ayyubides, qui désiraient rétablir le sunnisme et supprimer toute trace du chiisme fatimide. Mais sous les Mamlûks, elle retrouva une place prépondérante, grâce aux restaurations du sultan al-Zâhir Baybars en 1266, qui lui donna le privilège de la prière du Vendredi. Les autres sultans mamluks lui ont ajouté plusieurs madrasas, en 1309 (Madrasa al Taibarsiyya), 1340 (madrasa Al- Aqbaghadiyya), 1440 (La Madrasa al- Jawhariyya, coté nord-est).

D'autres ont construit des minarets : un par Qâit Bay en 1468, deux autres par al- Ghurî ; à deux lanternons, ils se distinguent par leur deux escaliers permettant la montée simultanée de deux personnes sans se voir. De nouveaux travaux eurent lieu à la période ottomane : 'Abd al-Rahmân Katakhûda entreprit en 1753 des travaux de restauration et d'importants ajouts,

agrandissant la mosquée en lui ajoutant des nouvelles travées, après avoir détruit en partie le mur qibla à gauche du mihrâb, laissé intact. Il restaura également les madrasas Taybarsiyya et Aqbaghdiyya, et ajouta à la mosquée trois minarets, dont un a été détruit à l'époque du Khédive Abbas Hilmî II

I.2.2 L'époque des Seldjoukides :

La dynastie seldjoukide régna sur Bagdad de 1055 à 1174, et parmi les constructions religieuses les plus importantes édifiées par celle-ci il y a la Grande mosquée d'Ispahan au plan en forme de croix et qui est inspiré de l'architecture profane.

Les caractéristiques les plus importantes de l'architecture seldjoukide sont : les entrées assez basses, les grandes salles surplombant une cour intérieure en général sur ses quatre côtés et sur trois côtés seulement dans le cas de la présence d'un harem, les bassins et fontaines au milieu de la cour, la diversité de la forme des petites voûtes ou la décoration des bâtiments à l'aide d'écritures, et à propos de ce dernier élément il faut savoir que les Seldjoukides initièrent l'utilisation de l'écriture calligraphique pour décorer les édifices, de même qu'ils développèrent les divers aspects de l'art pictural[I.1].

- **La mosquée du Shah Ispahan**

Édifiée par Shah Abbas le Grand entre 1611 et 1628, et achevée sous le règne de son successeur Shah Safi vers 1630. Elle symbolise le pouvoir royal et spirituel.

La mosquée du Chah est une mosquée persane elle se compose d'une cour rectangulaire à ciel ouvert, entourée de salles de prière. Sur chaque côté de la cour se dresse un iwan, grand portail voûté plus ou moins profond. La salle de prière à coupole, précédée d'un iwan et flanqué de deux minarets est orientée perpendiculairement vers La Mecque. Elle est jouxtée de deux madrasas. Une disposition particulière, en oblique par rapport à l'axe nord-sud de la place permet à la mosquée d'être orientée vers la Mecque [I.3].

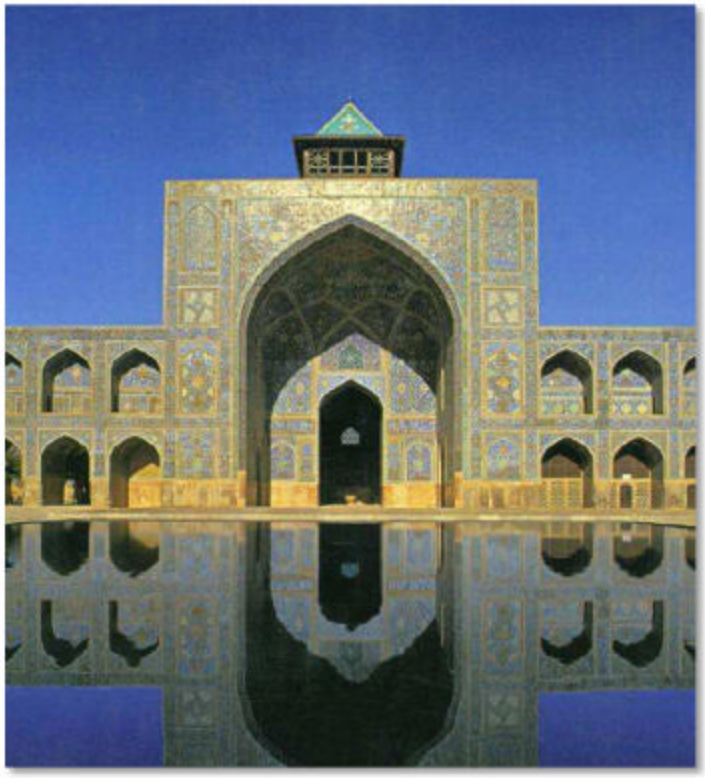


Fig. I.4 : La mosquée du Shah Ispahan [I.3]

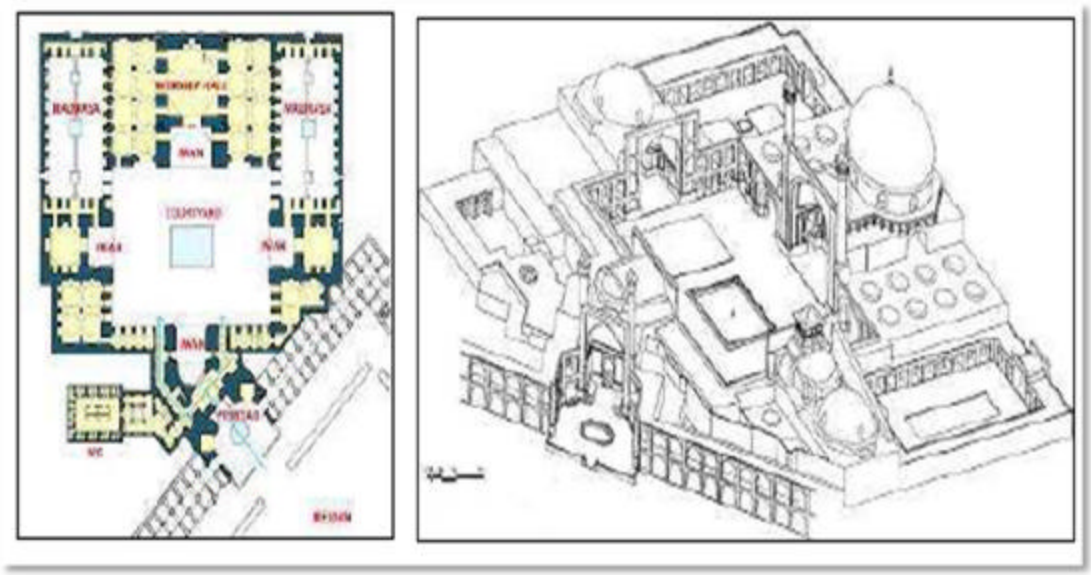


Fig. I.5 : Plan de masse de la mosquée Shah Ispahan [I.3]

Un immense porche surmonté par une demi-coupole et encadré par deux minarets revêtus de mosaïques de faïence émaillée marque l'entrée de la mosquée. Il est prolongé par un iwan donnant sur la cour intérieure.

Fig. I.6 : Demi-coupole et encadré par deux minarets [I.3]

Une cour symétrique à quatre iwans et un bassin central, fortement rythmée par des arcades hautes de deux étages. Les quatre iwans ordonnés en symétrie s'ouvrent sur la cour et le bassin central Leur image se reflète dans l'immense bassin. Les salles voûtées des iwans sont ornées de céramiques.

Fig. I.7 : Une cour symétrique à quatre iwans et un bassin central [I.3]

La salle de prière, orientée vers la Mecque est couronnée d'une coupole couverte de céramiques sur ses faces intérieures et extérieures.

De part et d'autre de la salle de prière se trouvent deux madrasas avec une cour et des bassins Le décor de la mosquée est réalisé en céramique. La couleur dominante est le bleu, mais on trouve aussi des couleurs comme le jaune et le vert, déclinant surtout des motifs floraux et des calligraphies de versets coraniques

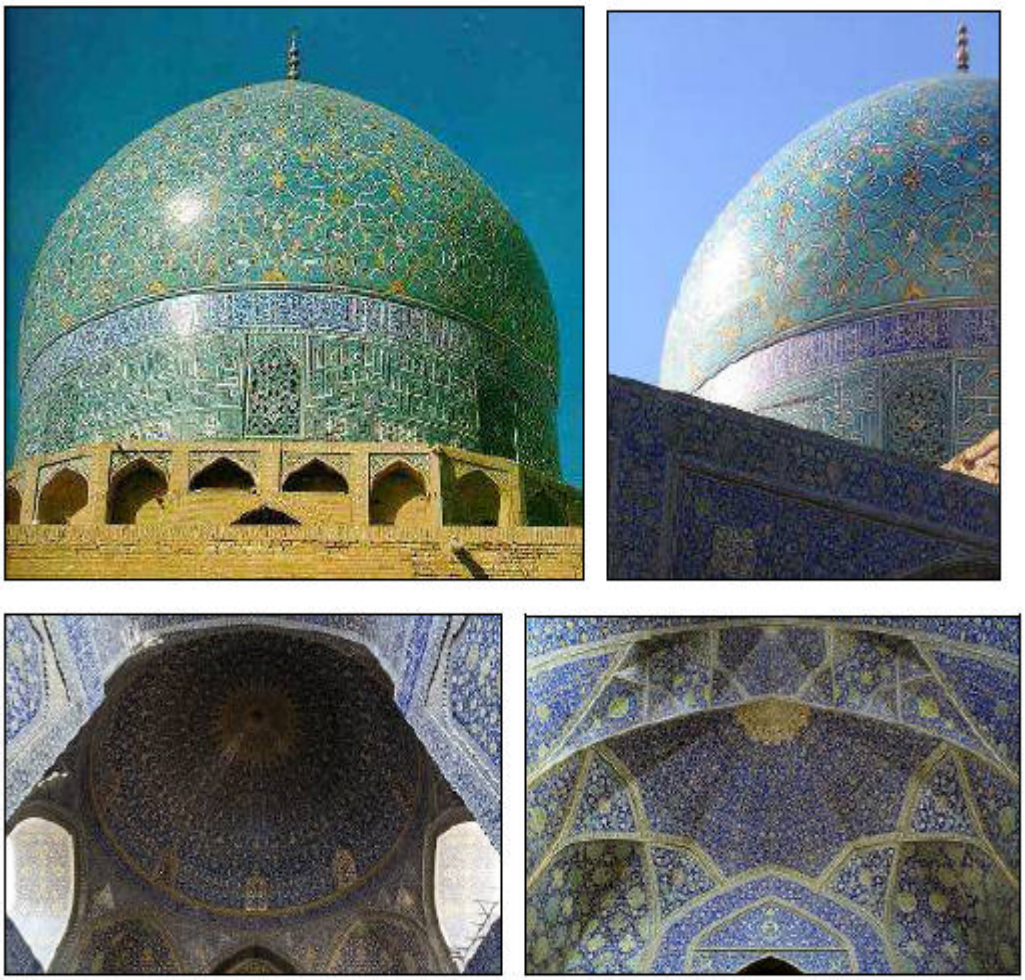


Fig. I.8 : Salle de prière, couronnée d'une coupole couverte de céramiques sur ses faces intérieures et extérieures [I.3]

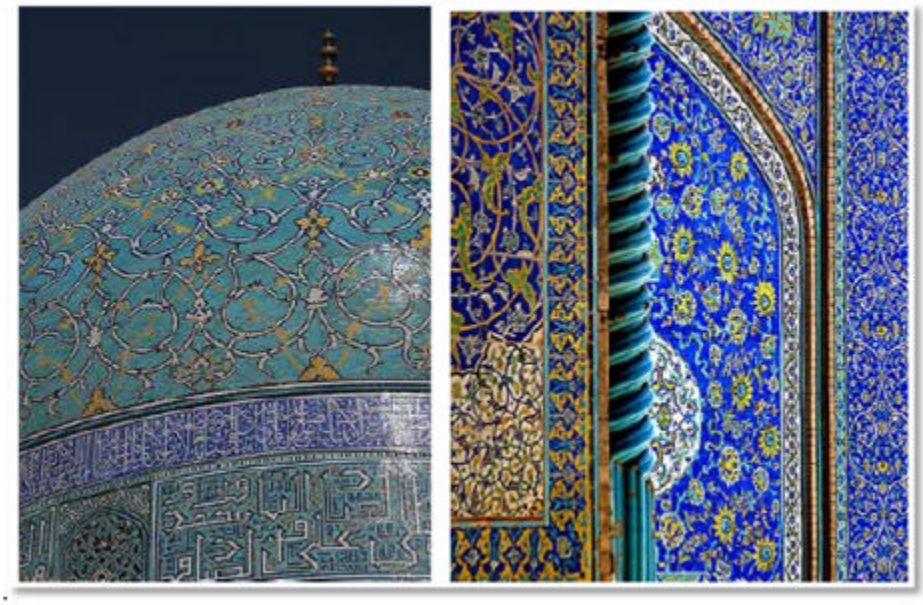


Fig. I.9 : Décor en céramique de la mosquée **[I.3]**

I.2.3 L'époque des Ayyoubides (1174-1260) :

Salah al-din al-Ayyubi (Saladin) mit fin au califat fatimide d'Egypte et combattit les Croisés. Ce grand chef musulman prêta tout au long de son règne une attention particulière à l'architecture militaire, notons à ce propos que l'architecture militaire ayyoubide est considérée comme le prolongement de l'architecture militaire des Seldjoukides, et ce, que ce soit en Egypte ou en Syrie. C'est ainsi que Salah al-dîn procéda à l'agrandissement des cités, à la rénovation des murailles, à l'édification de forteresses (comme celle de Damas) et de bâtiments civils et religieux comme des mosquées ou des écoles (comme l'école al-Âdaliyya à Damas) ainsi qu'à la construction de sorte de couvents pour les mystiques.

Les Ayyoubides utilisèrent pour l'édification des forteresses des grosses pierres bombées ; par ailleurs, leurs constructions se caractérisaient par un style épuré et simple. C'est ainsi que les ornementations dans les édifices ayyoubides étaient limités à des endroits bien précis comme par exemple au-dessus des entrées ou autour des fenêtres ; toutefois, cette époque vit l'apparition d'éléments ornementaux nouveaux que l'ont trouvait au-dessus des entrées principales des divers édifices (comme des devises ou des symboles), et justement ces entrées principales gagnèrent encore en hauteur [I.1].

- **Le complexe d'al-Malik al-Salih Najm al- Din Ayyub :**

Cette madrasa fut la première en Égypte à dispenser des cours suivant les quatre écoles de droit religieux sunnite : shaféite, malikite, hanafite et hanbalite. Les madrasas islamiques remplissent deux fonctions principales : l'enseignement et la prière.

Fig. I.10 : Le complexe d'al-Malik al-Salih Najm al- Din Ayyub[I.2].

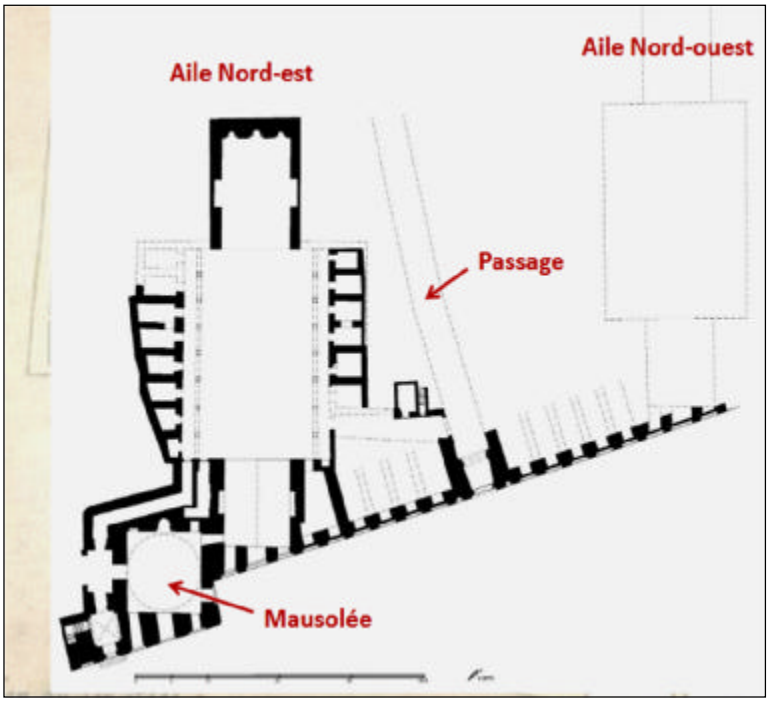


Fig. I.11 : Plan du complexe **[I.2]**.

La madrasa se compose de deux ailes distinctes séparées par un passage public. Chacune était dotée d'une cour et de deux iwans, dédiés à chaque rite sunnite. De la seconde partie, il ne reste que la façade nord-ouest. C'est par une magnifique entrée couronnée d'un minaret que l'on accédait à la madrasa. La porte d'entrée est surmontée d'une niche aveugle formée d'un arc brisé surbaissé cerné d'un décor rayonnant de godrons qui donnent naissance à des muqarnas.

Fig. I.12 : Le magnifique portail en pierre sculptée avec motif islamique du Minaret du complexe [I.4].

Dans la partie supérieure se trouve le seul minaret ayyubide entièrement préservé de nos jours. Il se compose de trois niveaux :

- Le premier est de forme carrée et présente sur chacune de ses faces des niches dans une arcature polylobée surmontée d'un motif de godrons rayonnant.
- Le second est octogonal et cerné d'un balcon de bois en encorbellement destiné au muezzin. Sur chacune de ses faces on retrouve le motif de niche et d'arcature du niveau inférieur.
- Enfin, le minaret est couronné d'un étage ajouré décoré d'arcatures polylobées surmontées de muqarnas et achevé d'un dôme côtelé.

Fig. I.13 : Minaret de madrasa al-Salih Najm al-Din Ayyub [I.2].

Le mausolée fut édifié par la femme du sultan en 1250. C'est le premier en Égypte à être rattaché à une madrasa. De plan carré, il est surmonté d'un dôme élevé posé sur une haute zone de transition en muqarnas. Le mausolée possède un mihrâb orné d'incrustations de fines plaques de marbre coloré. La façade du mausolée est considérée comme le prolongement de la façade de la madrasa, qui contient la porte du mausolée.

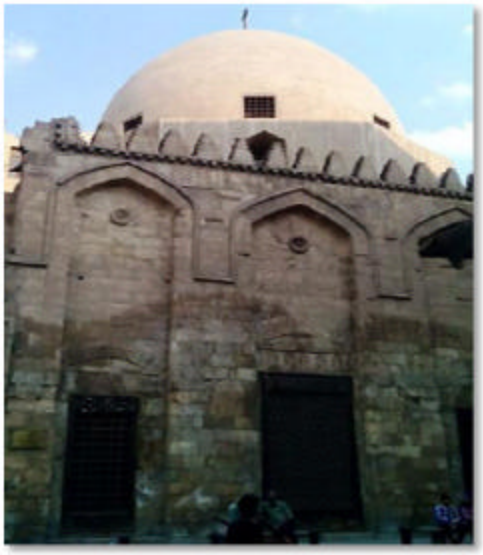


Fig. I.14 : Mausolée d'al-Salih Najm al-Din Ayyub [I.2]

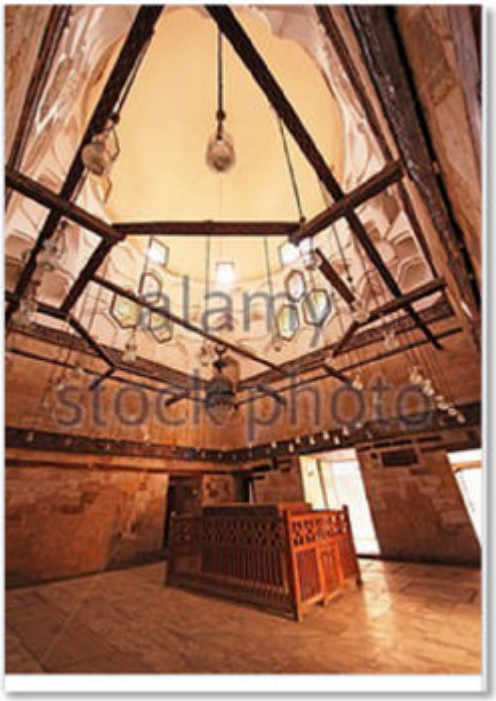


Fig. I.15: Madrasa et le Mausolée d'al Malik al-Salih Najm al-Din Ayyub [I.5].

I.2.4 L'époque des Mamelouks (1260-1516)

Les Mamelouks régnèrent sur l'Egypte, le Cham, la péninsule arabe, le Yémen et la Libye, et durant leur période de domination tous ces pays et régions sous domination mamelouke connurent des mélanges d'influences et des échanges mutuels dans le domaine de l'architecture. Il est à noter que la première période de leur règne est considérée comme une époque florissante et prospère et cela se voit dans les châteaux, les écoles, les marchés ou encore les hammams édifiés à cette époque. L'architecture mamelouke se caractérisait par la diversité de ses ornementations, et notamment les Ranûks (devises et symboles) dont l'utilisation de répandit largement.

Il est remarquable que la cour intérieure n'était plus alors considérée comme un élément essentiel dans la plupart des édifices mamelouks, c'est ainsi que ces derniers ne possédaient en général aucune cour intérieure ouverte ou couverte comme c'était déjà le cas dans la mosquée al-Tirûzî ou l'école al-Djamaqiyya à Damas.

L'architecture mamelouke était basée sur l'utilisation de pierres extrêmement bien taillées ainsi que sur l'alternance des couleurs noire et blanche pour les pierres des arasement (dernière assise d'un mur) ou parfois des couleurs jeune et rouge, notons que cette alternance des couleurs pouvait être utilisée sur toute la façade des murs ou bien sur une partie seulement. Il apparut à l'époque mamelouke des formes d'arc nouvelles, de même que se développa l'utilisation des coupoles soutenues par des fûts qui étaient des sortes de colonnes de formes géométriques diverses. Enfin, on vit pour la première apparaître des minarets à forme cylindrique. **[I.1]**.

- **Complexe du sultan al-Nasir Hasan**

Ce complexe a été érigé pendant le règne du sultan mamluk al-Nasir Hasan, et comporte une mosquée, quatre madrasa et un mausolée au sud-est, en saillie sur la rue. De monumentales façades encerclent l'ensemble, couronnées d'une corniche à muqarnas.

Fig. I.16 : Complexe du sultan al-Nasir Hasan

L'entrée est encadrée de bandeaux à décor géométrique et surmontée d'une niche à muqarnas couronnée d'un demi-dôme nervuré. On pénètre ensuite dans un vestibule à coupole sur pendentifs à muqarnas complétée par trois demi-dômes, qui évoque les plans centrés de l'architecture byzantine.

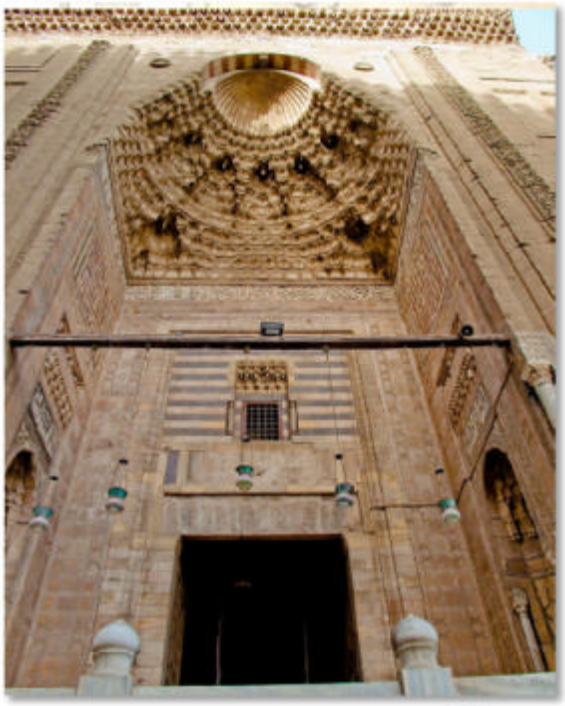


Fig. I.16 : L'entrée du complexe [I.2]

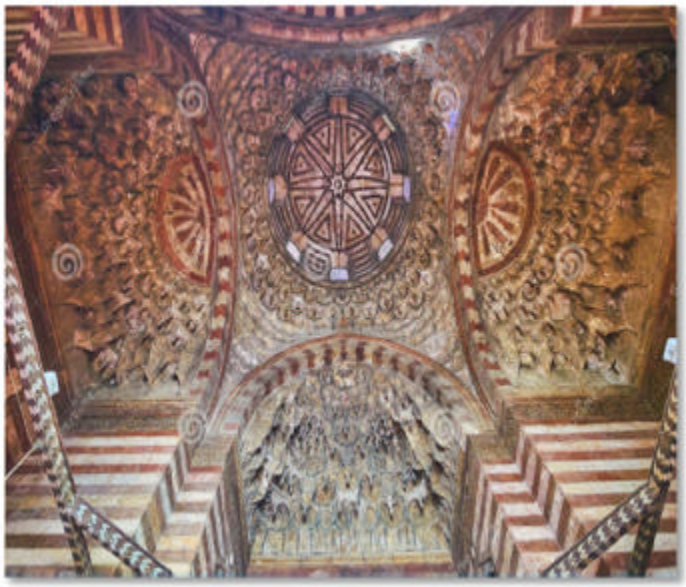


Fig. I.17 : Dôme de vestibule, Sultan Hasan complexe [I.2]

Un couloir coudé mène au cœur du complexe, organisé autour d'une cour pavée de marbre polychrome, agrémentée d'une fontaine à ablutions octogonale, et encadrée par quatre iwans. Quatre madrasas sont accessibles par des entrées ménagées à proximité des iwans nord et sud. Organisés autour d'une cour centrale dotée d'un iwan côté qibla, ces ensembles sont complétés par quatre étages de cellules pour les étudiants. Une porte ménagée dans le mur de la qibla permet l'accès au mausolée du sultan, surmonté d'une coupole sur pendentifs à

muqarnas. Le décor est concentré sur le portail, l'iwan de prière et le mausolée. Marqueterie de marbre, pierre sculptée, bandeaux épigraphiques en marbre, en stuc ou encore en bois doré laissent apparaître des inspirations variées

Fig. I.18 : Mihrab et minbar en pierre sculptée dans la salle de prière du complexe [I.6]

I.2.5 L'époque des Ottomans :

Les Ottomans mirent à bas l'empire byzantin en 1453, il est donc à noter que du point de vue architectural les édifices ottomans furent très influencés par le style de l'église Sainte-Sophie qui fut bâtie par l'empereur Justinien au VIe siècle. De plus on peut dire que de manière plus générale l'architecture islamique de cette époque fut influencée par les styles architecturaux présents dans la ville de Constantinople ainsi que par l'art architectural des Seldjoukides. Et après la conquête du Châm par les Ottomans en 1516, les traditions architecturales de l'époque des Mamelouks se mélangèrent aux influences ottomanes. Dans le domaine de l'architecture religieuse, le harem à forme carrée s'est vu recouvert par un dôme à une seule retombée (assise qui forme la naissance d'un arc, d'une voûte) percé par des fenêtres pour l'éclairage, et à partir de cette époque le harem ne fut plus séparé en ailes distinctes et en corridors. Notons que pour accéder à la salle de prière il fallait franchir un corridor couvert de dômes et qui surplombait une cour. Quant aux minarets, ils se distinguaient par leur beauté et leur hauteur, ces derniers avaient subi l'influence du style architectural de Constantinople comme c'est le cas pour les minarets des mosquées al-Sulaymâniyya et al-Sanâniyya à Damas.

Dans le domaine de l'architecture civile, les Ottomans bâtirent des palais et des quartiers d'habitation, et à ce propos il est notable que les maisons possédaient deux étages, le premier pour l'accueil des hommes (le salamalec) et le second pour les femmes (le haremalek), les étages supérieurs des maisons surplombaient les rues ; par ailleurs, il faut savoir que les Turcs empruntèrent aux Syriens la pièce comportant des murs ornés et au milieu de laquelle se trouve une fontaine. Pour ce qui concerne les palais, autrement appelés sérails, on peut dire que ceux qui se trouvaient à Istanbul étaient divisés en trois parties ou trois ailes et se caractérisaient par l'excellence de leurs ornementations.

Dans le Châm les palais et les grandes maisons étaient aussi divisés en trois parties, il y avait une aile pour la famille, une aile pour les invités et une aile pour les gens de maison, et chacune de ses ailes possédait une grande salle (l'iwan) surplombant une cour découverte au milieu de laquelle se trouvaient des fontaines, des bassins, des plantes ou encore un petit hammam. Les palais possédaient des dômes et deux étages, ils comportaient en outre une grande salle au toit très élevé et dont la hauteur correspondait à deux étages. Durant l'ère ottomane apparurent des éléments architecturaux nouveaux comme l'arc ottoman qui est un arc concave vers l'extérieur dans sa partie haute alors que sa partie basse est convexe ou comme l'arc en demi-cercle. La faïence était utilisée pour faire des sujets décoratifs végétales, cette dernière était l'élément essentiel de la décoration des murs intérieurs et de certaines parties des façades et notamment les parties se situant au-dessus des portes et des fenêtres, les couleurs dominantes de ces motifs en faïence étaient le bleu et le vert ; par ailleurs, les décorateurs turcs utilisaient des mosaïques en marbre ainsi que du plâtre mêlé à des morceaux de verre.

Il est à noter que se diffua également l'utilisation d'une forme de patchwork (ornementations aux formes géométriques et végétales creusées dans la pierre et remplies de plâtre coloré) pour la décoration des façades, de même que se répandit l'emploi du bois verni et orné de dessins géométriques et à motifs végétaux colorés. C'est là une influence des arts baroque et rococo venus d'Occident, influence qui était évidente dans les palais et maisons du Châm à la fin de la période ottomane. Une foule d'architectes participèrent au développement de l'architecture islamique, ils marquèrent l'histoire de cette dernière de leurs noms comme par exemple Mu'ammâr Sannân dont les travaux et œuvres se répandirent dans plupart des capitales du monde musulman **[I.7]**.

- **La mosquée Suleymaniyé à Istanbul (1550)**

La mosquée de Soliman ou " Suleymaniyé " est l'œuvre de l'architecte Sinan. Sa construction engagée en 1550 a pris pas moins de 7 années. Le sultan ottoman Süleyman (1520- 566) qui règne alors sur un immense empire et qui en est le commanditaire, également connu comme "Soliman le Magnifique", voulut que cette mosquée illustre sa puissance et dépasse en beauté toutes les mosquées précédentes**.** Construite sur une Colline de la partie occidentale d'Istanbul, dans la corne d'Or, elle domine la ville d'Istanbul de sa stature imposante. Entourée de quatre minarets d'angle d'environ 70 mètres, la mosquée est dotée d'une grande cour et jouxte un vaste complexe abritant à l'époque de nombreuses activités intellectuelles et sociales islamique. Institution d'enseignement des sciences religieuses, université de médicine, hôpital, cantine populaire, etc.

Fig. I.19 : La mosquée de Soliman à Istanbul [I.7]

La mosquée, respectant le plan carré caractéristique de l'architecture ottomane, C'est le plus imposant monument ottoman par ses dimensions. Le plan de la mosquée et les techniques constructives utilisées font référence à l'église byzantine Sainte-Sophie. Sa coupole d'une hauteur de 53 mètres repose sur un tambour percé de 32 fenêtres, d'un diamètre de 27m 50. La décoration de la voûte de la coupole centrale est remarquablement fine et ajoute au vertige de la hauteur.

Des galeries à arcades occupent l'espace situé entre les colonnes en fond de salle et les contreforts. Les faïences utilisées avec beaucoup de sobriété, sont les premiers spécimens du nouveau style né à Iznik

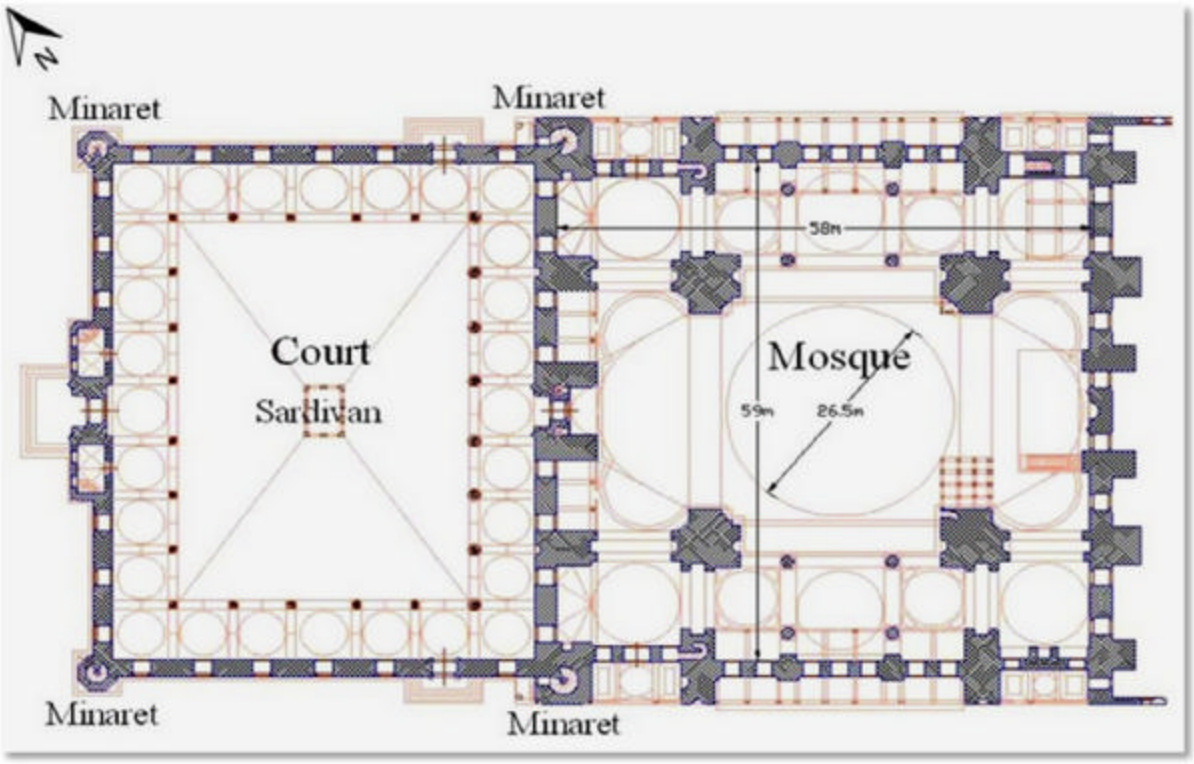
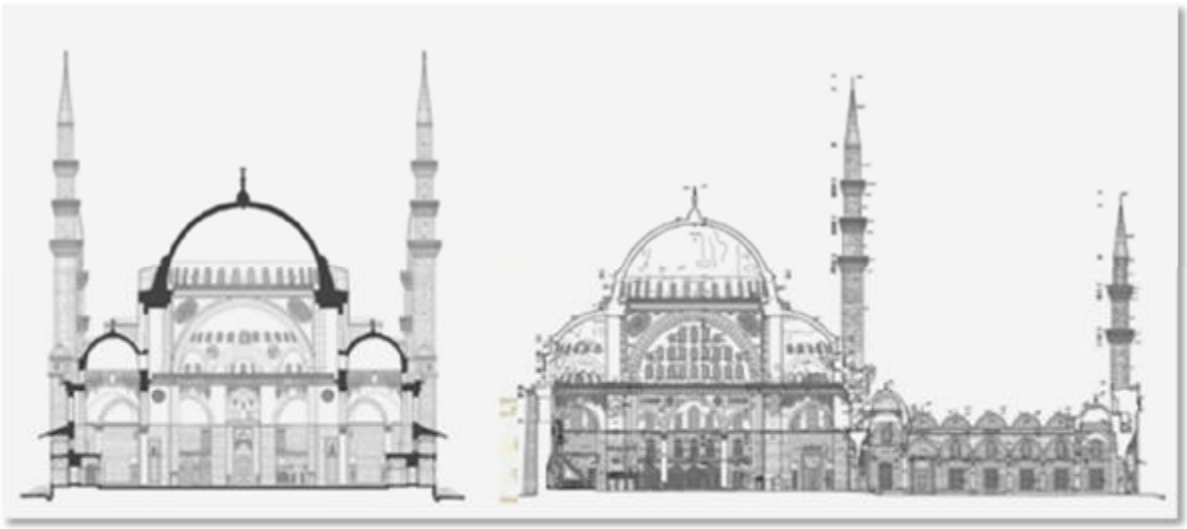


Fig. I.20 : Plan d'étage de la mosquée Suleymaniyé [I.8].

.



a) Coupe transversale b) Coupe longitudinale

Fig. I.21 : Coupe transversale et longitudinale de la mosquée [I.1].

Fig. I.22 : Coupole de la Mosquée de Suleymaniyé [I.9].

Fig. I.23: Galeries à arcades [I.7].

Fig. I.24 : Décoration en céramique (pendentif et mihrab) [I.7].

Conclusion

La mosquée est le noyau central autour duquel s'organise, pratiquement, toute agglomération musulmane. Elle n'est pas un simple bâtiment à dessiner juste l'agencement de ses espaces, mais il s'agit d'une ouvre architecturale particulière riche en détails constructifs et décoratifs.
Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments les plus communs de l'architecture de la mosquée, ainsi une courte chronologie de l'art architectural dans le monde musulman à travers les siècles
Il ressort de cette courte chronologie que l'école islamique est une école artistique complète qui a su élaborer des symbioses entre des traditions architecturales diverses pour produire un style orignal, il est manifeste que cette école a contribué et continue de contribuer à l'édification de la civilisation universelle

Référence

[I.1] https://www.islamweb.net/fr/article/200662/Les-principales-Caract%C3%A9ristiques -de - l%E2%80%99art-architectural-islamique-%C3%A0-travers-les-si%C3%A8cles
[I.2] https://elearn.univ- tlemcen.dz/pluginfile.php/108050/mod_resource/content/2/hca1.pdf
[I.3] Raymond Balestra Conseiller Pédagogique Départemental en Arts Visuels Raymond.Balestra@ac-nice.fr
[I.4] https://www.alamy.com/the-beautiful-carved-stone-portal-with-islamic-pattern-of-minaret-of-al-salih-najm-al-din-ayyub-complex-in-islamic-cairo-egypt.
[I.5] https://www.alamyimages.fr/photo-image-madrasa-et-le-mausolee-d-al-malik-al-salih- Najm-al-din-ayyub-al-mu-izz-chemin-ledin-allah-rue-ville-du-caire-egypte-59950113 .html
[I.6] https://www.alamyimages.fr/le-caire-egypte-le-21-decembre-2017-le-mihrab-et-minbar-en-pierre-sculptee-dans-la-salle-de-priere-d-ete-du-sultan-hassan-mosque-madrasa-
[I.7] https://www.islamweb.net/fr/article/200662/Les-principales-caract%C3%A9ristiques-de-l%E2%80%99art-architectural-islamique-%C3%A0-travers-les-si%C3%A8cles
[I.8] https://www.researchgate.net/figure/Floor-plan-of-the-Sueleymaniye-mosque- redrawn -by-the-author-based-on-images-from-Arapi_fig1_316104737
[I.9] https://www.alamyimages.fr/photo-image-coupole-de-la-mosquee-de-suleymaniye-istanbul-turquie-56237702.html

Introduction

Les constructions en maçonnerie existent depuis des milliers d'années et sont utilisées pratiquement dans tous les pays du monde. Elles sont très répandues, car ce type de construction est relativement facile à réaliser et peu coûteux. Il existe plusieurs types de maçonnerie, dépendamment de la technique de construction et des matériaux utilisés.

Les éléments d'une construction sont classés en deux catégories :

- Les éléments dits "corps" : constituent l'objet essentiel de la construction. Ces éléments sont de trois types : les matériaux minéraux, les matériaux organiques (le pisé) et les matériaux végétaux (la paille et la tourbe). Dans ce chapitre Nous allons exposer uniquement les matériaux minéraux
- Les éléments dits "joints" : sont le joint sans mortier (ou joint sec) et le joint avec mortier (ou joint de mortier), ces éléments permettent la liaison entre les éléments "corps"

Dans ce chapitre, on définit les différents éléments constituants une maçonnerie, en détaillant la nature des éléments corps et des éléments joints, on expose ensuite, d'un point de vue mécanique l'importance du choix des matériaux dans une maçonnerie. Enfin, on montre le comportement des maçonneries face à diverses sollicitations extérieures

II.1 Description des maçonneries : des constituants aux structures

II.1.1 Les éléments corps

- **Matériaux minéraux**

Parmi l'ensemble des matériaux minéraux existants, on expose ici les différentes catégories de briques et de pierres

1. **La brique :**

La brique à maçonner en terre cuite possède de remarquables propriétés de durabilité, de résistance, de stabilité, de régulation de l'humidité et d'inertie thermique ; elle contribue donc très activement à un habitat sécurisé et sain, éléments essentiels au développement d'une atmosphère agréable. Grâce à ses performances thermiques et phoniques, la brique à maçonner en terre cuite est adoptée par de nombreux systèmes de construction, tels que le traditionnel «double mur» ou utilisée en combinaison avec des matériaux isolants intérieurs ou périphériques modernes. Il existe 3 types de briques :

- **Briques pleines :** La brique pleine ordinaire (voir la figure II.1), de format 5x11x20 cm (hauteur, largeur, longueur) . Cet élément constitue d'excellents murs porteurs. Spécialement fabriquée pour l'exécution d'éléments vus (façades), elle présente une gamme de teintes très variée. Elles sont montées à mortier de joints épais, généralement 1,5 cm pour les joints horizontaux (assises) et 1 cm pour les joints verticaux.

- **Briques perforées** : Cette brique comporte des alvéoles perpendiculaires au plan de pose (voir la figure II.2),. Elle permet de réaliser des murs porteurs ou des cloisons, elle représente une bonne isolation thermique. Elle a été utilisée avec succès pour la réalisation de plusieurs tours, son grand avantage c'est qu'elle offre une excellente résistance à la compression et au cisaillement.

- **Briques creuses** : Légère et économe en matériau en comparaison à une brique pleine, une brique creuse est conçue pour une variété d'applications dont l'isolation, la ventilation, la construction de façades. Certaines briques creuses peuvent être remplies et disposer des barres de renforcement pour améliorer la force de tension et de torsion d'une structure. Une brique creuse est classée en fonction de son usage (structure porteuse, isolation, etc.) ou du matériau utilisé.

Fig.II.1 : Brique en terre cuite pleine [II.1]

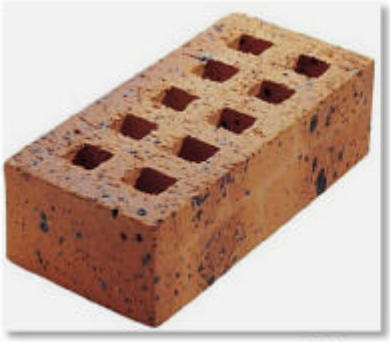


Fig. II.2 : Brique perforée [II.2]

Fig. II.3 : Brique creuse [II.3]

2. La pierre :

La pierre est un matériau de construction qui varie selon le type, la région et l'époque de la construction. Malgré cette grande diversité, la pierre reste un des matériaux de construction les plus répandus. Cette utilisation est due au fait que c'est un matériau peu coûteux,

facilement accessible, durable et qui demande peu d'expertise. En général, la pierre a un comportement fragile qui offre une bonne résistance en compression mais une faible résistance en traction. Les cinq principales sortes de pierre que l'on peut retrouver sont :

- **Les granits**

Les granits sont des roches magmatiques qui naissent sous haute pression dans les couches terrestres inférieures, c'est pourquoi ce sont les pierres les plus dures et les plus résistantes à l'usure (ils ont une résistance de 53 à 414 MPa).

- **Les calcaires**

Les calcaires sont des roches sédimentaires carbonatées, principalement composées (plus de 50%) de carbonate de calcium CaCO3. Ils font effervescence à l'acide. La formation des calcaires résulte en très grande partie de l'activité des êtres vivants :

- accumulation de coquilles, de tests (enveloppe microscopique d'oursin),de squelettes…, ou de leurs débris, macroscopiques ou microscopiques,
- constructions récifales, anciennes barrières de corail,
- précipitations chimiques, oolites, travertins

- **Les grès**

Les grès sont des pierres composées de grains de sable fin, généralement quartzeux, agglutinés ensemble naturellement par un ciment dont la nature est variable (calcaire, siliceuse ou argileuse). Certaines sortes de grès peuvent être employées dans les édifices ; beaucoup d'autres sont rejetées à cause de leur propriété d'absorber et de garder indéfiniment leur humidité.

- **La meulière**

La meulière est une roche sédimentaire siliceuse (ou roche siliceuse) utilisée jusqu'aux environs des années 1880 pour fabriquer des meules à grains, elle comporte des petites cavites qui lui confèrent de bonnes propriétés thermiques

- **La marne**

La marne est une roche sédimentaire, mélange de calcite (CaCO3) et d'argile dans des proportions à peu près équivalentes.

- **L'Ardoise**

L'ardoise est une roche métamorphique issue d'une argile ayant subi un métamorphisme général faible. ... L'ardoise est résistante et sa couleur peut varier du blanc au noir, en passant par toutes sortes de gris, de rouges sombres et de verts

Fig. II.4 : Roche de granite [II.4]

Fig. II.5 : Roche calcaire [II.5]

Fig. II.6 : Roche en Grès [II.6]

Fig. II.7 : Roche meulière [II.7]

Fig. II.8 : Roche de marne [II.8]

Fig. II.9 : Ardoise noire [II.9]

Le tableau II.1 donne à titre indicatif quelques propriétés mécaniques des matériaux constituants des éléments des maçonneries usuelles. Pour les matériaux ceux comme les briques creuses, la valeur de résistance en compression est donnée dans le sens vertical alors que la valeur de résistance en traction est donnée dans le sens transversal

	Masse volumique (Kg/m3)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Résistance Traction (MPa)	Résistance compression (MPa)
Grés des Vosges	2000	30	0.3	-	150
Granit	2600	40-70	0.2-0.3	-	70-280
Calcaire	2000-2600	20-70	0.2-0.3	25-30	20-200
Marbre	2600-2900	50-100	0.2-0.3	10-20	50-180
Béton	2300	30	0.2	3	30
Brique creuse	3000	5	0.3	8	20

Brique pleine ancienne	3000	8.7	0.16	3.45	40
Brique pleine moderne	3000	14.7	0.22	3.14	64

Tableau II.1 Propriétés mécaniques des éléments corps

En maçonnerie, la pierre est définie par différents termes de vocabulaire. Les principaux termes sont :

- La pierre angulaire qui comme son non l'indique, est placé à l'angle d'un édifice et participe à son soutènement (solidité)
- La pierre de liaison, équivalent au terme "boutisse parpaigne ", est la pierre la plus grande de l'édifice. Elle est placée en boutisse c'est-à-dire que sa longueur se trouve dans l'épaisseur du mur et ses deux bouts en parement (voir la figure II.10)

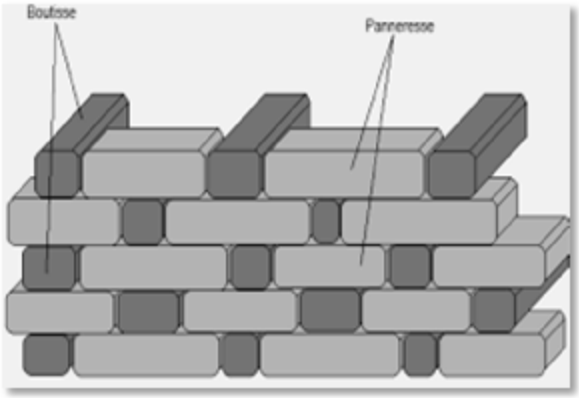


Fig. II.10 : Illustration d'une boutisse parpaigne

- La pierre crue (ou écrue), est laissée à son état naturel (état brut)
- La pierre de calage, comme son nom l'indique, sert de cale pour assurer la stabilité.
- La pierre de tout venant est une pierre brute, non triée, non calibrée et employée dans un mur au fur et à mesure quelle vient
- La pierre nue est une pierre de parement non enduite
- La pierre sèche est une pierre maçonnée à sec, sans mortier
- La pierre de taille désigne le bloc de pierre dont toutes les faces sont dressées, c'est-à-dire taillées pour obtenir des plans plus ou moins parfaits. Les joints du parement sont alors rectilignes et l'appareil (c'est-à-dire l'arrangement de la maçonnerie) est polygonal

II.1.2 Les éléments joints

Les éléments de joints sont généralement constitués de mortier mais il arrive aussi qu'on se dispense de l'utilisation du mortier (on parle alors de joints vifs ou secs). Les mortiers sont des mélanges, durcis ou non, de sable, de liant(s) et d'eau, avec ou sans adjuvants et additifs. Ils peuvent être très différents les uns des autres suivant la nature et le pourcentage des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure. En fonction de leur masse volumique**,** à l'état sec les mortiers sont divisés en :

- Mortiers lourds à masse volumique de 1500 Kg /m3 et plus ; pour la préparation de ces mortiers on utilise des sables lourds quartzeux et autres ;
- Mortiers légers à masse volumique inférieure à 1500 Kg/m3 dont les agrégats sont des sables poreux et légers de pierre ponce, de tuf, laitiers, céramistes et autres fins agrégats légers.

D'après la nature du liant, on distingue :

- Mortiers de ciments, préparés au portland ou ses variétés.
- Mortiers de chaux, où une chaux aérienne ou hydraulique est employée en qualité de liant
- Mortiers de plâtre préparé à base de liants gypseux, à savoir les plâtres et les liants d'anhydrite
- Mortiers mixtes obtenus en utilisant les liants de ciment à la chaux et ciment à l'argile

Le choix du type de liant est fait suivant la destination du mortier, les exigences requises, les conditions de températures et d'humidité pendant le durcissement et les conditions d'exploitation du bâtiment

a) mortier de ciment b) mortier de chaux

c) mortier de plâtre d) mortier mixte

Fig. II.11 : différentes types de mortiers [II.10]

Le tableau II.2 donne quelques caractéristiques de mortier suivant le dosage de ses constituants. On peut remarquer que les résistances en compression des mortiers sont très sensibles au dosage.

Type	Ciment portland	Ciment de maçonnerie	Chaux vive ou chaux grasse	Résistance en compression MPa
M	1	1	-	17
M	1	-	¼	15
S	½	1	-	13
S	1	-	½	12
N	1	-	1	5
N	-	1	-	4
O	1	-	1	2.5
K	1	-	1	1.5
K	-	-	1	0.5

Tableau II.2 : Propriétés mécaniques des joints suivant le dosage

II.2 Structuration des murs

La construction de mur est distinguée par la position de la pierre, la régularité des joints, et l'existence d'un liant, et la composition de l'épaisseur du mur. On peut distinguer essentiellement trois types de murs en maçonnerie :

II.2.1 Les murs d'appareil

La nature, le type de pierre et sa taille déterminent les différentes possibilités de les agencer [II.11].

A. **Appareil irrégulier**: Ce type d'agencement regroupe des pierres de grosseur variable, de formes irrégulières, disposées librement sans alignement ni régularité (Figure II.12 -A) Cette maçonnerie, moins coûteuse, sera habituellement crépie ou protégée par exemple d'un déclin de bois.

B. **Appareil assise:** Ici, les pierres de grosseur variable sont disposées en assises, c'est-à-dire qu'elles sont ébauchées ou équarries et placées d'aplomb librement, sans arrangement ni ordre particulier, (Figure II.12 -B)

C. **Appareil réglé**: Ce modèle identifie les pierres alignées et disposées par assises de hauteur variable où les pierres d'une même assise ont plus ou moins la même hauteur. (Figure II.12 -C)

D. **Appareil à alternance d'assises régulières:** La hauteur des assises de ce modèle varie en alternance; cette alternance le distingue de l'appareil réglé, (Figure II.12 -D)

E. **Appareil à assises régulières**: Les pierres taillées de longueur variable sont ici disposées par assises ayant plus ou moins la même hauteur, (Figure II.12 -E)

F. **Appareil régulier:** Les pierres de cet appareil ont la même longueur et les assises sont régulières, (Figure II.12 -F)

Quel que soit l'appareillage, on dispose les pierres à plat ou de champ, suivant leur lit ou en délit. On dit ainsi qu'une pierre «posée sur son lit est assise sur un de ses lits de carrière alors qu'une pierre en délit est assise de manière à ce que ses lits de carrière soient verticaux. Une pierre posée en carreau présentera en apparence sa plus grande dimension, alors qu'une pierre en boutisse présentera un de ses bouts en parement. Aux différents appareillages, formes et tailles des pierres, correspondent différents types de joints qui accentueront plus ou moins l'arrangement des pierres entre elles, (Figure. II.13)

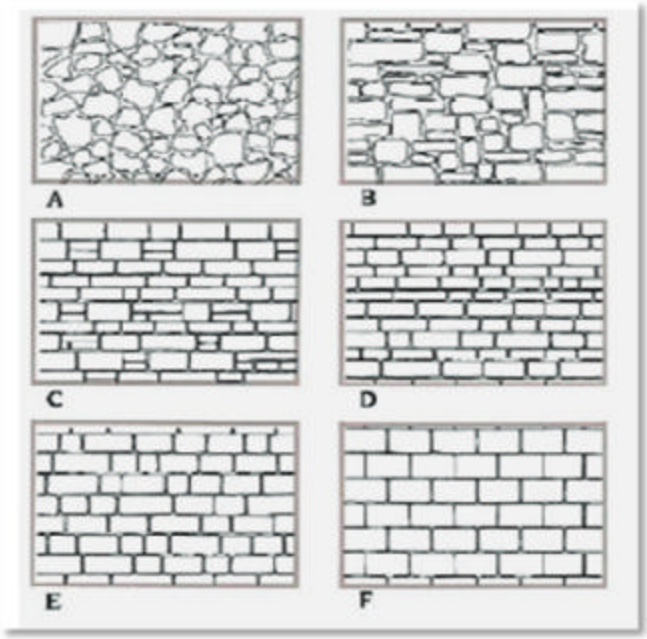


Fig. II.12 : Les principaux appareils de la maçonnerie en pierre [II.11]

II.2.2 Les murs constitués de deux parements en pierres de taille (ou en moellons) englobant un 'blocage', c'est-à-dire une masse de matériaux divers agglomérés par des mortiers en chaux ou à base de terre argileuse.

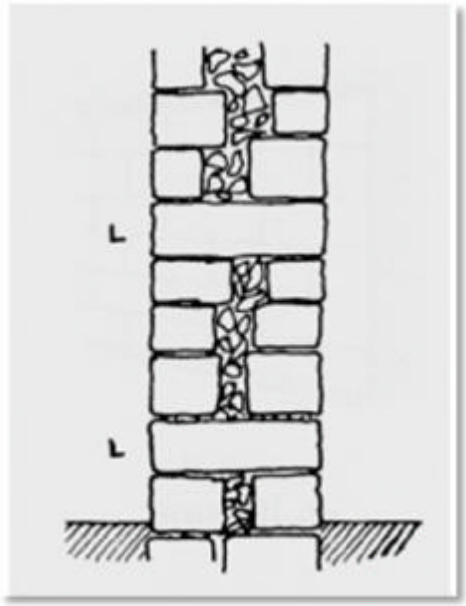


Fig. II.13 : Murs constitués de deux parements en pierres de taille [II.12]

II.2.3 Les murs ‘organiques’ (ou mixtes)

Il s’agit de murs qui ont une constitution double. L’usage de la pierre est restreint à certaines assises et à des éléments verticaux qui peuvent être assimilés à des colonnes. Le reste est constitué de maçonnerie banchée où le liant prédomine et assure la cohésion de matériaux divers, généralement de petites tailles (galets, cailloux). Nous n’étudierons pas ce type de mur dans ce mémoire.

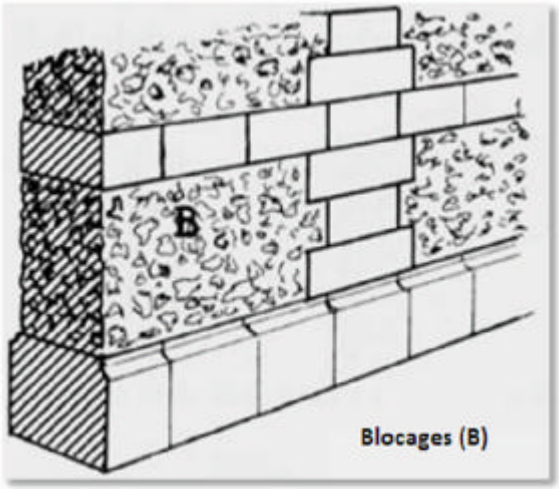


Fig. II.14 : Murs avec chaînages verticaux et horizontaux [II.12]

II.3 Propriétés des maçonneries

II.3.1 Comportement en compression

- **Compression uniaxiale (perpendiculaire aux lits)**

La maçonnerie montre une très bonne résistance face aux sollicitations de compression axiale. De ce fait, les structures ont été construites de telle sorte que la maçonnerie soit principalement sollicitée en compression (murs porteurs massifs, arcs, voûtes, ...).

La résistance caractéristique de la maçonnerie est déterminée en utilisant la résistance moyenne des éléments de maçonnerie ainsi que celle de mortier. Les différences de déformations entre les blocs et le mortier (le premier étant plus rigide que le second), entraîne une compression triaxiale des joints de mortier, tandis que les blocs sont en traction biaxiale (Figure 1.2). Ceci expliquerait deux caractéristiques de la rupture de la maçonnerie en compression uniaxiale :

- la rupture s’initie par fissuration verticale ou par écrasement des blocs,
- les contraintes de compression à la rupture excèdent la résistance en compression uniaxiale du mortier

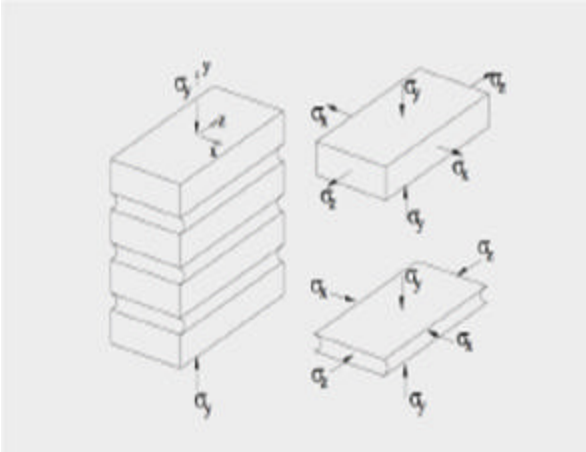


Fig. II.15 : État de contrainte dans la maçonnerie, sous compression uniaxiale [II.13]

La résistance caractéristique en compression de la maçonnerie vaut [II.14]

$$f'_m = K(f_b)^{\alpha}(f_{mor})^{\beta} \qquad \text{Eq II.1}$$

f_{mor} : Résistance à la compression de mortier

f_b : Résistance à la compression d'un élément de maçonnerie

$$f_b = f_{moy}\delta\delta_c \qquad \text{Eq II.2}$$

f_{moy} : Résistance moyenne à la compression d'un élément de maçonnerie (voir le Tableau II.3)

δ : Facteur de forme (voir le Tableau II.4)

$\delta_c = 1$ (Échantillon sec à l'air)

$\delta_c = 0.8$ (Séchage au four)

Les coefficients K,α, et β sont données par le Tableau II.5

Catégorie conforme	Résistance moyenne à la compression f_{moy} (N/mm2)
M20	20
M12	12
M8	8
M5	5
M2,5	2.5

Tableau II.3 : Résistance moyenne à la compression de mortier

Hauteur (mm)	Plus petite dimension horizontale (mm)				
	50	100	150	200	≥250
40	0.8	0.7	-	-	-
50	0.85	0.75	0.7	-	-
65	0.95	0.85	0.75	0.7	0.65
100	1.15	1	0.9	0.8	0.75
150	1.3	1.2	1.1	1	0.95
200	1.45	1.35	1.25	1.15	1.1
≥250	1.55	1.45	1.35	1.25	1.15

Tableau II.4 : Facteur de forme δ

Elément de maçonnerie		Mortier d'usage courant			Mortier colle(joint d'assise≥0,5mm et≤3mm		
		K	α	β	K	α	β
Terre cuite	Groupe1	0.50	0.65	0.25	-	-	-
	Groupe2	$0.50*(\delta)^{-0.65}$	0.65	0.25	$0.50*(\delta)^{-0.80}$	0.80	0
	Groupe3	$0.40*(\delta)^{-0.66}$	0.65	0.25	$0.40*(\delta)^{-0.80}$	0.80	0
Silico calcaire	Groupe1	0.60	0.65	0.25	0.80	0.85	0
	Groupe2	0.50	0.65	0.25	0.55	0.85	0
Béton De granulats	Groupe1	0.60	0.65	0.25	0.80	0.85	0
	Groupe2	0.50	0.65	0.25	0.65	0.85	0
	Groupe3	0.45	0.65	0.25	0.50	0.85	0
Béton Cellulaire autoclavé	Groupe1	0.60	0.65	0.25	0.80	0.85	0

Tableau II.5 : Différentes valeurs des paramètres K,α, et β

Kaushik et. al. [II.15] ont testé des éprouvettes en compression avec des briques d'argile pleines et différents types de mortier. Ils montrent que les courbes contrainte-déplacement de la maçonnerie se trouvent souvent en-dessous des courbes trouvées pour les briques et le mortier qui la composent (Figure 1.4b). Autrement dit, l'assemblage est moins résistant que chaque élément pris individuellement. Ceci va à l'encontre de ce qui est généralement supposé, à savoir que la résistance de la maçonnerie se trouve bornée par les résistances du composant le plus faible (le mortier) et du composant le plus fort (la brique).

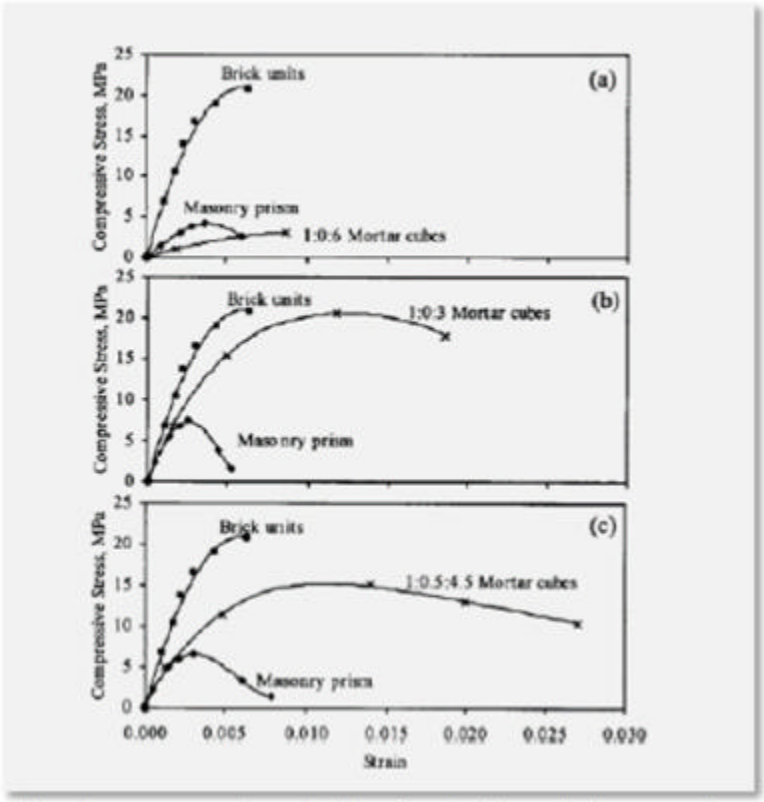


Fig. II.16 : Résultats d'essais en compression uniaxiale -Courbes force-déplacement obtenues par Kaushik *et. al.* Mortier (Ciment: Chaux: Sable) , a) faible, b) fort et c) intermédiaire [II.15]

- **Compression uniaxiale (parallèle aux lits)**

La maçonnerie résiste moins bien à la compression parallèle aux lits, car les joints sont continus dans ce sens. Ce comportement a reçu peu d'attention de la part des chercheurs. Pourtant, du fait de l'anisotropie du matériau, ce type de compression peut avoir une influence sur la capacité portante de la maçonnerie. La rupture par compression parallèle aux lits s'initie d'abord dans les joints horizontaux, qui se fissurent sur la longueur du panneau, et ont tendance à s'ouvrir. Le panneau peut ensuite supporter des charges plus élevées, mais l'auteur considère que la rupture est atteinte à partir de la fissuration des joints horizontaux.

- **Influence de l'orientation des joints**

La rupture en compression uniaxiale a généralement lieu dans un plan normal au panneau testé. Selon l'orientation du joint horizontal par rapport aux contraintes appliquées, la rupture se fait par fissuration et par glissement dans les joints horizontaux et/ou verticaux ; ou par un mécanisme combinant à la fois la rupture de la brique et du mortier [II.16] (Figure II.17).

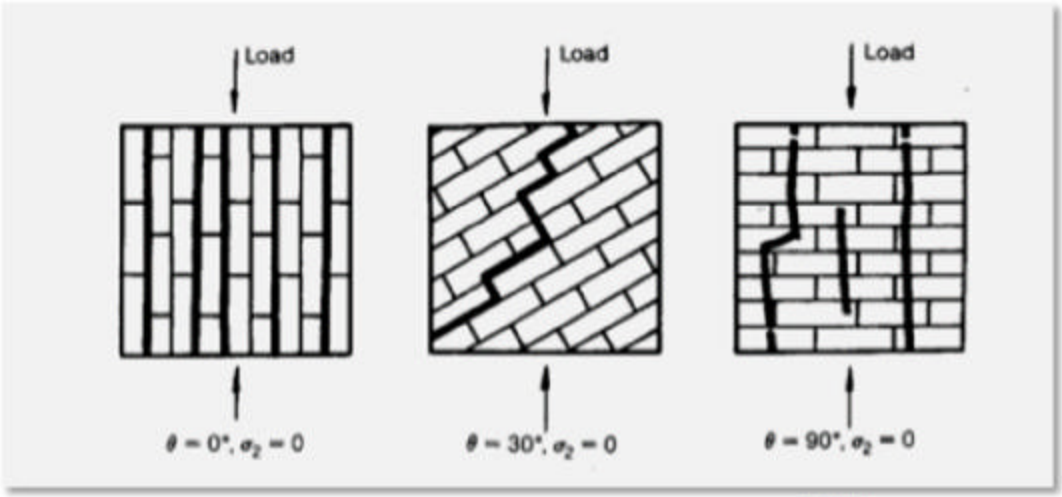


Fig. II.17 : Modes de rupture en compression uniaxiale [II.16]

II.3.2 Comportement en traction

La maçonnerie constitue avec des mortiers traditionnels une résistance très limitée face aux efforts de traction pure. Elle est souvent décrite comme un matériau qui ne résiste pas à la traction (c'est-à-dire La résistance en traction est donc souvent considérée comme nulle, et n'est souvent pas prise en compte). Pourtant, cette résistance peut être un paramètre important à un niveau local. Par exemple dans le comportement d'éléments tels que les murs de contreventement, dans lesquels les charges horizontales peuvent générer des contraintes de traction dans la direction diagonale du mur [II.17].

- **Traction uniaxiale (perpendiculaire aux lits de briques)**

La rupture en traction uniaxiale perpendiculaire aux lits de briques dépend de la résistance en traction de l'interface entre le bloc et le joint mortier. Dans ses essais, Samarasinghe observe que le plan de rupture passe presque toujours au travers des joints horizontaux [II.17].

En première approximation, on peut considérer que la résistance en traction perpendiculaire aux lits de briques est égale à la résistance en traction de l'interface bloc/mortier. Cependant, dans certains cas où l'assemblage est constitué d'éléments de faible résistance et d'un mortier avec une grande résistance en traction, la rupture peut se produire et correspondre à une contrainte dépassant la limite en traction des blocs.

- **Traction uniaxiale (parallèle aux lits de briques)**

Backes [II.18] a étudié la résistance en traction de la maçonnerie parallèle au lit de pose. Les courbes force-déplacement tracées pour chaque test (Figure II.18 b), mettent en avant deux types de rupture.

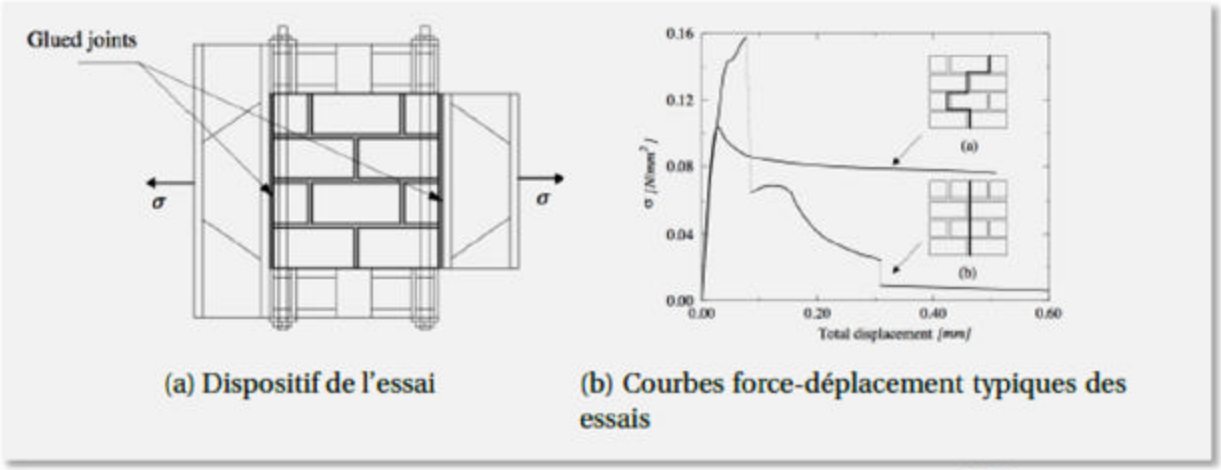


Fig. II.18 : Essai de traction parallèle au lit de pose proposé par Backes [II.18]

Lorsque la résistance en traction des briques est plus forte que la résistance en traction des joints et de l'interface, la rupture se fait par une fissure en escalier le long des joints horizontaux et verticaux. La courbe force-déplacement correspondante montre alors un plateau en partie post-pic. Dans le deuxième mode de rupture observé, lorsque les briques ont une faible résistance en traction, la rupture se fait par une fissure quasiment verticale, passant à travers les blocs et les joints verticaux. Dans ce cas, la courbe force-déplacement montre un amorçage de rupture fragile suivi d'un adoucissement jusqu'à une contrainte nulle.

- **Influence de l'orientation du joint sur la résistance en traction uniaxiale**

L'influence de l'orientation des joints par rapport à l'application de la contrainte est forte. L'influence de l'orientation des joints par rapport à l'application de la contrainte est forte. Samarasinghe teste des panneaux de maçonnerie en traction uniaxiale [II.17]. Il apparaît que l'initiation de la rupture évolue en fonction de l'angle µ entre le lit de pose et l'effort appliqué. Lorsqueθ > 45°, la rupture s'initie le long des joints horizontaux, tandis qu'elle s'active d'abord dans les joints verticaux quand θ < 45° (Figure II.19).

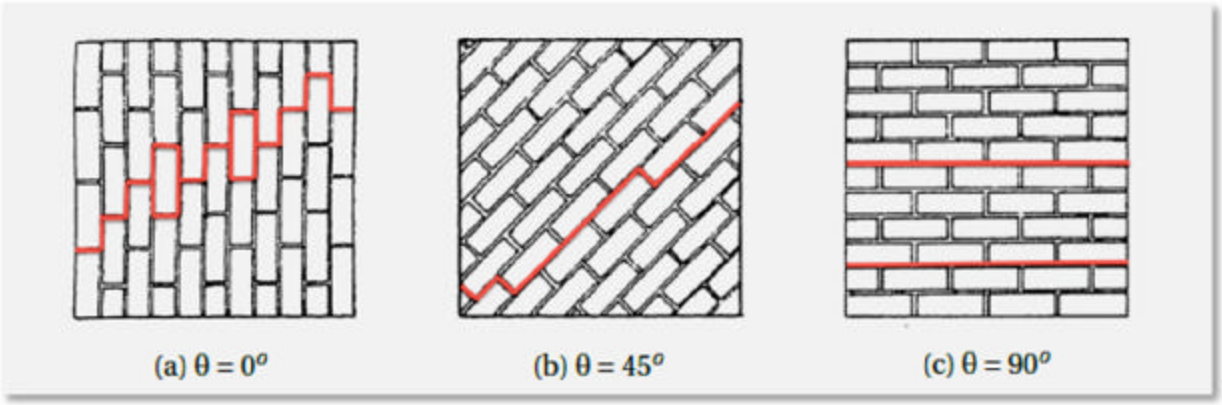


Fig. II.19 : Modes de rupture en traction uniaxiale, selon l'angle d'orientation des joints μ, d'après Samarasinghe [II.17].

II.3.3 Comportement de la maçonnerie en flexion

Un chargement hors plan peut être induit par le vent, les séismes, ou d'autres catastrophes naturelles (inondations, avalanches) ou accidentelles (impacts, explosions).Les comportements qui en résultent sont principalement dominés par de la flexion uniaxiale ou de la flexion biaxiale. La flexion uniaxiale peut se faire selon deux plans de rupture privilégiés. On distingue :

- la rupture parallèle au lit de pose (flexion verticale, ie. par rapport à un axe horizontal), dont la fissuration se fait généralement le long d'un joint horizontal (Figure II.20 - V1, V2). La résistance dépend alors de la résistance en traction par flexion du joint horizontal
- La rupture perpendiculaire au lit de pose (flexion horizontale, ie. par rapport à un axe vertical), pour laquelle la ligne de fissure peut passer par les joints horizontaux et verticaux (fissure en zig zag), ou par les joints verticaux et au travers des blocs (ligne de fissure droite). Dans le premier cas, la résistance dépend de la résistance en traction par flexion des joints verticaux, et à la résistance en torsion et au frottement des joints horizontaux (Figure II.21 a). Dans le deuxième cas, la capacité à rupture dépend de la résistance en traction par flexion des joints verticaux et de la résistance des blocs (Figure II.21 b)

La résistance en flexion uniaxiale repose donc sur des mécanismes locaux correspondant à la résistance en traction et à la torsion des joints, ou la résistance des blocs.

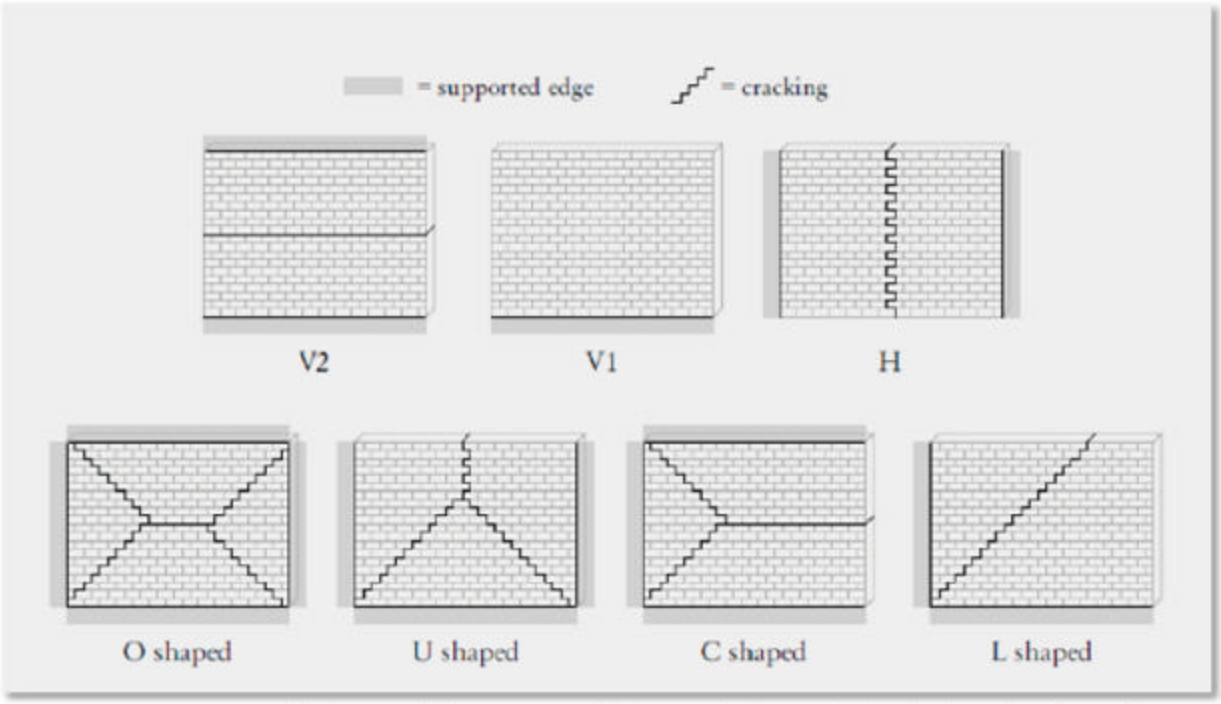


Fig. II.20 : Ruptures en flexion possibles ; V2, V1 : flexion verticale ; H : flexion horizontale ; O, U, C, L : flexion biaxiale[II.19]

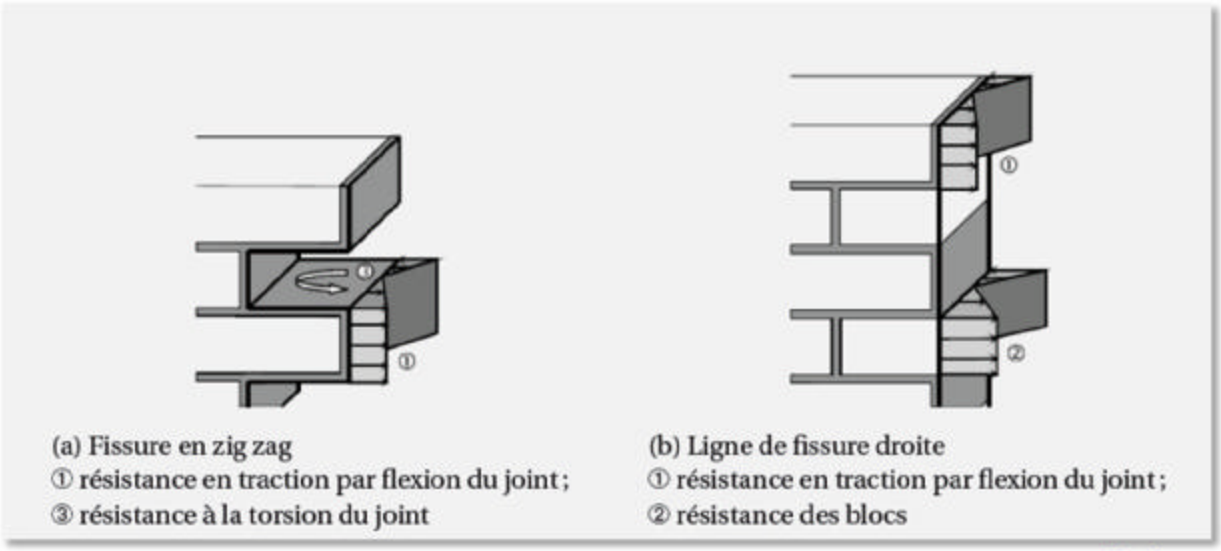


Fig. II.21 : Mécanismes de rupture locaux à l'origine de la rupture en flexion horizontale [II.19]

Dans une structure, les murs sont appuyés sur leurs extrémités. Si un mur est appuyé sur deux bords adjacents ou plus, ce qui est le cas la plupart du temps, il est alors exposé à la flexion biaxiale (Figure II.20 - O,U,C,L). On constate alors des fissures diagonales qui s'ajoutent aux fissures observées en flexion uniaxiale. Dans les murs supportés sur quatre côtés, dans le cas général où la flexion horizontale est plus grande que la flexion verticale, une fissure se propage le long d'un joint horizontal sous un chargement contant, et un état stable se met en

place. Avec l'augmentation de la charge, des fissures diagonales se forment et se propagent en activant le mécanisme qui mènera à la rupture.

II.3.4 Comportement de la maçonnerie en cisaillement

Le cisaillement est un comportement complexe influencé par de nombreux facteurs, et résulte rarement en une rupture par cisaillement pur. Même si la résistance aux chargements latéraux est importante, la capacité de déformation et la capacité de dissipation d'énergie provenant de l'aptitude des blocs à glisser les uns par rapport aux autres, sont aussi souvent prises en compte, surtout dans le cas de l'évaluation au séisme. Si le chargement vertical est suffisant, la rupture du mur peut se faire par traction diagonale (Figure II.22 a). Une fissure se propage dans la diagonale du mur. Selon la qualité du mortier et des briques et de la charge verticale, la fissure peut se développer le long des joints horizontaux et verticaux (fissure en escalier), ou au travers des blocs. Ce type de rupture apparaît lorsque la contrainte principale de traction excède la résistance en traction de la maçonnerie. La réponse se caractérise par une dégradation rapide de la résistance et de la raideur si les fissures traversent les blocs. Si la fissuration se fait le long des joints (cas blocs forts/mortier faible), les blocs peuvent glisser les uns par rapport aux autres et conférer une grande capacité de dissipation d'énergie à la structure.

Lorsque le mortier est de faible qualité et que l'effort vertical est faible, le chargement horizontal peut causer une rupture par glissement le long d'un joint horizontal (Figure II.22 b). La rupture par glissement intervient lorsque les contraintes en cisaillement excèdent la résistance en cisaillement du joint. Elle se produit généralement dans les murs non renforcés des étages supérieurs qui sont moins chargés. La réponse du mur permet une forte dissipation d'énergie, et une grande capacité en déplacement. Une rupture par basculement (- appelée "rocking" en anglais) est susceptible de se produire si le chargement vertical est faible et le ratio moment/cisaillement devient grand (Figure II.22 c). Ce phénomène est assimilé à un comportement de flexion.

Une fissure due aux contraintes de traction se forme à la base du mur, et il a tendance à se comporter comme un corps rigide tournant autour d'un axe à sa base. Une zone d'écrasement de la maçonnerie ("*toe crushing*") apparaît ensuite en pied du panneau, au niveau du point de rotation. Le mécanisme de *rocking* permet une grande capacité de déformation, mais est moins souvent rencontré.

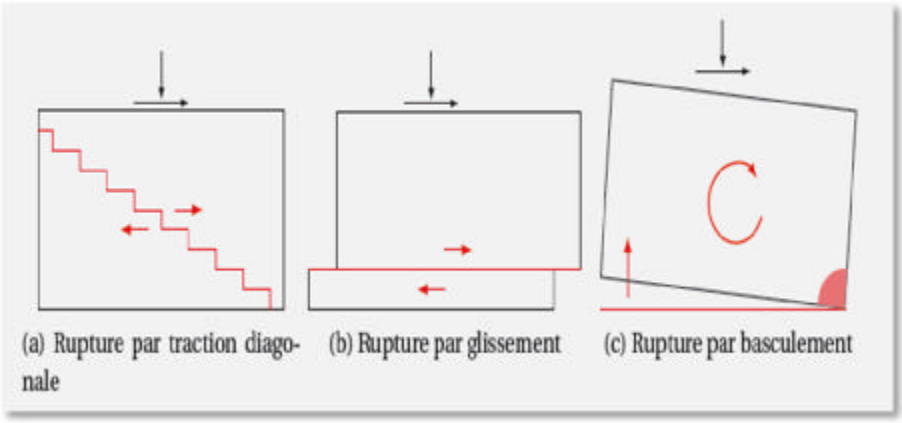


Fig. II.22 : Modes de rupture possibles d'un mur chargé latéralement

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de maçonneries, ainsi quelques principales caractéristiques des différents matériaux qui la constituent. La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne.

Généralement, trois types de murs en maçonnerie existe : les murs d'appareil (La nature, le type de pierre et sa taille déterminent les différentes possibilités de les agencer), les murs constitués de deux parements en pierres de taille englobant un 'blocage', c'est-à-dire une masse de matériaux divers agglomérés par des mortiers en chaux ou à base de terre argileuse - les murs 'organiques' (ou 'mixtes') dont les arêtes, les soubassements, les chaînages, les encadrements de baies sont faits en pierre de taille, tandis que le reste est constitué de petite maçonnerie où le liant domine. La maçonnerie montre un comportement global complexe, largement influencé par l'hétérogénéité et l'anisotropie induites par l'arrangement géométrique de la structure, ainsi qu'à la différence de propriétés entre les éléments qui la composent. La détermination précise de sa résistance et des mécanismes susceptibles de se produire est rendue complexe par le grand nombre de combinaisons blocs/mortier possibles. De plus, l'influence de nombreux paramètres extérieurs (conditions limites, chargements...) conditionnent la rupture

Référence

[II.1] https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/realiser-un-mur-en-brique-pleine/
[II.2] https://www.castorama.fr/brique-perforee-leopard-5-4-x-10-5-x-22- cm/3387731710222_CAFR.prd
[II.3] https://monmacon.pro/construction-de-murs-en-brique/
[II.4] https://www.espaceagro.com/pierre-roche/granite-roche-naturel_i394799.html
[II.5] http://www.benoit-gauthier.com/produit/roche-calcaire
[II.6] https://penezherman.com/roches/1071-pierre-de-rocaille-gres-rose-200400.html
[II.7] https://www.lcipierres.fr/rocailles/183-roche-de-meuliere-.html
[II.8] https://photos.monanneeaucollege.com/mineraux pages/marne-blanche.htm
[II.9] https://www.alamyimages.fr/l-ardoise-uk-roche-metamorphique-image214374328.html
[II.10]
[II.11] Varin, F. (1984). Les patrons de la maçonnerie. Continuité,(23), 29–32
[II.12] Frédéric MAGNEN(2.013), Proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en maçonnerie de pierre, Mémoire d'Ingénieur CNAM, Conservatoire National des Arts et Metiers Paris
[II.13] HILSDORF, H. K. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. Proc. Int. Conf. on Masonry Structural Systems, Texas(1969)
[II.14] EC6. Eurocode EN 1996. European Union norm on construction
[II.15] KAUSHI K, H. B., DU RGESH, C. R.,AN DK., J. S. Stress-strain characteristics of clay birck masonry under uniaxial compression. Journal of Materials in Civil Engineering (Sept. 2007)
[II.16] PAG E, A. The biaxial compressive stength of brick masonry.Proc. Instn Civ. Engrs, Part2(1981)
[II.17] SAMARAS I N GH E, W. In-plane failure of brickwork. PhD thesis, The University of Edinburgh, 1980
[II.18] BACK E S, H. P. On the behaviour of masonry under tension in the direction of the bed joints (in German). PhD Thesis, Aachen University of Technology, 1985
[II.19] PARI, M. Modelling of out of plane bi-axial flexure of Unreinforced masonry walls, PhD Thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2015.

Introduction

Les pathologies dans les structures en maçonneries sont classées en deux types : les pathologies liées aux matériaux et à la structure. L'examen des ouvrages en maçonnerie emprunte deux voies complémentaires : une voie non-destructive et une voie destructive. Dans le cadre d'étude de monuments historiques, le diagnostic devra toujours privilégier les méthodes in situ non destructives préservant au mieux l'édifice. Les deux types d'investigation s'utilisent cependant parallèlement : Les auscultations destructives permettent de calibrer certains essais non-destructifs. Les essais non destructifs conduisent à l'identification des zones à soumettre à des essais destructifs.

Il est impératif de trouver des moyens efficaces pour réhabiliter et/ou renforcer les structures en maçonneries endommagées. Plusieurs types de renforcement ont été développés ces dernières années. Le renforcement traditionnel des structures en maçonnerie ; en utilisant le béton armé, l'acier, le mortier, etc. Enfin, le renforcement avec les matériaux composites. Récemment l'utilisation de FRP pour le renforcement des maçonneries devient populaire en raison de sa légèreté, sa mise en œuvre aisée et sa résistance à la corrosion…etc.

III.1 Problèmes de la maçonnerie :

Il possible de classer deux types de pathologies dans les maçonneries. Ce sont des problèmes liés aux matériaux et à la structure.

- **Problèmes liés aux matériaux :** Les problèmes de matériaux nécessitent une réparation des maçonneries sans endommager l'élément. La réparation se réalise par traitement chimique, une réparation ou un remplacement du mortier ou de la pierre.
- **problèmes liés à la structure :** L'endommagement de la structure est provoqué par les charges de séisme, de vents, de choc, le poids propre de structure, le transport, l'effondrement du sol, etc.

L'ICOMOS " International Scientifique Commette for Analysais And Restauration Of Structures Of Architectural Héritage" recommande une méthodologie composée de quatre niveaux pour l'évaluation de l'état d'une structure (en basant sur la science de l'architecture, de l'histoire de matériaux et aussi de la science de l'ingénierie) [III.1]

- Le premier niveau définit les conditions de site.
- Le deuxième étudie le comportement mécanique des matériaux et des structures.

- Le troisième nécessite d'avoir des analyses qualitatives et quantitatives pour évaluer le risque et l'endommagement.
- Le quatrième niveau concerne l'intervention dans la structure pour le renforcer.

III.1.1 Formes d'altérations liées aux matériaux

Les altérations de la pierre ont de nombreuses origines et causes possibles. Elles dépendent des facteurs dits externes qui traduisent l'environnement immédiat (conditions climatiques, pollution … etc.) mais aussi des facteurs internes propres à chaque type de pierres, qui font que leurs réactions vis-à-vis des contraintes environnementales ne sont pas les mêmes. En effet, la forme et l'intensité de l'altération dépendent de certaines propriétés intrinsèques de la pierre (mécaniques, chimiques et minéralogiques, texture, porosité … etc.).

A. Figures induites par une perte de matière

Ce type d'altération affecte principalement les pierres issues des roches sédimentaires et métamorphiques. Les roches magmatiques sont rarement touchées. Cela peut se traduire par

a. **une alvéolisation** ; formation de cavités (alvéoles) à la surface de la pierre (voir la figure III.1)
b. **une concrétion** ; dissolution et précipitation de la calcite en milieu humide plus ou moins acide)
c. **une érosion** ; disparition de la surface originelle de la pierre causée par tout agent externe (écoulement d'eau, rafale de vent … etc.).

Une perte de matière est souvent associée à d'autres formes d'altération, telles que la désagrégation et/ou la desquamation.

B. Altération chromatique et dépôt

a. Altération chromatique

Une altération chromatique indique la modification d'un ou plusieurs paramètres caractérisant la couleur de la pierre (teinte, clarté, saturation ou pureté de la couleur). Cette pathologie peut affecter tout type de pierre en surface (patine) comme en profondeur. Les principales causes peuvent être chimiques et/ou biologiques.

b. Le dépôt

Le dépôt désigne l'accumulation de matériaux exogènes (pollutions …) en surface de la pierre, la couche formée est généralement peu adhérente au substrat. Il peut s'agir aussi d'efflorescence, dans le cas de présence de poudre blanche (cristaux) en surface de la pierre résultant du transfert puis de l'évaporation superficielle d'eau contenant des sels ou de Su florescence, qui indique l'accumulation des sels, à la différence des efflorescences, sous la surface de la pierre, et qui conduit souvent à une perte de matière par desquamation

La forme la plus connue du dépôt est la formation d'une croûte qui indique la formation d'une enveloppe issue des dépôts de matériaux en surface de la pierre pour retrouver son aspect le plus brut et le plus naturel. De couleur grise à noir, parfois claire, une croûte, à l'inverse des dépôts exogènes, est plus ou moins attachée au substrat, ce qui fait que son arrachement y emporte souvent une partie. Il ne faut pas la confondre avec encroûtement, on emploie ce terme quand la figure d'altération est clairement identifiée comme étant le résultat d'un processus de précipitation à partir d ′ une percolation de solutions à travers la maçonnerie.

C. Colonisation biologique

Il ne s'agit pas seulement des plantes mais aussi de micro-organismes tels que les bactéries, algues, lichen, mousse, moisissure, etc. Les colonisations biologiques se développent aussi bien sur la surface de la pierre, que dans des fissures et/ou cavités. Leur prolifération est favorisée par l'humidité. L'altération de la maçonnerie (joints et/ou pierres) peut être provoquée par les acides sécrétés par certains végétaux mais aussi par la pénétration et la croissance des racines qui entraine la désorganisation de la maçonnerie, accompagnée souvent de chute de pierres.

III.1.2 Formes d'altérations liées à la structure

i. Fissures et déformations

Une fissure traversant complètement l'élément fissuré est appelée fracture, elle témoigne d'une rupture franche du matériau, les deux parties étant complètement désolidarisées. L'ouverture d'une fracture, contrairement à celle d'une simple fissure, est souvent centimétrique, elle suit en général les zones de moindre résistance à la traction que sont généralement les joints. Toute fissure ou fracture est caractérisée par trois facteurs :

- son ouverture, définie comme étant la distance qui sépare les deux lèvres de la fissure
- le désaffleurèrent, différence de niveaux entre les deux parties séparées par la fissure et enfin ;
- le rejet, déplacement relatif, dans le sans parallèle de la fissure, entre les deux lèvres de la fissure.

Les déformations peuvent affecter sur l'ensemble de sa structure (déformation globale) ou sur une partie seulement (déformation localisée). Dans les deux cas, un changement de forme est observé. La déformation dite globale ou massive de la structure est généralement le résultat d'un problème de faiblesse, soit des parties porteuses (altération massive des semelles, piles, culées …), soit du terrain d'assise (altération du sol des fondations). Ce type de déformations se caractérise par la perte de linéarité de l'ouvrage. Les déformations localisées peuvent affecter toutes les parties de l'ouvrage.

ii. Détachement

Une altération de leurs joints provocant leur disparition. Cette chute de pierres constitue une forme de désorganisation de la maçonnerie qui peut être locale ou plus étendue, elle constitue une menace pour la stabilité

III.2 Méthodes d'auscultations des structures historiques

Pour la détermination de l'état existant, l'ingénieur utilise différentes sortes de moyens. Il utilise avant tout ses sens (vue, toucher, ouïe) pour découvrir l'état d'un ouvrage. Mais au cours de ces dernières années, de nombreuses techniques spécifiques pour l'auscultation de l'état existant ont été développées. Généralement l'examen des ouvrages en maçonnerie emprunte deux voies complémentaires : une voie non-destructive (qui ne causent aucune dégradation) et une voie destructive. Dans le cadre d'étude de monuments historiques classés et inscrits, le diagnostic devra toujours privilégier les méthodes in situ non destructives préservant au mieux l'édifice.

III.2.1 Auscultations non destructives

Les méthodes non destructives sont utilisées pour évaluer les caractéristiques mécaniques d'une maçonnerie in situ sans occasionner de dommage sur l'édifice. Par ce type de méthode,

une analyse comparative sur différentes zones du monument peut être opérée. Celle-ci permet d'obtenir une image de la structure dans sa globalité.

1. Inspection visuelle

L'inspection visuelle constitue le premier contact avec le monument historique. Les dommages observés peuvent être relevés et classés. L'état apparent des matériaux et l'état de fissuration de l'ouvrage sont considérés. L'utilisation de caméras endoscopiques laisse la possibilité d'ausculter les zones plus difficilement accessibles. L'inspection visuelle est accompagnée d'un reportage photographique présentant l'édifice et ses pathologies. Cette première phase d'évaluation ne doit pas être négligée car elle permet d'émettre des hypothèses sur les causes des symptômes structurels constatés. Ensuite, l'ingénieur orientera son diagnostic à partir de ces hypothèses.

2. Essais non destructifs

- **Scléromètre**

Le scléromètre ou marteau Schmidt est un instrument de mesure de la dureté de la pierre (voir la figure III.1). Il a été développé afin d'analyser la dureté du béton mais il offre aussi de bons résultats sur la pierre. C'est un essai rapide et facile à réaliser. Le principe est de mesurer l'énergie cinétique de rebond initial d'une tige et d'en déduire une mesure de dureté. C'est un moyen rapide de vérification de l'homogénéité des pierres en œuvre. Une interprétation rigoureuse et argumentée des mesures est néanmoins indispensable : une dureté de la pierre en surface ne reflète pas nécessairement la dureté au cœur de la pierre. Enfin, avec un calibrage en laboratoire, la mesure de la dureté peut être reliée à la résistance en compression et aux propriétés élastiques de la pierre [III.2].

Fig.III.1 : Le scléromètre [III.3].

- Mesure de la vitesse de propagation du son

La vitesse de propagation du son dans une pierre naturelle dépend de la compacité du matériau, mais aussi de sa teneur en eau, de sa minéralogie, de son état de fissuration, de la présence de certains sels, … . Il s'agit donc d'une mesure précise, mais qui relève de nombreux paramètres d'influence. En ce sens, elle ne sera porteuse d'informations (sur l'état d'altération de la pierre, par exemple) que si l'ensemble de ces paramètres est connu et maîtrisé. Son principe est d'émettre une onde acoustique via un émetteur et de récupérer le signal après propagation dans le matériau via un récepteur. L'appareil mesure le temps de propagation de l'onde entre deux points. La vitesse de propagation de l'onde acoustique est ainsi déduite. Cette grandeur physique peut conduire à l'estimation des caractéristiques mécaniques de la pierre. En effet, la vitesse de propagation de l'onde acoustique est reliée à la compacité de la pierre, elle-même reliée à sa résistance mécanique. Cette technique permet en outre une étude comparative rapide des différentes zones d'un édifice. On distingue trois modes de transmission : les chemins directs, semi-directs et indirects (voir la Figure III.2 (a)).

Le chemin direct est à privilégier car ce mode de transmission révèle la compacité de la pierre dans sa profondeur. La détermination de la profondeur d'une fissure observée en surface peut également être réalisée (Figure III.2 (b)).

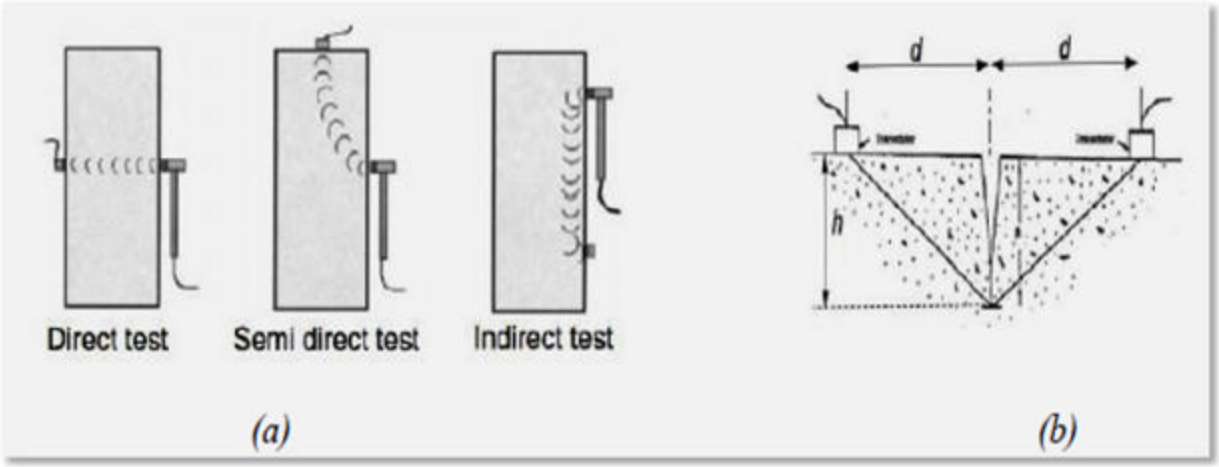


Fig.III.2: (a) Modes de transmission de l'onde acoustique,
(b) Caractérisation de la profondeur d'une fissure [III.4].

La possibilité d'obtenir un champ de distribution de vitesse ultrasonore sur une section est assuré par l'utilisation d'une technique de tomographie sonique c'est-à-dire la reconstruction

de l'image interne (Figure III.4). Il s'agit d'une méthode numérique itérative compilant un grand nombre de données obtenues en surface et donnant la possibilité d'obtenir une cartographie de la vitesse de propagation et donc de mettre en évidence la structure interne de l'élément étudié.

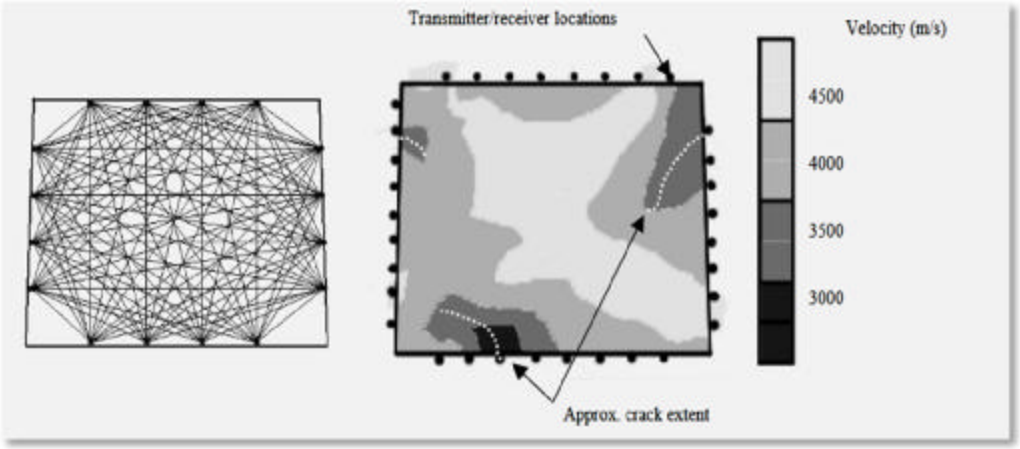


Fig.III.3:(a) Technique de tomographie sonique, (b) Profil de vitesse de propagation du son et estimation de la profondeur de fissure [III.5]

- Radar

Le principe du radar est d'envoyer des ondes électromagnétiques brèves via une antenne émettrice et de récupérer le signal réfléchi par les discontinuités présentes dans le matériau par une antenne réceptrice (Figure III.5). En général, les deux antennes se situent dans le même boitier, le système est alors mono-statique. Une roulette est fixée au boitier et assure la mesure de la distance parcourue par les antennes. Ainsi, il est possible d'extraire des profils radar à deux dimensions présentant la longueur en abscisses et profondeur du signal en ordonnée. Les antennes sont reliées à une unité d'acquisition qui assure l'enregistrement du signal. La fréquence du signal est comprise en général entre 200 et 2000 MHz. La résolution des résultats dépend de la fréquence de l'onde électromagnétique. Les fréquences basses permettent d'étudier le matériau sur une profondeur allant jusqu'à 4mètre mais présentent une résolution d'image assez faible.

A l'inverse, les hautes fréquences donnent la possibilité d'obtenir des profils radars précis mais sur des épaisseurs plus faible. Il est donc nécessaire d'avoir une première idée de ce qu'il faut observer afin d'optimiser au mieux les paramètres de la mesure. Ce type d'essai non destructif nous éclaire sur la disposition et l'appareillage des pierres (voir la figure III.6) et sur

les épaisseurs des éléments étudiées. Il peut également indiquer la présence de vides, l'état interne et la cohésion des joints et des pierres. Enfin, l'utilisation du radar peut conduire à la détection de la présence d'armatures, d'agrafes et de renfort métalliques.

Fig.III.4: Radar [III.6]

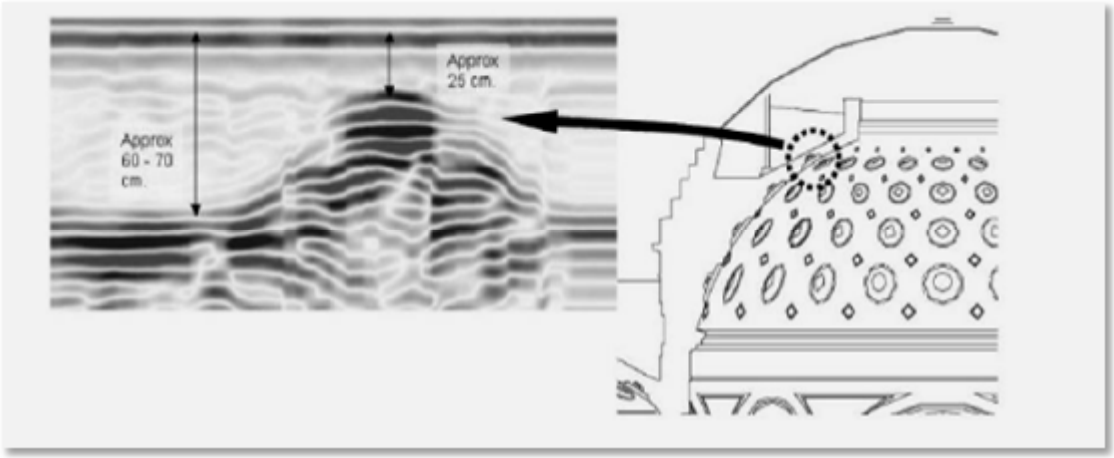


Fig.III.5 : Profil radar du dôme de la Basilique de l'immaculée conception à Baltimore [III.5]

3. Instrumentation

L'instrumentation permanente des monuments historiques est un outil essentiel du diagnostic structurel d'un monument historique. Elle est nécessaire pour obtenir des informations sur l'évolution des désordres structurels au cours du temps. Ces suivis donnent également la possibilité de vérifier que les mouvements et déplacements structurels mesurés n'atteignent pas un seuil inacceptable. Par ailleurs, l'instrumentation est un moyen non destructif de mesure et de contrôle de l'efficacité des rénovations structurelles réalisées.

Trois types de capteurs sont généralement employés : les fis uromètres, les convergences mètres et les inclinomètres.

- **Fissuromètres :** est un instrument de mesure permettant la surveillance de l'activité des fissures sur les ouvrages de maçonnerie. Les témoins au plâtre ont laissé la place aux réglettes graduées qui elles-mêmes se sont effacées au profit de fissuromètres électroniques. Ils ont pour rôle de contrôler et de mesurer l'évolution de l'ouverture d'une fissure. Ils peuvent être unidirectionnels ou tri-directionnels afin de mesurer simultanément l'ouverture, le cisaillement et le rejet d'une fissure. Ce type de capteur permet en outre de mesurer les déformations dans les deux sens(ouverture et fermeture) contrairement à un témoin au plâtre.

- **Convergence mètres** : permet de suivre les variations de distances entre deux points (c'est à dire la possibilité de mesurer la variation de distance entre deux points de la structure). Ils sont constitués de fils Invar reliés entre eux par un ressort mesurant l'écartement entre les deux points d'attache. L'Invar est un alliage de fer et de nickel possédant un coefficient de dilatation thermique très faible. Ainsi, les variations thermiques n'influences pas la mesure de convergence. Notons que les fibres optiques peuvent être utilisées pour mesurer d'éventuelles élongations.

- **Inclinomètres** : Les inclinomètres ont pour rôle de mesurer l'inclinaison d'un mur ou d'une colonne. Ils peuvent être unidirectionnels ou bidirectionnels. Ils sont souvent placés en parallèle de la convergence mètres. L'ensemble de ces capteurs électroniques peut être relié à une centrale d'acquisition pour un enregistrement automatique des données. Une centrale GSM peut être mise en place afin d'obtenir les résultats des mesures à distance et en temps réel. De plus, des capteurs de température sont installés en parallèle des capteurs structurels afin d'analyser l'origine structurelle et/ou thermique des mouvements observés.

III.2.2 Auscultations destructives

- **Prélèvements d'échantillons**

Le prélèvement d'échantillon peut conduire à une caractérisation précise du matériau sur le plan chimique et mécanique. Le prélèvement se réalise avec une carotteuse (carotte prélevée) ou une perceuse (poudre prélevée) en vue d'une analyse ultérieure en laboratoire. Des essais mécaniques set chimiques sont utiles pour la connaissance de leur composition, de

leur loi de comportement mécanique en compression, traction et flexion, de leur masse volumique, de leur porosité et de leur teneur en eau. Une carotte donne de plus une vision globale de la constitution de la maçonnerie (nature de la maçonnerie, présence d'un ou plusieurs parements de pierre, présence d'une maçonnerie de blocage).Les diamètres usuels sont de 10à 15 cm. La carotteuse doit être judicieusement positionnée de façon à récupérer soit des morceaux de blocs soit de joint de mortier, soit des deux, en fonction des données recherchées. Il est donc essentiel de bien programmer les campagnes expérimentales à l'avance, d'autant que le carottage, s'il est autorisé, l'est en très faibles quantités.

- **Evaluation des caractéristiques mécaniques du mortier in-situ**

  - **Scléromètre pendulaire** Par rapport au scléromètre classique présenté précédemment, le scléromètre pendulaire est conçu pour effectuer des tests de dureté sur des matériaux plus tendres tels que le béton léger, les plaques de plâtre et les mortiers. Grâce à une énergie d'impact plus faible, il permet une lecture plus précise de la dureté des mortiers en place.

  - **Test d'arrachement** Il s'agit de mesurer la force d'arrachement nécessaire à mobiliser pour extraire une tige hélicoïdale vissée préalablement dans un joint de mortier in-situ. En utilisant des calibrations réalisées en laboratoire, cette force d'arrachement peut être reliée aux caractéristiques mécaniques du mortier.

  - **Essai de libération de contraintes :** L'essai de libération de contrainte ou «flat jack test» est utilisé d'une part pour estimer le niveau de contrainte normale s'exerçant dans la maçonnerie et d'autre part pour identifier la loi de comportement mécanique de la maçonnerie. Plusieurs configurations sont possibles. La plus simple consiste à insérer un vérin plat dans un joint préalablement entaillé. Cette méthode est considérée comme «semi-destructive» car le joint de mortier entaillé est remplacé directement après l'essai.

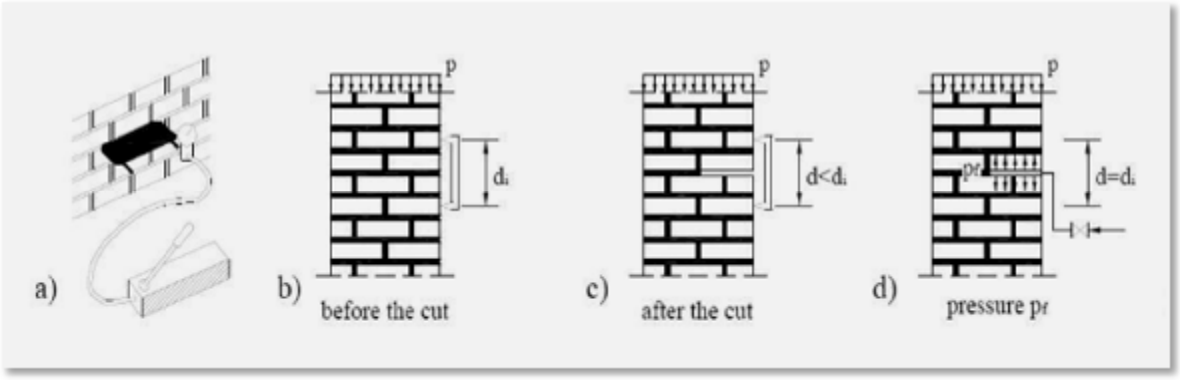


Fig.III.6 : Principe de l'essai de relâchement de contrainte [III.4].

La première étape (b) consiste à placer des capteurs de déplacement de part et d'autre de l'endroit où l'entaille sera réalisée. Ensuite, en (c), on entaille le joint ce qui entraine nécessairement, si le mur est soumis à de la compression, une diminution de la longueur d1. Enfin, on insère le vérin plat puis on le met sous pression jusqu'à obtenir la distance d1mesurée initialement. La pression exercée représente alors, à des facteurs de correction près, la contrainte de compression horizontale transitant réellement au sein de la maçonnerie.

III.3 Techniques de réhabilitation ou de renforcement des structures en maçonneries historiques

III.3.1 Renforcement traditionnel

Dans le renforcement traditionnel de structure de maçonnerie, des matériaux et des techniques traditionnels ont était souvent utilisées pour renforcer la structure existante. La structure de maçonnerie contient des éléments qui aident à redistribuer les charges dans les zones de concentration de contraintes dans les murs. Par exemple, les ouvertures sont renforcées avec des chaînages verticaux qui sont reliées avec un arc de décharge. L'arc de décharge permet de distribuer les charges verticales vers les côtés de l'ouverture. Les ouvertures sont aussi renforcées avec des éléments tels que le linteau (composé d'un seul morceau de pierre) et la plate-bande (qui se compose de plusieurs morceaux de pierre). Le linteau peut être accompagné par un arc de décharge pour limiter les charges sur le linteau. L'utilisation du linteau ou de plate-bande nécessite d'avoir des sommiers très résistants sur les côtés.

Si le mur est épais, une baie de fenêtre ou de portes s'effectue en faisant des portions de voûtes appelées les arrières voussures (voir la figure III.8).Les arrières voussures sont de

forme d'arc et leur intersection avec la face arrière du mur prend la forme d'un arc ou d'une droite. Les ouvertures ont été bouchées dans les murs traditionnels pour les renforcer dans le cas d'une faiblesse dans l'arc de décharge.

(a) arc de décharge (b) arrières voussures plate-bande

Fig.III.7 : Renforcement des ouvertures des éléments de maçonnerie

De plus, l'intersection entre deux murs s'établie avec un chaînage d'angle qui assure la rigidité de la connexion. Le chaînage d'angle subit des forces de tractions qui viennent des murs connectés et il travaille comme un tirant. Dans le cas d'un manque de stabilité dans la maçonnerie, le renforcement se fait en construisant des sous structures tel que les contreforts. L'objectif de construire un contrefort est de diminuer la déformation latérale de la structure. Les contreforts prennent la forme d'escalier de contrefort, arc de contrefort, ou mur de contrefort. D'une autre côté, l'utilisation des tirants dans les murs vise à relier deux murs opposés subissant un écartement. Cette technique est utilisée dans les zones de tremblement de terre ou d'effondrement de sol.

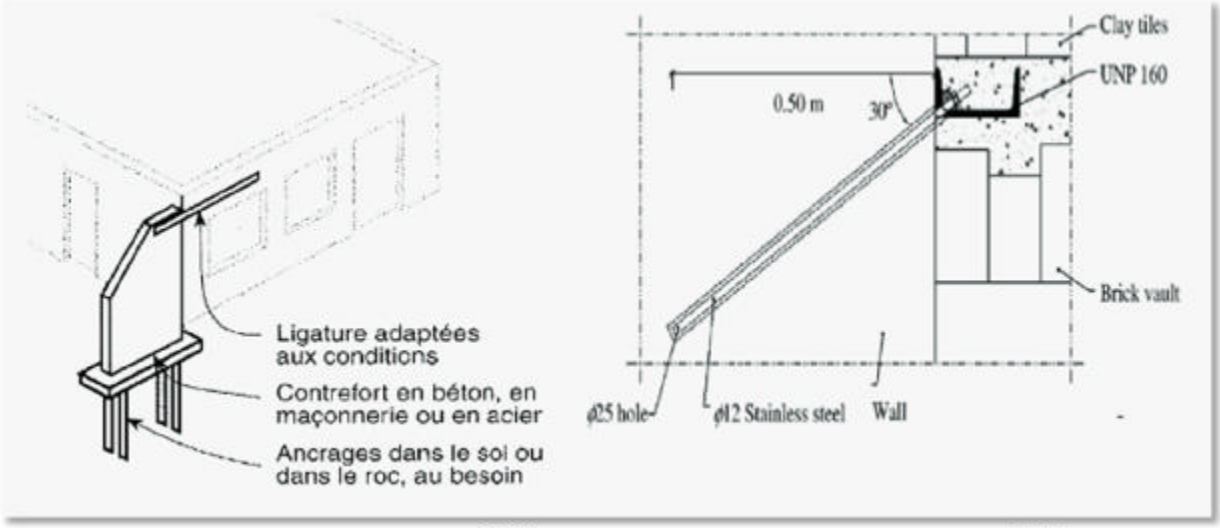
A l'extrémité de chaque tirant, il existe des pièces métalliques appelées ancres ou clef, elles représentent les appuis des tirants. Le bois était utilisé dans le renforcement des murs pour réduire le déplacement latéral et les déformations hors plan. Des planchers en bois ont été fixés sur la surface du mur dans la direction des diagonales. Le bois a été aussi utilisé pour renforcer les planchers par des poutres.

III.3.2. Renforcement métallique ou avec du béton armé

- **Construction de sous-structures**

L'utilisation de l'acier dans une sous-structure métallique se présente sous la forme d'ossatures contreventées, cadres ou angles de fixation. C'est une solution de renforcement sismique face à la flexion et au cisaillement qui permet d'améliorer la rigidité et la résistance de la structure. Par exemple, ce renforcement a été utilisé dans la cathédrale Saint Christ à Outerio, Portugal [III.7]

De plus, l'utilisation de béton armé dans le renforcement permet de construire des murs de cisaillement, construire un contrefort extérieur et de confiner des éléments comprimées [III.8].Il est nécessaire d'attacher le renfort à la structure de maçonnerie et de le fixer au sol par un ancrage (voir la figure III.9.a). Ancrage de la pierre L'ancrage de la pierre permet d'assurer la continuité de transmission de charges entre deux éléments de la maçonnerie ou entre un élément de la maçonnerie et son renfort [III.7]. Il consiste à introduire une barre d'acier dans la pierre de structure afin d'assurer cette liaison. L'espace autour de la barre engagée est rempli par l'injection d'un adhésif (mortier, époxy...) pour garantir la cohésion entre la barre et la structure de la maçonnerie. La profondeur, l'inclination et le diamètre de la barre sont des paramètres liés à la charge appliquée et à la nature de l'élément de la structure. Figure III.9.b.



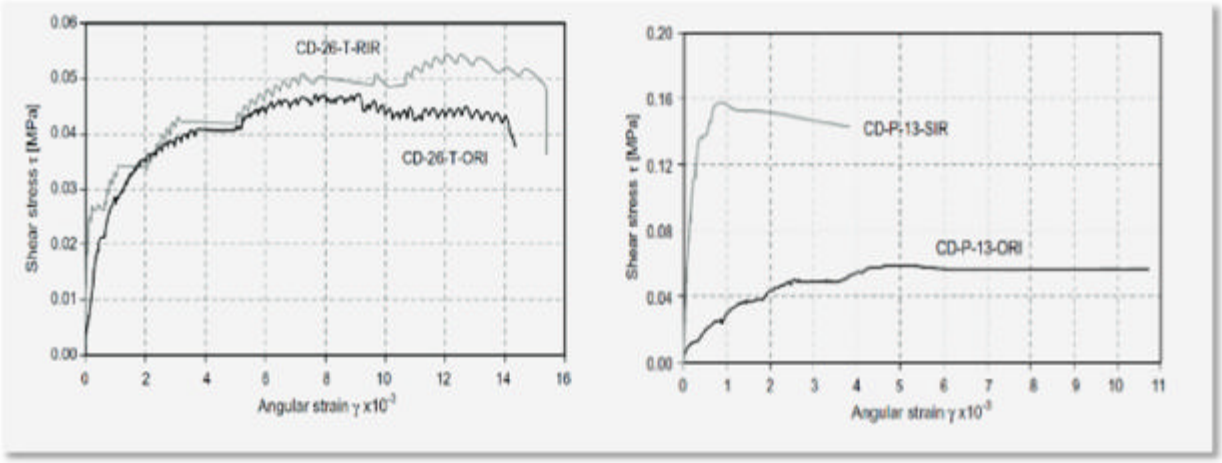
a) sous-structure de contrefort [III.8] b) ancrage de la pierre[III.7]

Fig.III.8 : Renforcement de la maçonnerie avec contrefort et ancrage de la pierre

- **Renforcement dans les joints de mortier**

Le renforcement de la maçonnerie dans les joints s'effectue avec des techniques et des matériaux différents ; barres, câbles ou grillage métallique [III.9],[III.10]. L'application du renforcement dans les joints permet d'endommager dans une moindre mesure la surface de la structure et de protéger le renfort des conditions environnementales. De plus, le renfort est confiné dans les joints, ce qui augmente l'adhésion entre l'élément-renfort et améliore l'efficacité du renforcement

Le remplacement du mortier de surface dans le joint, nécessite d'enlever une épaisseur de 2-6 cm de l'ancien mortier. Ensuite, il est nécessaire de nettoyer et humidifier la surface traitée. Enfin, il faut injecter le nouveau mortier. Le mortier de chaux hydraulique est favorisé pour les structures anciennes. Corradi et al, 2008 [III.11] ont testés en compression diagonale des murs de maçonnerie ayant des joints irréguliers. Le remplacement du mortier a augmenté la rigidité élastique, mais n'a pas augmenté significativement la résistance au cisaillement (voir la figure III.10.a). Alors que, l'application de cette technique accompagnée avec des barres traversant la section du mur a donné une augmentation de la rigidité et de la résistance au cisaillement (voir la figure III.10.b).



(a) augmentation de la rigidité

(b) Augmentation de la résistance au Cisaillement et de la rigidité

Fig.III.9 : Comportement de cisaillement des murs renforcés avec remplacement de 2 à6 cm de mortier des joints : (a) sans utilisation des barres transversales (b) avec utilisation des barres transversales

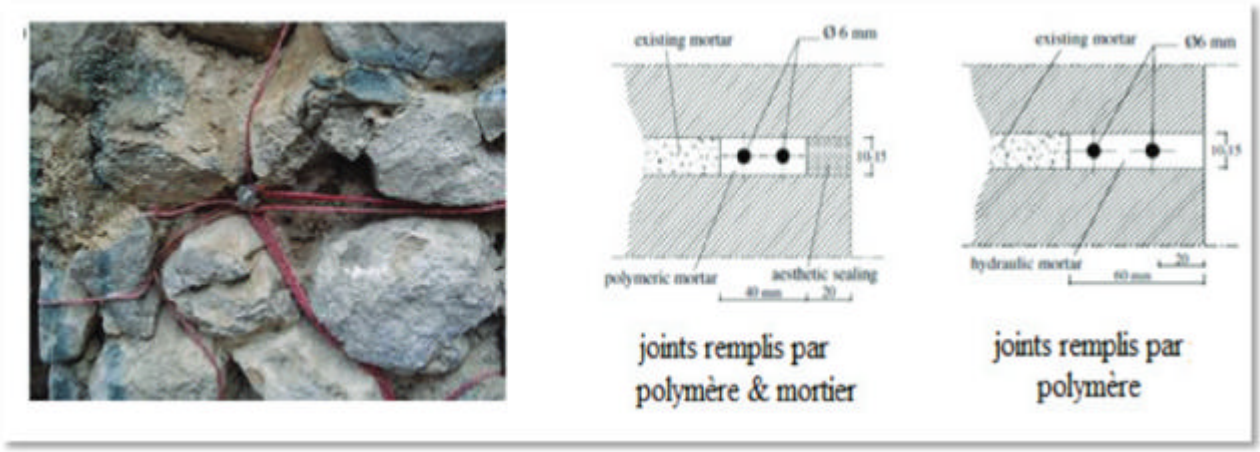
Le renforcement des murs composés de plusieurs couches dans l'épaisseur se réalise par l'injection d'un matériau remplissant à partir de la couche intérieure. Cette technique utilisée

par Oliveira et al 2004 [III.12] peut être accompagnée d'un renforcement par des barres traversant la section. Ce renforcement vise à réduire le déplacement relatif entre les couches du mur dans l'épaisseur et d'augmenter la résistance en compression du mur. L'injection du matériau remplissant commence du bas vers le haut du mur en utilisant une pression faible de l'ordre de 0.1 N / mm² environ. Le tube d'injection est fixé sur l'une des faces du mur voir les deux selon l'épaisseur de la couche renforcée et il a un diamètre de 10 mm Il est nécessaire que le travail d'injection du mortier soit précédé par l'humidification du mur pour éviter l'absorption de l'eau pendant l'injection [III.12]

Par ailleurs, le renforcement avec des câbles introduits dans les joints est une technique étudiée par Borri et al, 2011 [III.10]. Cette technique s'appelle « Reticolatus » et doit être précédé par la caractérisation de la résistance en compression de chaque couche du mur Le principe de « Reticolatus » consiste à prélever 6-8 cm du mortier. Par la suite, engager des barres dans le sens perpendiculaire à la surface du mur. Ensuite, introduire des câbles d'acier dans les joints pour former un maillage sur la surface du mur. Le mur est renforcé aussi avec des barres qui traversent deux tiers de la profondeur de la section. L'intersection entre deux câbles forme un nœud du maillage. Les nœuds du maillage se fixent avec des barres transversales. Chaque mètre carré de la surface a 4nœuds fixés. Enfin les joints sont remplis avec un nouveau mortier. Dans le travail de Borri et al, 2011 [III.10] deux types de câbles sont utilisés. L'un est un câble d'acier a une grande résistance à la traction ; UHTTS, et l'autre est un câble de polyéthylène ; UHMWPE. La résistance à la traction du câble d'acier est plus élevée. En revanche, les câbles de polyéthylène possèdent des déformations ultimes à la traction qui sont plus importantes. Les résultats montrent que la résistance au cisaillement augmente entre 2.7 et 2.9 fois en utilisant les câbles d'acier par rapport au mur non renforcé. Alors que l'utilisation des câbles de polyéthylène donne une augmentation de la résistance de 2.3 fois par rapport au mur non renforcé.

De plus, l'utilisation des câbles de renforcement est remplacée par le renforcement avec des barres d'acier dans les murs de joints régulières. Par exemple, pour renforcer la cathédrale St. Giustina's Padua, Italy [III.9], les joints horizontaux de mur sont renforcés avec des barres d'acier au long du joint, après avoir retiré 6-8 cm de profondeur de mortier. En plus, comme le diamètre de barre est limité par l'épaisseur de mortier, il est possible de disposer deux barres dans la même couche renforcé. Une couche d'enrobage de 2 cm permet de prévenir la

corrosion de l'acier. La Figure II.4représente la section du joint avec la possibilité de l'utilisation du mortier hydraulique ou polymérique pour remplir les joints. Dans le cas d'un mur épais, le renforcement avec des barres se réalise sur les deux côtés du mur et il est accompagné avec des barres qui traversent la section [III.9].



(a)Technique de « Reticolatus» (b) Détails de la section de joint

Fig.III.10 : Renforcement des joints de mortier de la maçonnerie (a) avec cordes d'UHMWPE [III.9]

III.4 Renforcement par matériaux composites

L'utilisation des matériaux composites a évolué depuis les années 1960-1970 [III.13]. Un matériau composite est constitué d'un renfort et d'une matrice. L'efficacité du renforcement par composite est influencé par les propriétés mécaniques de la fibre et de la matrice, la résistance de l'interface fibre-matrice, la quantité de fibre dans le composite et l'orientation des fibres dans le composite. Les matériaux composites présentent plusieurs avantages par rapport à l'acier en tant que matériau ductile et non-corrosif. Ils possèdent une bonne résistance spécifiqueσ_t/ρet elle dispose d'une grande facilité d'application. Cependant, les inconvénients de l'utilisation de matériaux composites viennent de leur faible résistance au feu, la rupture fragile, le fluage et le risque de gâcher la valeur esthétique de structure [III.14]

III.4.1.FRP

Les FRP « fibrer enforce polymère » représentent de fibres à haute résistance imprégnés par une matrice polymérique (époxy, polyester, …). Les fibres de FRP utilisées dans le renforcement en génie civil sont des fibres en carbone (CFRP), verre (GFRP), et aramide (AFRP).Le FRP utilisé pour le renforcement des structures se trouve sous forme de tissus, de

composite en lamelle ou en barre. L'application de tissus de FRP s'effectue par collage sur la surface extérieure de l'élément avec la technique « wet lay-up » ou « pre-cured ». Les tissus sont secs ou pré-imprégnées par une matrice polymérique. Alors que les lamelles sont des plaques rigides préfabriquées qui s'installent par collage avec une résine chargée époxy [III.15].Les lamelles offrent la possibilité de s'appliquer par collage sur la surface extérieure EB« externally bonded » ou dans l'élément par la technique NSM [III.16]. Les barres de FRP s'appliquent dans les éléments par encrage dans la pierre ou par la technique NSM [III.17] qui seront utilisés dans cette étude. La figure III.11 représente un mur historique renforcé par collage de tissus de CFRP sur la surface extérieur [III.18]. Les barres de FRP peuvent avoir une surface sablée, déformée ou lisse. La rugosité de la surface des barres influence le comportement d'adhésion entre la barre et l'adhésive. La figure III.12 représente quelques formes de barres et de lamelles de FRP.

Fig.III.11 : Renforcement avec bandes de CFRP comportement de cisaillement cyclique Renforcement NSM [III.17].

Fig.III.12 : Formes de quelques barres, et Essai de de lamelles de FRP utilisées dans lémure renforcé [III.18].

La résistance des fibres et de la résine, le taux de volume de fibre et de résine dans le FRP, l'orientation des fibres sont des paramètres qui influencent la propriété de barres de FRP. Les propriétés de FRP sont classées selon la nature de fibres et comparées avec les comportements de l'acier dans le tableau III.1. Les valeurs du tableau III.1 sont présentées dans le travail de Fukuyama, 1999 et Secondin, 2003 [III.19].

	acier	Fibre			
		Aramide	Carbone GC-	Glass	GC-Hybrid
Volume de fibre axiale (%	-	43-69	43-66	40-68	40
Diamètre (mm)	-	3.0-21.8	3.0-40.0	2.4-19.4	7.1-23.8
Densité (g/cm³)	7.8	1.2-1.5	1.3-1.6	1.5-2.0	1.7
Résistance à la traction (MPa)	483-690	1300-1830	780-1800	590-1130	530
Module de Young (GPa)	200	42-78	73-210	30-49	37
Déformation élastique (%)	0.14-0.25	N/A	N/A	N/A	N/A
Déformation ultimes (%)	0.6-0.12	0.5-1.7	1.2-3.1	1.9-4.4	1.4

Tableau III.1 : Comportement d'acier et de FRP classé selon la nature des fibres [III.19]

Le choix de la matrice polymère doit offrir la possibilité que le FRP ait une déformation maximale aussi importante que la déformation ultime des fibres [III.19]. Le tableau III.2 représente des valeurs moyennes qui caractérisent des résines époxy utilisées dans les structures de génie civil et présentées dans le travail de Nguyen, 2008[III.20]

Propriétés	Valeurs moyennes
Résistance à la traction	20 à 90 MPa
Allongement à rupture en traction	1 à 3 %
Module d'élasticité en traction	3 à 10 GPa selon le taux de charges
Résistance en compression	140 à 150 MPa

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques moyennes des résines époxy [III.20]

La technique NSM FRP consiste à insérer des barres de composites (ou des lamelles) dans une rainure effectuée sur la surface de l'élément et de coller le renfort avec la structure en utilisant un adhésif (époxy, polyester, mélange de mortier et époxy …). La position des barres

dans la rainure permet au renfort d'être confiné des trois côtés. Par conséquent, le risque de décollement est réduit par rapport au collage de FRP sur une face extérieure. Cette technique de renforcement a été étudiée par plusieurs auteurs pour le renforcement au cisaillement et la flexion. Cette technique de renforcement de NSM a été aussi étudiée avec Ismail et al 2011[III.21] qui ont testé des murs renforcés avec barres d'acier et sous charges de cisaillement par l'essai en compression diagonale.

III.4.2.2.Exemples de collage de FRP bandes ou tissus

La capacité d'allongement des fibres de verre est plus importante que celle de fibres de carbone. Alors qu'en termes de résistance et de rigidité, les FRP de fibres de carbone sont plus résistantes à la traction (voir le tableau III.1). Les résultats expérimentaux obtenus avec Kalali étal, 2012 [III.22] montrent que le renforcement avec des bandes de GFRP en plusieurs configurations a donné une augmentation de la ductilité des murs de maçonnerie testées en compression diagonale. L'augmentation de ductilité va de 61.07% à 479.3 % par rapport au mur de référence. De plus, le collage de FRP sur la surface extérieur du mur s'effectue avec des bandes, ou surtout la surface du l'élément, Mosellan et al, 2011 [III.23]. L'influence de la direction des fibres sur le comportement de cisaillement des murs de la maçonnerie avait été étudiée par Santa-Maria, 2004 [III.24].

Les murs sont soumis à décompressions diagonales et renforcés par des lamelles de CFRP. Les résultats montrent que le renforcement diagonal a plus augmenté la résistance que le renforcement horizontale. L'augmentation de la résistance apportée avec le renforcement diagonale s'élève à 70% par rapport à la résistance du mur non renforcé. En plus, le renforcement diagonal a augmenté la rigidité élastique du mur. En revanche, le renforcement horizontal n'a pas d'influence sur la rigidité axiale. Ainsi, Valluzzi et al [III.25]ont étudié le renforcement des murs de maçonnerie en variant la direction du renforcement en bandes diagonale et maillage orthogonale.

Les fibres utilisées varient de la fibre de carbone, de verre, ou de Polyvinyal-alcohol dont les modules élastiques sont 230, 65, 29 GPa, respectivement. Les résultats montrent que la configuration diagonale plus efficace que le maillage pour augmenter la résistance au cisaillement. En plus, le renforcement avec les fibres de FRP les moins rigides a été le plus efficace pour augmenter la résistance ultime et la rigidité des murs.

III.4.2 Exemple d'insertion de NSM FRP près de la surface

Le renforcement des murs de maçonnerie avec une technique de NSM FRP a été étudié par Marshall et al, 2002[III.26], Tinazzi et al 2000 [III.27], et Silva et al 2006 [III.28] pour un chargement monotone dans le plan du mur. Turco et al 2006 [III.29] ont étudié des murs de maçonnerie en blocs de béton. Les murs sont renforcés dans les joints horizontaux d'un seul côté par NSM GFRP. Les murs sont soumis aune charge de compression diagonale. Turco et al, 2006 trouvent que malgré le module élastique faible des GFRP, l'utilisation des barres en fibre de verre dans le renforcement de la maçonnerie donne une bonne performance par rapport aux comportements obtenus par le renforcement avec CFRP. En plus, l'utilisation de barres de section circulaire est plus adaptée pour le renforcement de cisaillement alors que la section rectangulaire des barres est préférée pour le renforcement de flexion. Le renforcement par NSM FRP est utilisé pour les murs soumis aux chargements de cisaillement cyclique avec Konthesingha et al 2013 [III.30], et Li et al 2005[III.31]. Konthesingha et al 2013 [III.30] ont étudiée l'application du renforcement NSM CFRP sur des murs en maçonneries endommagés. Les FRP utilisés sont des lamelles appliquées selon trois schémas différents ; renforcement horizontal d'un seul côté, renforcement horizontal de deux côtés et renforcement horizontal & vertical de deux côtés du mur. Les résultats montrent que la résistance maximale des murs renforcés n'a notamment pas augmentée mais que la capacité se déformer est améliorée. De plus, le mur renforcé avec la configuration horizontale &verticale a la meilleure performance en résistance, déformation et dissipation de l'énergie.

III .5 Matrice cimentaire renforcée par textiles

La matrice cimentaire et le béton présentent un comportement non ductile à la traction, accompagnée d'une résistance à la traction relativement faible. Le renforcement avec des fibres courtes d'acier a été développé en 1990[III.32]. Les fibres d'acier ont été utilisées dans le renforcement du béton. Le taux volumique de fibre utilisé dans le béton est de 1 à 5 %. Par la suite, les fibres d'acier sont remplacées par des fibres de carbone. L'utilisation de fibre de carbone dans le béton a donné une résistance importante en flexion et a augmenté la durabilité par rapport à celle du béton fibré par fibres d'acier [III.32].De plus, le TRC est un composite (matrice-textile) qui représente l'utilisation d'une matrice minérale (cimentaire, céramique) renforcée par textiles techniques (verre, carbone, acier, polypropylène, nylon).

La matrice est composée de mortier de granulométrie fine, entre 1- 2mm Le nombre de couches de textile peut aller jusqu'à 6 [III.33]. Barhum et al, 2012 [III.34] étudient le

comportement mécanique en traction des plaques amatrice cimentaire renforcées par textile et fibres courtes de verre. L'utilisation de la fibre courte dans la matrice de TRC a augmenté la résistance à la traction de TRC avec un nombre de micro fissures plus élevé par rapport au TRC sans fibre courte dans la matrice. Silva et al, 2011[III.35] ont étudiés l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement de traction de TRC de fibre de verre bi-axial.

Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse de déformation de $5s^{-1}$ à $50s^{-1}$ a été accompagnée avec une augmentation de la résistance à la traction de TRC et de l'énergie de rupture, alors que les déformations maximales ont diminuées. En revanche, l'augmentation de la vitesse de chargement de $0.0001\ s^{-1}$ jusqu'à $0.1\ s^{-1}$ a donné une augmentation de ; la résistance à la traction du TRC, de la déformation maximale, de l'énergie de rupture, et de la résistance de fissuration de la matrice. Le Tableau III.3 représente une comparaison entre les propriétés principales des fibres comparées avec les propriétés de l'acier et de la résine. Les valeurs du Tableau III.3 sont données par le CNR, 2004 [III.35].

Nature de fibre de textile	Module d'élasticité E (GPa)	Résistance à la traction σ_t(MPa)	Déformation à la rupture ε (%)	Coefficient de dilatations thermique $\alpha\ 10^{-1\circ}C^{-1}$	Densité ρ *(g/cm)*
Verre-E	70-80	2000-3500	3.5-4.5	5-5.4	2.5-2.6
Verre-S	85-90	3500-4800	4.5-5.5	1.6-2.9	2.46-2.49
Carbone (high module)	390-760	2400-3400	0.5-0.8	1.45	1.85-1.9
Carbone (high résistante)	240-280	4100-5100	1.6-1.73	0.6-0.9	1.75
Aramide	62-180	3600-3800	1.9-5.5	2	1.44-1.47
Matrice polymérique	2.7-3.6	40-82	1.4-5.2	30-54	1.10-1.25
acier	206	250-400 (élastique) 350-600 (rupture)	20-30	10.4	7.8

Tableau III.3 : Propriétés de fibres employées dans le TRC en comparaison aux l'acier et la résine[II.35]

III .5.1.Renforcement par matériaux composite en utilisant une matrice cimentaire

L'utilisation de la matrice cimentaire renforcée par textiles a été étudiée pour le renforcement des structures en maçonnerie et en béton sous différents cas de chargement. Les études de l'utilisation du TRC dans le renforcement du béton armé se présente dans le confinement des colonnes pour résister aux charges de compression [III.36] et de torsion [III.65], le renforcement des poutres et des dalles en cisaillement et en flexion, respectivement [III.38].Grâce à la rigidité axiale élevée des fibres de carbone par rapport à celle des fibres de verre, les fibres de carbones sont préférées aux fibres de verre-AR pour le confinent des colonnes soumis en compression [III.36]. En plus, le renforcement de poutre en cisaillement est étudié surdes poutres de section rectangulaire et T.

Les fibres en verre AR sont orientées à 45° par rapport de l'axe de poutre. Les résultats montrent que contrairement à la poutre de section rectangulaire U, la forme d'ancrage a une influence sur l'augmentation de la résistance de la poutre de section T. En effet, l'utilisation de *3* ou *4* couches de TRC dans les poutres de section T nécessite un ancrage mécanique car l'ancrage du à l'adhérence n'est plus suffisant [III.38].Le renforcement des murs de maçonnerie soumis aux charges de cisaillement cycliques a été étudié par Papani colaou et al 2011 [III.39]. Les fibres des textiles sont en ; Carbone, basalte, fibre de verre imprégné de bitume, fibre de polyester imprégné de bitume, Polypropylène. Les fibres sont imprégnées par plusieurs types de matrice ; mortier, mortier fibré, mortier mélangé avec de la résine, et résine époxydique. Papanicolaou et al trouvent que le renforcement par TRC donne une augmentation de *(15-30%)* de la déformation maximale par rapport à celle du mur non renforcé. En plus, l'utilisation de TRC dans le renforcement produit une capacité de déformation du mur 15-30% plus que la capacité de déformation obtenue avec le renforcement avec FRP. En revanche, le renforcement avec TRC est moins efficace que le renforcement avec FRP pour augmenter la résistance au cisaillement.

Parisi et al, 2013 [III.40] ont étudié les murs de maçonnerie soumis à la compression diagonale. Les murs sont renforcés par FRP préfabriqué et appliqué sur la surface du mur par une matrice non-organique. Le renforcement est appliqué en trois configurations ; renforcement d'un seul côté avec GFRP, renforcement de deux côtés avec GFRP, et renforcement d'un seul côté de mur avec GFRP accompagné par des barres d'ancrages qui traversent la section. Le renforcement d'un seul côté du mur donne une augmentation d'un facteur de 1.15 de la résistance au cisaillement par rapport à la résistance du mur non renforcé. En plus ce facteur d'augmentation de la résistance à une valeur de *2.1* dans le cas du

renforcement de deux côtés, et 1.34 dans le cas de renforcement d'un seul côté accompagné de l'utilisation de l'ancrage. De plus, l'existence de l'ancrage offre une augmentation de la ductilité plus importante par rapport aux autres configurations de renforcement.

III .5.2.Caractérisation de l'adhérence : types d'essais

La caractérisation des joints collés est importante à réaliser lors de l'utilisation de matériaux composites dans le renforcement de la structure. La mesure de la distribution de contrainte de cisaillement tout au long des joints collés permet de calculer la longueur effective de collage à l'élément. En effet, la longueur effective de collage représente la longueur de collage minimale demandée pour le développement de la force d'adhésion maximale, Kashyape et al, 2012[III.41]**.** Plusieurs essais permettent de déterminer la résistance de l'adhésion entre le béton et le matériau composite, Nguyen, 2008 [III.20]. Les essais se distinguent par la forme de l'éprouvette, le chargement et le support. Les modes de rupture sont définis selon la localisation de la fissure ; rupture cohésive dans l'adhésif, rupture cohésive dans la structure, et rupture adhésive [III.20].

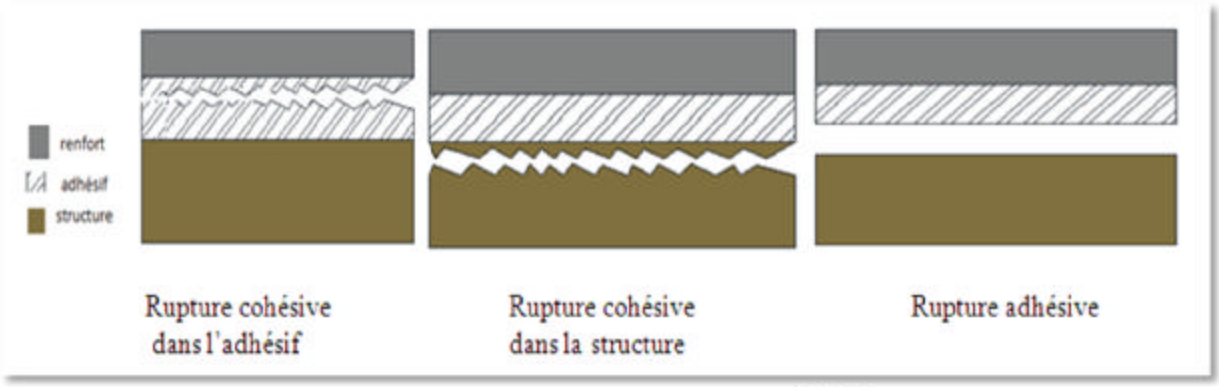


Fig.III.13 : Modes de rupture du joint collé [III.20].

Conclusion

Il possible de classer deux types de pathologies dans les structures en maçonneries, des pathologies liés aux matériaux et à la structure. Pour faire le diagnostic, Deux familles d'investigations ont été répertoriées: les méthodes destructives et les méthodes non destructives. Concernant la caractérisation des maçonneries, le prélèvement par carottage est un bon moyen d'étudier la composition des maçonneries et d'identifier les caractéristiques mécaniques des pierres calcaires. Cependant, dans le cadre de l'étude de monuments

historiques classés, la valeur architecturale des maçonneries conduit à limiter au maximum ce type d’investigation. Les méthodes non destructives de type mesure de vitesse du son peuvent alors être un moyen non destructif de caractérisation mécanique des pierres calcaires. Les relevés radars permettent en outre l’étude de la composition des maçonneries. Enfin l’instrumentation de l’édifice nous renseigne sur l’évolution des désordres en temps réel. Différentes techniques de réhabilitation et/ou de renforcement des éléments en maçonneries à l'aide de divers matériaux selon différentes méthodes d’application sont discutées.

Référence

[III.1] ICOMOS, Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage, 2001. International Scientific Committee For Analysis And Restoration Of Structures Of Architectural Heritage. 2003

[III.2] Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 38, 981–994. doi:10.1016/S1365-1609(01)00039-9

[III.3] http://coursgeniecivil.blogspot.com/2013/07/essai-de-sclerometre.html

[III.4] Grecchi, G., 2012. Monitoring and Structural Assessment of Monuments in the Historical Centre of L'Aquila struck by the 2009 Earthquake: the Case Study of St. Silvestro Church Italy .Italie.

[III.5] Schuller, M.P., 2003. Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. Prog. Struct. Eng. Mater. 5, 239–251. doi:10.1002/pse.160

[III.6] http://doc.lerm.fr/sous-les-radars-lauscultation/

[III.7] Lourenço P.B., Assessment, diagnosis and strengthening of Outeiro Church, Portugal ,Construction and Building Materials19 p. 634–645, 2005

[III.8] CNRC-NRC, Lignes directrices pour la protection parasismique des structures de batiments existants, Institut de recherche en construction, Canada, Decembre, 1995.

[III.9] Valluzzi M. R., Binda L., Modena C., Mechanicalbehaviour of historicmasonry structures strengthened by bed joints structural repointing, Construction and Building Materials19, p. 63–73, 2005.

[III.10] Borri A., Castori G., Corradi M., Speranzini E., Shearbehavior of unreinforced and reinforcedmasonry panels subjected to in situ diagonal compression tests, Construction and Building Materials, 25 p.4403–4414, 2011.

[III.11] Corradi M., Tedeschi C., Binda L., Borri A., Experimentalevaluation of shear andcompression strength of masonrywallbefore and afterreinforcement:Deep repointing. Construction and Building Materials, 22 p. 463–472, 2008.

[III.12] Oliveira D.V., Silva R.A., Garbin E., Lourenço P.B., Strengthening of three-leaf stone masonrywalls:an experimentalresearch, University of Minho, 2004.

[III.13] Vintzileou E., Iniezione di miscelafluida in muratura a sacco:Risultatisperimentalieprevisione delle caratteristichemeccaniche, Seminar CIAS Evoluzionenellasperimentazione per le costruzioni, pp. 191–211, 2007.

[III.14] Contamine R., Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textile-mortier. Application à la réparation et/ou renforcement de poutresen béton armé vis-à-vis de l'effort tranchant. Thèse de doctorat, l'Université ClaudeBernard Lyon 1, 2011.

[III.15] Karbhari V.M., Zhao L., Use of composites for 21st century civil infrastructure, Comput. MethodsAppl. Mech. Engrg. 185, p. 433-454, 2000.

[III.16] Khalifa A., Gold W., Nanni A., Abdel Aziz M.I., Contribution of externally bondedFRP to shearcapacity of flexuralmembers, Vol.2, No.4, p. 195-203, 1998.

[III.17] Willis CR., Yang Q., Seracino R., Griffith MC., Bond behaviour of FRP-to-clay brick masonry joints. Eng Struct2009;31(11):2580–2587.

[III.18] De Lorenzis L., Teng J.G., Near-surface mounted FRP reinforcement: An emergingtechnique for strengthening structures Composites: Part B 38 (2007) 119–143

[III.19] Capozucca R., Experimentalanalysis of historicmasonrywallsreinforced by CFRPunderin-planecyclicloading, Composite Structures, 94, p.277–289, 2011.

[III.20] Secondin S., Masonryreinforcedwith FRP systems. PhDthese, Univerity of Missouri- Rolla, CIES, USA, 2003.

[III.21] Nguyen T.H.T., Model d'endommagement des assemblages collés : Identification et application à la description d'un essai de vieillissement accéléré. Thèse de doctorat,l'Ecole National des Ponts et des Chaussées, 2008.

[III.22] Ismail N., Petersen R.B., Masia M.J., Ingham J.M., Diagonal shearbehaviour of unreinforcedmasonrywallettesstrengthenedusingtwistedsteel bars, Constructionand Building Materials, 25 p. 4386–4393, 2011.

[III.23] Kalali A., Kabir M.Z., Experimentalresponse of double-wythemasonry panels strengthenedwith glass fiberreinforcedpolymerssubjected to diagonal compressiontests, Engineering Structures, 39 p.24–37, 2012.

[III.24] Mosallam A., Banerjee S., Enhancement in in-planeshearcapacity of unreinforcedmasonry (URM) wallsstrengthenedwithfiberreinforcedpolymer compositesComposites, 42, p.1657–1670, 2011.

[III.25] Santa-Maria H., Duarte G., Duarte A., Garib A., Experimental Investigation of masonry panels externally strengthenedwith CFRP laminates and fabricsubjected toin-planeshearload, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver,B.C., Canada, No. 1627, August 1-6, 2004.

[III.26] Marshall O.S., Sweeney S.C., In-planeshear performance of masonrywalls strengthenedwith FRP. In 47th International SAMPE Symposium and Exhibition, p.929–940, Long Beach, CA, USA, May 12-16 2002.

[III.27] Tinazzi D., Nanni A., Assessment of technologies of masonryretrofittingwithFRP.Technical report. Center for Infrastructure Engineering Studies, University ofMissouri-Rolla; 2000.

[III.28] Silva P.F., Belaebi A., Li T., In-plane performance assessment of URM walls retrofittedwith FRP. Masonry Soc J;24(1) p. 57–68, 2006.

[III.29] Turco V., Secondin S., Morbin A., Valluzzi M.R., Modena C., Flexural and shear strengthening of un-reinforcedmasonrywith FRP bars, Composites Science and Technology, 66 p. 289–296, 2006.

[III.30] Konthesingha K.M.C., Masia M.J., Petersen R.B., Mojsilovic N., Simundic G., Page A.W., Staticcyclicin-planeshearresponse of damagedmasonrywallsretrofittedwith NSM FRP strips – An experimentalevaluation, Engineering Structures, 50, p. 126–136, 2013.

[III.31] Li T., Galati N., Tumialan G., Nanni A., FRP strengthening of URM wallswith openings – experimentalresults. Masonry Soc J;23(1):47–57, 2005.

[III.32] Brandt A.M., Fibre reinforcedcement-based (FRC) composites after over 40 years ofdéveloppent in building and civil engineering, Composite Structures, 86 p.3–9, 2008.

[III.33] Mechtcherine V., Novelcement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures. Construction and Building Materials, 41 p.365–373, 2013.

[III.34] Barhum R., Mechtcherine V., Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforcedconcreteundertensileloading, Engineering FractureMechanics, 92 p.56–71, 2012.

[III.35] Guide for the design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, CNR-AdvisoryCommittee on Technical Recommendations for Construction, Rome-CNR July 13th, 2004.

[III.36] Ortlepp R., Lorenz A., Curbach M., Column Strengthening withTRC: Influences of the ColumnGeometry onto the Confinement Effect, Advances in Materials Scienceand Engineering, Article ID 493097, 5 pages, 2009.

[III.37] Schladitz F., Curbach M., Torsion tests on textile-reinforcedconcretestrengthenedSpecimens, Materials and Structures, 45: p.31–40, 2012.

[III.38] Brückner A., Ortlepp R., Curbach M., Textile reinforcedconcrete for strengthening inbending and Shear, Materials and Structures, 39:p. 741–748, 2006.

[III.39] Papanicolaou C., Triantafillou T., Lekka M., Externally bonded grids as strengtheningand seismicretrofittingmaterials of masonry panels, Construction and BuildingMaterials, 25 p.504–514, 2011.

[III.40] Parisi F., Iovinella I., Balsamo A., Augenti N., Prota A., In-planebehaviour of tuffmasonrystrengthenedwithinorganic matrix–grid composites, Composites 45 p.1657–1666, 2013.

[III.41] Kashyap J., Willis C.R., Griffith M.C., Ingham J.M., Masia M.J., Debondingresistance of FRP-to-clay brick masonry joints Engineering Structures 41 p.186–198,2012.

Introduction

Chaque pays est caractérisé par son patrimoine culturel, reflet de son évolution historique, artistique, économique et sociale. Chaque civilisation a forgé son patrimoine et c'est celui-là même qui constitue aujourd'hui l'identité de ces civilisations. Les monuments historiques sont le témoignage des civilisations, ils marquent l'histoire de leur culture, leurs pratiques, et de leur art de bâtir. L'un des monuments les plus importants en Algérie c'est la mosquée de Sidi Ghanem. Cette grande mosquée du vieux Mila pose un véritable problème, nous ne connaissons pas sa forme originelle et nous ne savons pas comment elle a évolué dans le temps. Ajouté à cela la dégradation de ce monument à cause d'une accélération potentielle de son altération du fait de l'influence des conditions environnementales. Ce chapitre nous amènera à traiter des données existantes sur la question de la réutilisation de ce monument historique, son analyse en termes de son architecture, la technique de sa construction et l'ornementation de ses murs qui portent l'empreinte de plusieurs époques. Ainsi de proposer des techniques de réhabilitation / et ou renforcement de ce monument.

IV.1 Aperçu historique

Mila était celle qui a connu le développement le plus considérable. Des civilisations se sont succédées dans cette ville lui donnant un aspect cosmopolite Des spiritualités se sont aussi succédées. Carrefour de plusieurs civilisations, elle prit plusieurs noms durant son histoire. Les écrits retiennent parmi d'autres ceux de Milev, Mulium, Médius, Miloufitana, Miloufyoum, Milah ou Mila. Avant l'ère romaine, on l'appelait Melou, du nom de la reine berbère qui y régnait et dont la statue trône au milieu de la citadelle devenue caserne. D'autres pensent que la statue représente le dieu romain Jupiter. En 47 av Jésus-Christ, César débarqua en Afrique et avec l'aide des rois de Maurétanie, Bogud ,Bocchus et de Sittius il battit les Pompéiens à Thapsus. Ceci fait, il réorganisa l'Afrique et supprima les royaumes de Massinissa et de Juba qui avaient pris partie pour les Pompéiens. De la partie orientale de la Numidie, il fit une province nouvelle (L'Africa Nova). A cette époque, un grand Etat comprenant la partie orientale du royaume de Massinissa et la partie occidentale de celui de Juba. Les quatre colonies Ciertiennes ou s'installèrent les Sittiens: Cirta (Constantine) Rusicade (Skikda) Chullu (Collo) et Milev (Mila), formaient une confédération ayant un corps de magistrats, et étaient administrés par des triumvirs annuels résidant à Cirta[IV.1].

En 260, les tribus voisines dévastèrent les campagnes de Milev et détruisirent même la ville au début du VIe siècle.-elles furent ensuite battues par le légat propréteur C. Macrinus Decimus. En 539, Solomon, préfet byzantin du prétoire et général de l'empereur Justinien, utilisa les débris de la ville pour la construction d'une forteresse et d'un mur d'enceinte capable de résister aux attaques des tribus.- cet ouvrage assez bien conservé est la principale curiosité du vieux Mila, souvent qualifiée par les érudits de musée à ciel ouvert, la vieille ville de Mila renferme dans son sous-sol bien plus de vestiges archéologiques que tout ce qui est aujourd'hui visible et connu sur sa surface. Les plus anciennes inscriptions disponibles indiquent que Mila remonte à l'antéchrist et qu'elle a pris, à chaque époque, des noms différents comme Milev, Milium, Midius ou encore Milo. Ce dernier nom est celui que portait la ville à l'époque numide, à en croire des historiens qui ont étudié des inscriptions portées sur une statue découverte en 1880 par un officier français et qui serait la plus ancienne pièce archéologique de la ville encore disponible. Cette statue trône aussi au milieu du musée à ciel ouvert. La statue de l'enfant enlaçant un veau qui se trouve actuellement dans le jardin public du centre-ville, remonterait, pour sa part, à l'époque Vandale qui a duré près d'un siècle (450-539). De l'époque byzantine, Mila conserve surtout des pans du mur d'enceinte qui la ceinturait sur une longueur de 1200 mètres. Piqué d'une multitude d'étranges fenêtres larges à l'extérieur et étroites de l'intérieur, visibles à ce jour, et doté de 14 tours de surveillance pouvant atteindre 12 mètres de hauteur [IV.1].

La médina de Mila qui s'étend sur une superficie de plus de 7 hectares a aussi sa Casbah, vestige de l'époque Ottomane. Au cours de cette période, de profondes modifications dans le système administratif se sont produites après qu'Alger eut déclaré son allégeance au khalifat ottoman en 1516. La province Est, notamment Mila, a connu pendant cette période une récession et surtout quelques soulèvements populaires dus au système d'imposition trop lourd. D'ailleurs, on rapporte que plusieurs beys furent tués lors de batailles avec les Berbères de la région. Mila a été conquis par l'armée coloniale française à sa tête le général Challe en 1837. Depuis cette date, les soulèvements populaires n'ont eu de cesse, d'être violemment réprimés, contraignant une partie de la population à l'exil vers le Moyen-Orient. Au début du XXe siècle, la ville comptait 8 000 habitants, dont 400 Européens. Les Français avaient construit une nouvelle ville, environ 2 km à l'ouest du vieux Mila. Des bâtisses de style colonial forment un carré2. En 1958 Mila, comptait 15 020 habitants. Durant la Guerre d'Algérie, la région de l'est entourant Mila, Jijel, Collo et Constantine était le théâtre de très nombreuses

batailles et actions contre l'Armée française. Parmi les dirigeants de la révolution algérienne, plusieurs étaient originaires de Mila et sa région, comme Abdelhafid Boussouf et Lakhdar Bentobal[IV.2].

IV.2 situation de la ville de Mila

La wilaya de Mila est située dans le Nord- Est Algérien à 464m d'altitude, et à 33 km de la mer Méditerranée. La Wilaya de Mila est issue du découpage administratif de 1984.Elle est composée de32 communes et 13 Daïras. Elle s'étend sur une superficie de3480, 45km² soit 0,14% de la superficie totale du pays. Les wilayas limitrophes de Mila sont:

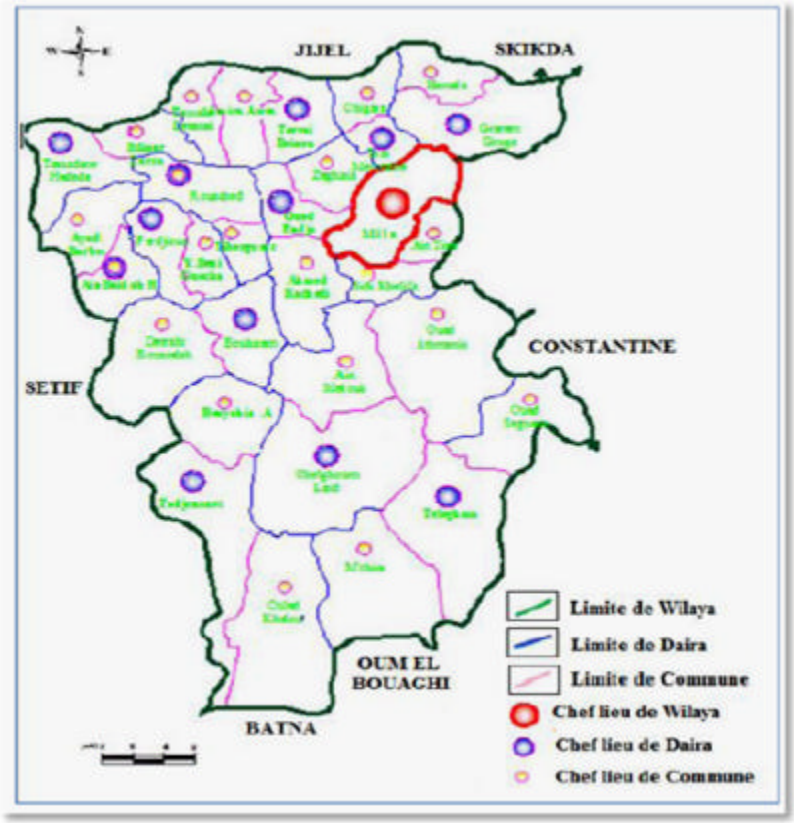
- Au Nord, par la wilaya de Jijel.
- Au Nord-est, par la wilaya de Skikda.
- A l'Est, par la wilaya de Constantine.
- Au Sud-est, par la wilaya d'Oum El Bouaghi.
- Au Sud, par la wilaya de Batna.
- A l'Ouest, par la wilaya de Sétif.

Sa position stratégique lui confère une proximité des aéroports de Constantine, Jijel, Sétif et Batna et de ports de Jijel et Skikda et des gares ferroviaires de Constantine et Skikda. Ces voies de communication constituent un avantage important car elles facilitent l'accès à Mila même à partir de l'étranger (Plan promotionnel touristique de la wilaya de Mila, 2008)

La commune de Mila est située à l'Est de la wilaya, et limitée :

- Au Nord par les communes de Grarem et sidi Merouane
- Au Sud, par, les communes de sidi khelifa .
- A l'Est, par les communes d'Ain Tinn.
- A l'Ouest par les communes de Zeghaia, Ahmed Rachedi et Oued Endja

Carte N° 01 : La situation géographique de la wilaya de Mila[IV.2]



Carte N° 02 : La situation administrative du chef-lieu de la wilaya de Mila [IV.2].

IV.3 Caractéristiques de la vieille ville de Mila

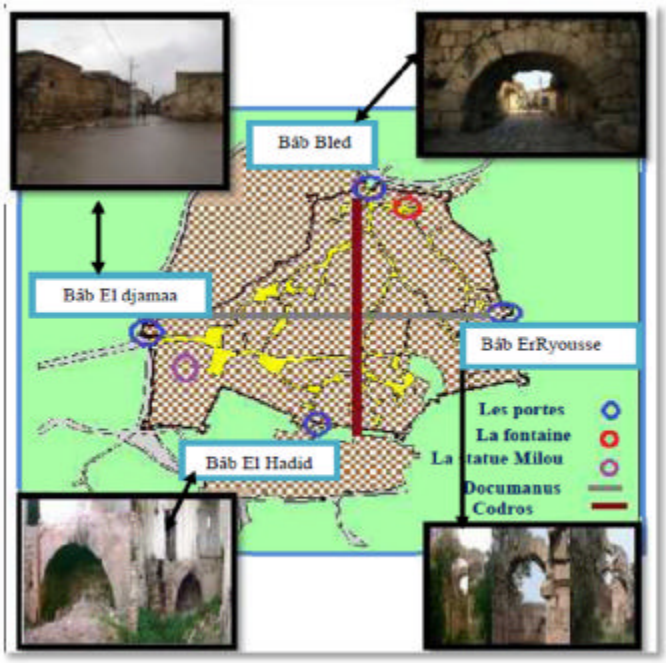
- **Situation du vieux Mila**

Le vieux Mila est un musée à ciel ouvert, il est entouré des jardins et des verdures, ses habitations antiques, ses ruelles marchandes qui font de lui une des plus anciennes cités de l'Est Algérien. Construit sur une aire de sept hectares, il est entouré d'une muraille de quatorze tours(voir la carte 3). Actuellement il constitue une valeur archéologique, d'une richesse inestimable, et représente un patrimoine. Il compte 4 portes (voir la carte 4) [IV.3].

- Bâb Bled (Au nord de la médina, était le point générateur de la cité traditionnelle, où se trouve l'activité commerciale).
- Bâb Er Ryousse (Située à l'est de la médina. Elle était utilisée par les gouverneurs seulement)
- Bâb El Hadid(Au Sud de la médina, elle surmontée d'une arcade. Cette porte a été découverte après la démolition de la maison).
- Bâb El Djamaa (C'est une entrée à l'ouest de la ville, elle relie Mila à la route de l'antique "Sitiffis -Milev ", et elle est un chemin vers la ville coloniale)

.

Carte N° 03 : La situation administrative du chef-lieu de la wilaya de Mila[IV.3]

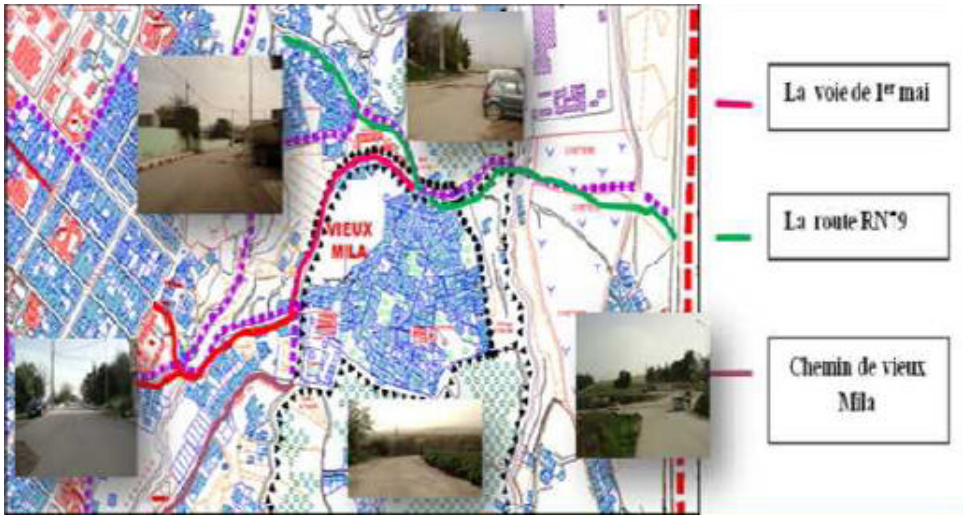


Carte N° 04: Les quatre portes de la veille Ville de Mila [IV.4].

- **L'Accessibilité du vieux Mila**

L'un des atouts du site est, incontestablement, sa très bonne couverture par le réseau routier et donc parfaitement accessible. Il est doté par :

- Une voie de communication de dimension nationale, la route RN79.
- La voie de 1erMai qui relie directement le Vieux Mila à la ville coloniale.
- La voie du Chemin du Vieux Mila qui relie cette dernière au faubourg de Sennoï.
- La voie qui mène à la cité de Sidi Seghir. Actuellement une nouvelle voie est passe Sur oued El Mkharo



Carte N° 05L'Accessibilité du vieux Mila, Direction de la culture de la wilaya de Mila [IV.4]

- **Les monuments les plus importants dans la vielle ville de Mila**

1- **La fontaine romaine:(Ain el bled) :** La rue est affermée par la fontaine romaine qui constitue l'essentiel du mobilier urbain du vieux Mila. Cette fontaine est considérée comme le monument le plus ancien de la cité ; parmi les rares ayant gardé jusqu'à nos jours les conduites d'origines au-dessous du niveau de la ville a environ (moins de 7m).

2- **La Statue de Milou :** Statue Milou découverte en 1880 par un lieutenant français pendant les fouilles des années 1879-1880 au vieux Mila. Se trouve actuellement à la caserne du vieux Mila .C'est une grande statue en marbre représentant une femme assise.

3- **Les mosquées :**le vieux Mila recèle un riche patrimoine culturel présenté par les quatre mosquées, sont localisées prés de chaque porte

- Mosquée Sidi Ghenem près de Bâb El Djamaa.
- Mosquée Abou Mouhajer près de Bâb Bled.
- Mosquée Sidi Azouz prés Bâb Er Ryousse
- Mosquée Al Rahmania prés de Bâb El Hadid

IV.4 Présentation de la mosquée de Sidi Ghanem- Cas d'étude

La mosquée de Sidi Ghanem est l'une de plus vieille mosquée en Algérie, son emplacement a été révélé par les fouilles archéologiques faites en 1969-1970 sur une ancienne basilique romaine qu'a été reconstituée par l'armé français. Elle fut construite, vers l'an 57 de l'hégire, par le conquérant musulman Abou Mouhajir Dinar. Elle referme le témoignage de plusieurs époques de la vie de la veille ville de Mila. Ce lieu de culte qu'on appelle aujourd'hui, mosquée de Sidi Ghanem, est en effet le second édifice religieux de l'Islam, construit au Maghreb, après celui de Kairouan en Tunisie.

Au regard de leur importance historique et culturelle, elle mérite plus d'efforts pour leur préservation et protection. La mosquée se situe aujourd'hui dans le secteur sauvegardé du Vieux Mila, à la citadelle ou il est installé depuis octobre 2006, l'antenne de l'OGEBC. Ce lieu est connu aujourd'hui sous le nom de la caserne. La mosquée donne sur une cour à l'intérieur de la citadelle, et à l'extérieur donne sur les maisons des habitants de la vieille ville. Ces maisons sont de nature différente : des maisons traditionnelles ou nouvelles.

Carte N°06 : La situation de la Mosquée de sidi Ghanem par rapport à la veille ville de Mila[IV.3].

IV.4.1 Réutilisation de la mosquée de Sidi Ghanem

Cette mosquée est considérée comme étant la plus ancienne mosquée d'Algérie elle pose un véritable problème de datation et de chronologie, nous ne connaissons pas sa forme originelle et nous ne savons pas comment elle a évolué dans le temps. Les investigations documentaires et de terrain révèlent la grande difficulté de ses questions à résoudre, et ce pour les raisons suivants : elle a été considérablement transformée par des extensions, des travaux de réfection et des remaniements correspondant à des changements d'usage, qui lui ont fait perdre beaucoup de sa physionomie originelle.

- **L'époque arabe :**

Construite par les Arabes au cœur de l'antique Milev, la mosquée de Sidi Ghanem est datée de l'an 57 de l'hégire c'est à dire quelques temps à peine après l'entrée de l'islam en Afrique du Nord. C'est la plus ancienne mosquée d'Algérie et la deuxième construite au Maghreb après

celle de Kairouan. Elle est l'œuvre d'Abou Mouhajir Dinar, compagnon de Sidi Okba qui s'est arrêté dans les environs de Biskra. C'est lui qui fit entrer, en 673 de J.-C. (55 Hg), la nouvelle religion à la ville de Mila qui était à l'époque fortement christianisée. Elle fut établie à proximité d'une basilique byzantine, et comporte de nombreux matériaux antiques (chapiteaux ornementaux, colonnes et cetera). Elle est également plutôt orientée vers le Sud, fait singulier au Maghreb et qui évoque les premières mosquées du Machrek

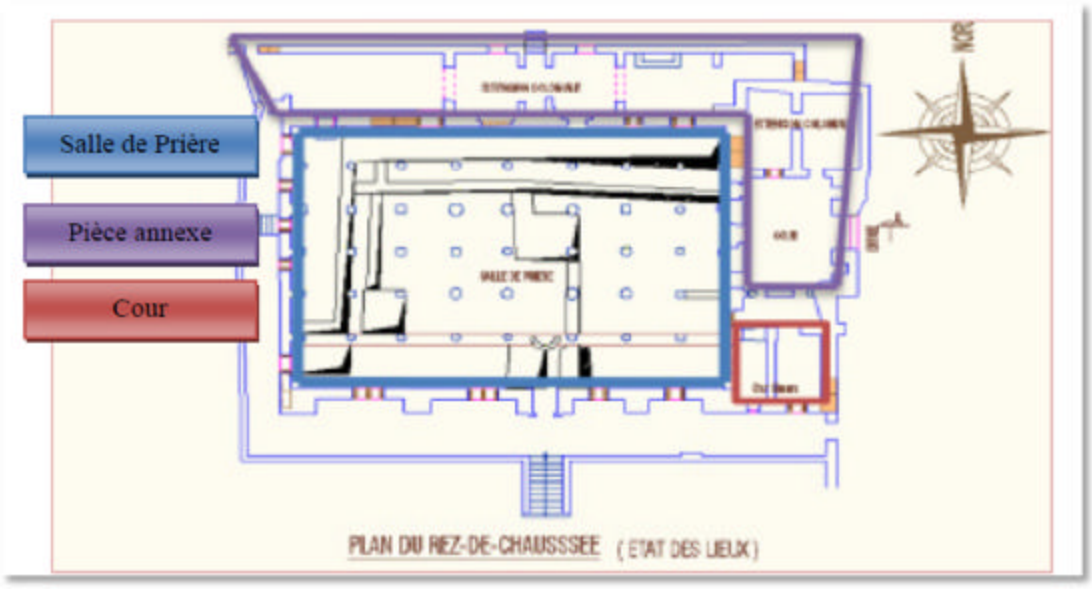


Fig. IV 1 : Plan du RDC de l'époque avant 1830 (OGEBC, Mila)[IV.5].

- **Période Coloniale**

Dans cette période, la mosquée avait perdu sa valeur sociale et civilisation. Elle n'était plus un noyau pour la planification urbaine, ni un centre de savoir, d'enseignement et de culture pour la société. La forme architecturale de la mosquée a subi des transformations qui l'ont dénaturée, rajout d'éléments, et même suppression d'autres. Par exemple :

- La salle de prière est aménagée sur deux niveaux : R.D.C est consacré pour la caserne et le magasin, l'étage pour un hôpital de 40 malades
- La partie qui se trouve à droite de la salle de prière est transformée en des bureaux et chambres avec une extension en hauteur.
- Construction d'une manutention, pavillons pour le logement de la troupe et les officiers.

- Le colonialisme avait opté pour dénuer la mosquée, de ses rôles de gestion. Il y a eu des réquisitions de la part du colonialisme, pour les transformer par la suite en cathédrales ou autres équipements : hôpitaux, …etc.

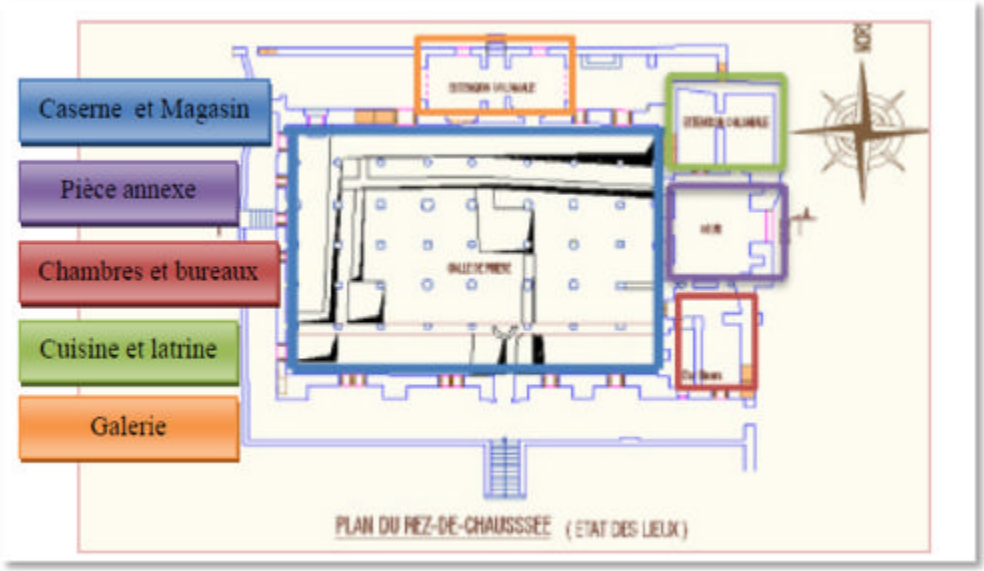


Fig. IV.2 : Plan du RDC de l'époque d'avant 1837-1962 (OGEBC , Mila)[IV.5].

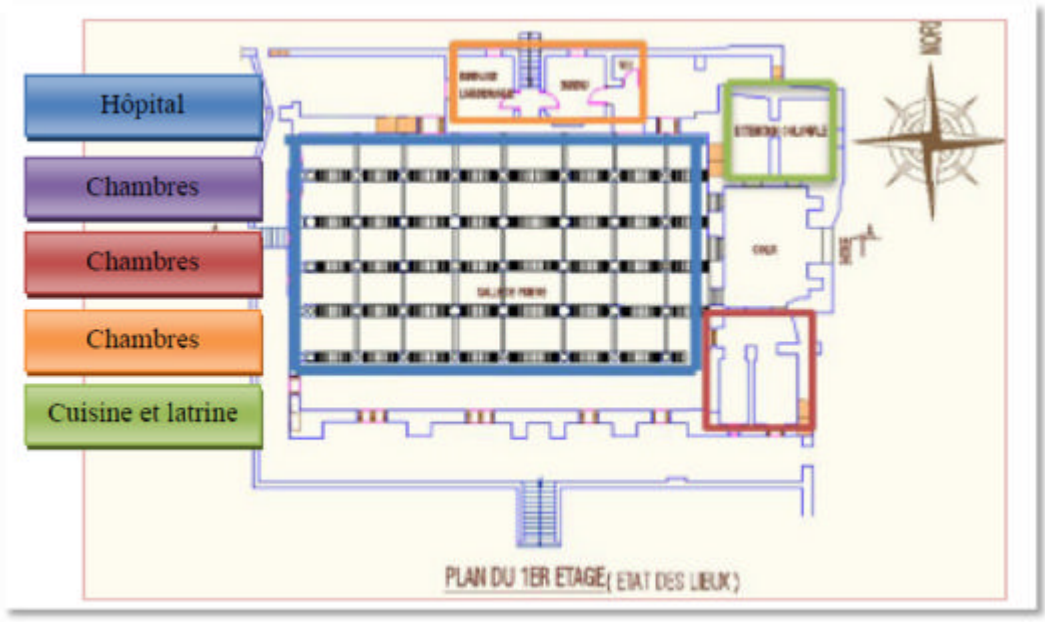


Fig. IV 3 : Plan du 1er étage -1837-1962- (OGEBC , Mila)[IV.5].

- **Époque après l'indépendance**

Après l'indépendance la mosquée n'avait pas repris ses fonctions d'origine, elle est complètement défigurée grâce aux nombre des modifications françaises, ainsi une partie de la mosquée était occupée pendant des années par une famille de Mila. L'abandon total de l'édifice, abandon qui a eu pour conséquences le pillage, l'infiltration des eaux pluviales et bien d'autres dégradations, ce monument fait l'objet de plusieurs travaux et études de restauration (Fig.6 et7) :

- En 1968: Réalisation des fouilles archéologiques par Rachid Doukali sous le sol de la salle de prière de la mosquée Sidi Ghanem pour découvrir des traces de son passé et rechercher ses fondations pour mieux connaitre le monument. Ils ont découvert des structures inférieures : deux sépultures, des murs antiques (romain et byzantin), deux niches pour le Mihrab, pavage d'une route romaine.
- En 1996 : Réalisation d'autres fouilles archéologiques.
- En 2001: projet de restauration de la mosquée par BET GASSMI .
- En 2005-2007: Le BET (Laaraba et Bouhouho) qui a eu la soumission après le lancement de l'appel d'offre par la direction de la culture a fait une étude de restauration de la mosquée.
- En Septembre 2011: commencement des travaux d'urgence en attendant la finalisation de l'étude du plan permanent du sauvegarde et de Mise en valeur pour effectuer l'étape du restauration.

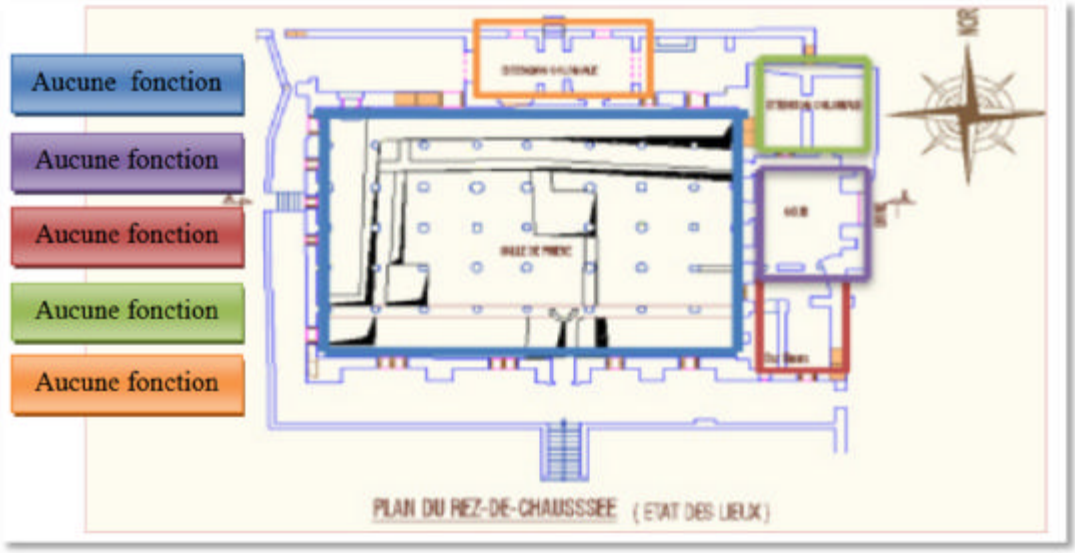


Fig. IV.4 : Plan du RDC actuellement (OGEBC, Mila)[IV.5].

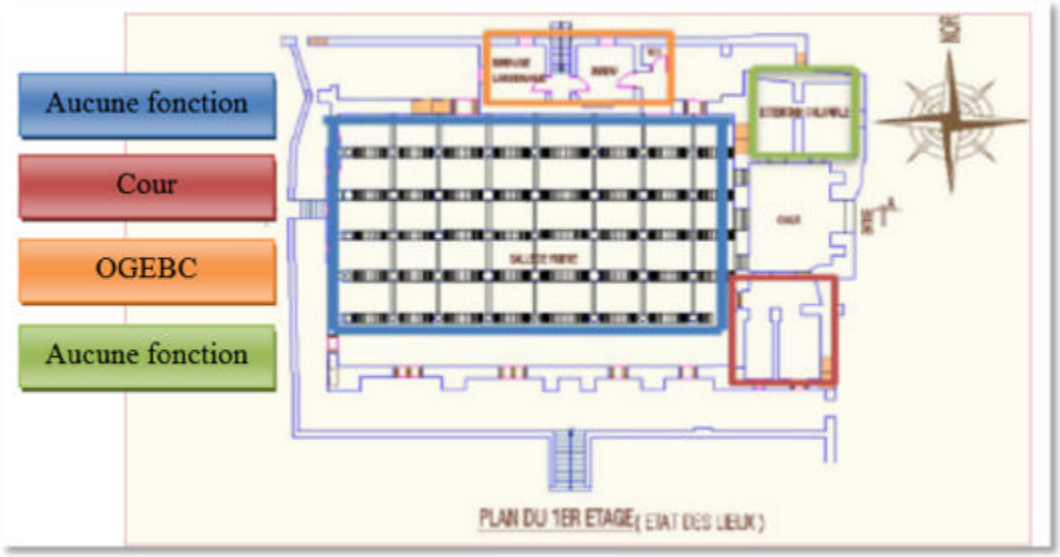


Fig. IV.5 : Plan du 1er étage actuellement (OGEBC, Mila)[IV.5].

IV.4.2 Architecture et motifs ornementaux

L'histoire de cette mosquée se précise mieux dans son architecture, la technique de sa construction et l'ornementation de ses murs qui portent l'empreinte de plusieurs époques.

D'abord l'époque précoloniale à laquelle nous attribuons les murs en opus *mixtum* (appareil mélangé)alternant une assise de moellons et deux assises de briques, les murs en brique de terre crue employée pour rehausser le niveau de la toiture(voir la figure IV.1), le chaînage en rondins le mortier de terre stabilisé à la chaux et au sable la nature des réfections des murs de façades, et la maçonnerie de l'extrados des arcs. Cette mosquée est très similaire à la mosquée de Sidi Ali El-Kabîr à Collo, construite en 1756[IV.6][IV.7],qui lui ressemble dans beaucoup d'aspects, à savoir : le matériau de réemploi, la technique de construction et de réfection des murs, l'absence de la coupole, la forme de la charpente de couvrement et la présence de sépultures à l'intérieur de la salle de prière.

L'époque pré-ottomane semble être marquée par l'opus des murs qui n'ont pas, paraît-il, subi beaucoup de changements, comme le mur de la cour (sans les contreforts) et le mur ouest de la salle de prière qui lui est identique : il s'agit d'un *opus mixtum* constitué d'*opus incertum* à arases de briques. Seulement, cette technique de construction des murs est très ancienne et elle s'est perpétuée à travers les âges. Les constructeurs romains l'ont pratiqué dès le Ie siècle et elle est largement diffusée dans le monde musulman méditerranéen pendant presque tout le moyen Âge.

Le réemploi des matériaux empruntés à des monuments anciens, largement utilisé les murs et les appuis des arcs, est un procédé connu également depuis la plus haute antiquité. Il a été employé pour la construction des plus vieilles mosquées d'Ifriqiya et de l'Andalousie, dont celles de Constantine (1135/530H), de Bonne (1033/425H) et d'Almonaster, la Réal en Espagne (datée du Xe siècle), en constituent un exemple parfait. Les défauts de construction et l'usage de matériaux hétéroclites sont autant d'aspects de cette pratique qui caractérisent non seulement cette mosquée de Mila mais aussi la plupart des mosquées les plus anciennes, comme celles que nous venons de citer.

Les éléments intermédiaires utilisés pour rehausser les arcs de la salle de prière, décelés par R. Doukali[IV.8] qui les a identifiés à des parallélépipèdes relèvent d'une pratique du IXe siècle, qui est appliquée dans ces mosquées que nous venons d'évoquer.
Pour ce qui est de l'ornementation des murs de la salle de prière, le décor floral réalisé sur plâtre, dont les fragments ont été découverts à côté du mihrab et à proximité du mur de la façade Est.

La forme des arcs (voir la figure IV.2), les colonnes (voir la figure IV.3), qui n'ont pas de base, les chapiteaux remplacés par des bases de colonnes ou des pillettes, l'orientation sud et sud-ouest du mihrab, sont autant d'élément qui caractérisent les mosquées du Haut-Moyen Âge, notamment celles construites aux alentours de cette même période du IXe siècle.
Le minaret, tel qu'il apparaît sur les dessins du XIXe siècle (voir la figure IV.4), sans le lanternon et les arcs du niveau supérieur, rappelle celui des premières mosquées Zayyânides d'Agadir et de Tlemcen, qui remontent au temps de Yaghmurâsan, fondateur de la dynastie (1235/633H-1283/681H), même si certains de ces dessins sont jugés inexacts par St. Gsell (Fig. 4). La forme hexagonale du lanternon, avec sa coupole conique, et le type d'arc en anse de panier outrepassée du deuxième étage, sont une marque de l'architecture ottomane.

Quant au style coufique quadrangulaire de l'inscription (Avec la bénédiction de Muhammed) du mur de la cour, il est connu sous le nom de Style bannâi (le style bannâi est un style non ornementé et géométrique issu du style coufique, qui a été créé sur la base de carreaux. La base de ce style consiste ainsi en des lignes verticales et horizontales d'une épaisseur unique qui se croisent de façon à ce que les lignes du motif calligraphique occupent l'ensemble de la

surface lui étant allouée)[IV.9], (voir la figure IV.5 (a)). Ce style a été utilisé et diffusé dans le monde musulman par les seldjoukides (XIe-XIIIe siècle) pour décorer les bâtiments, et en particulier les mosquées. A Constantine, il est appliqué dans la grande mosquée, qui est datée par R. Bourouiba de l'époque Hammadides (1135). Nous le relevons également dans le minaret de la mosquée mérinide de Sidi Abû Medyyan à Tlemcen, bâtie par Abû-el-Hasan en 1338/739H. Par rapport à ces écritures, celle de Mila présente des dissemblances au niveau des caractères et de la ponctuation.

Les lettres Bā et Tāmarbûta ne sont pas ponctuées et les lettres Dāl et Kāf ressemblent beaucoup à l'alphabet coufique Hammadide des inscriptions relevées dans la grande mosquée de Constantine. Les points diacritiques sous la lettre Bā et sur la lettre Tāmarbuta ont été supprimés pour des raisons d'esthétique, car la surface réservée à celle-ci, qui est limitée horizontalement par l'ouverture de l'arc, ne permet pas de les rajouter. Il est à noter que le thème de la baraka (la bénédiction) exprimé dans l'épigraphie décorative des mosquées, est une caractéristique de l'art des Almoravides. Il est repris dans la Quba de Sayyidi Ibrahim à Tlemcen, qui est du XIVe siècle. C'est aussi une particularité du langage soufi.

Le décor géométrique formé de lignes brisées à angle droit du panneau inférieur se rencontre dans la mosquée de Kairouan où il couvre les voûtes d'arêtes du narthex (voir la figure IV.5 (b)).Cette galerie-narthex a été datée par L. Golvin de l'époque des Zirides (972-1148) ou des Hafsides (1229-1574). Le motif qui surmonte cette inscription est du même type que celui relevé dans le mihrab de la mosquée Zayyanide de Sayyidi Abû-el-Hasan à Tlemcen, fondée sous le règne d'Abu Sa`id`Uthman en 1296[IV.10]

Le décor végétal de la frise peinte en rouge turc et la peinture bleu ciel appliquée sur le pilier latéral ouest de la deuxième arcade, paraissent être de l'époque ottomane (voir la figure IV.6).Ce décor est d'une belle exécution et se distingue par la finesse, la simplicité et le caractère moderne du style de représentation du seul motif de ce décor, celui des feuilles à une tige. Cette même couleur rouge turc est relevée sur les surfaces des piliers et des colonnes des arcs. La peinture verte conservée sur un fût d'une colonne appuyée sur le mur de la façade ouest, est aussi une particularité de nos mosquées ottomanes. Quant au vernis marron qui couvre quelques colonnes, nous présumons qu'il est récent. L'épigraphie coufique réalisée sur plâtre, découverte pendant les fouilles de 1969 dans la partie ouest du mihrab, à côté du mur

de pierre à bossage, où elle était mêlée à des éléments de décor réalisés également sur plâtre, est supposée par P. L. Combuzat être du Xe siècle

Fig .IV.6 : Murs en brique de terre crue employée pour rehausser le niveau de la toiture

Fig .IV.7 : Vu sur les arcs

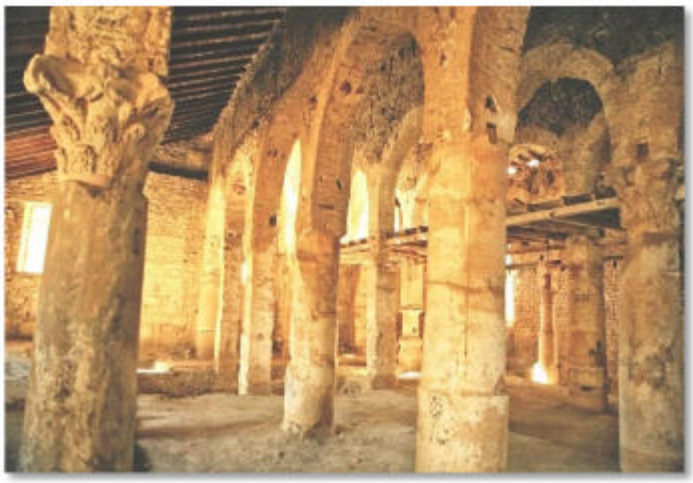


Fig .IV.8 : Vu sur les colonnes

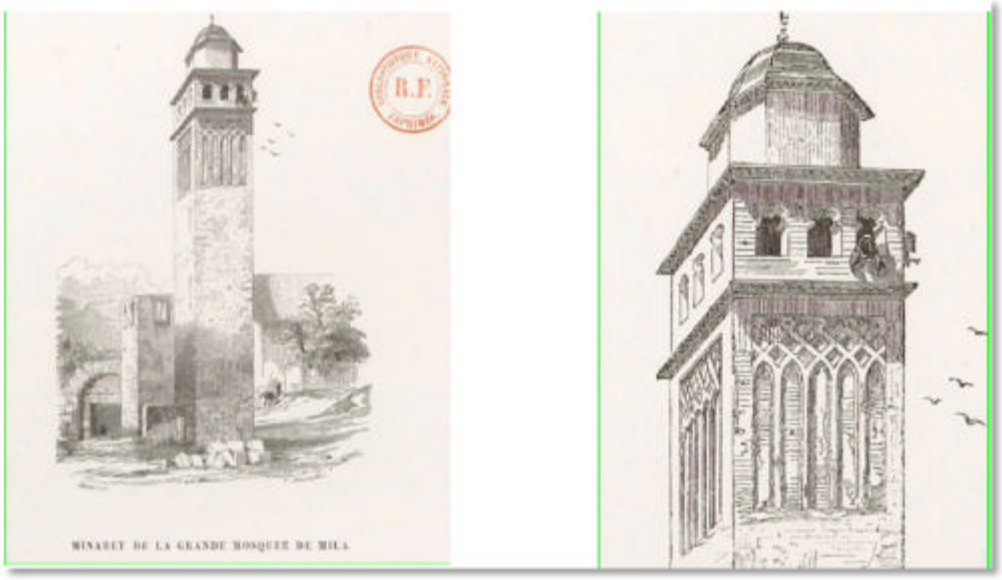


Fig .IV.9 : Le minaret de la mosquée d'après Ravoisié 1846[IV.7]

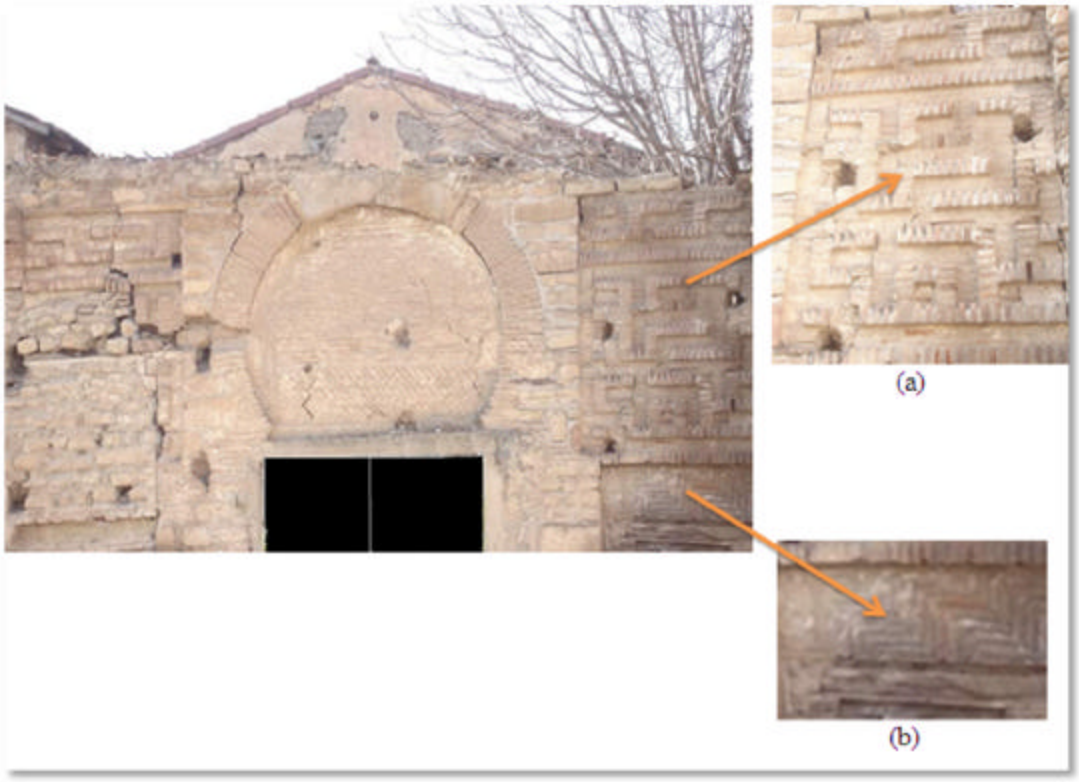


Fig .IV.10 : Décor de façade du mur de la cour

Fig .IV.11 : Décor des murs de la salle de prière

IV.5. Dégradation de la mosquée

Au cours de ces dernières années, ce monument a subi un processus de dégradation important du fait de différentes actions menées sur cet édifice.

- Absence du minaret qui est l'un des éléments architecturaux composants des différentes mosquées.
- Crépissage de ciment affectant la performance du monument.
- Érosion des parties exposées aux intempéries.
- Problèmes structurels soit la structure verticale (présence des fissures de différentes sens au niveau des colonnes, piliers et murs) soit la structure horizontale voir la dégradation de la charpente et du plancher en bois, présence des fissures sur les murs surmontant les arcs
- Présence d'humidité.
- Vieillissement accéléré.
- Dépôt d'ordures.
- Un état décevant d'un monument emblématique de l'ancienne ville de Mila qui présente plusieurs valeurs pour la société milevienne et algérienne.

IV.6. L'intervention dans la structure pour le renforcer :

IV.6.1. Intervention sur les voutes

Il existe plusieurs techniques de réparations des voutes. Chaque technique est tributaire des pathologies constatées et des moyens d'exécution de sa mise en œuvre. Dans notre cas, nous jugeons que l'intervention nécessite des cintres d'étayement épousant la forme des voutes, ils doivent être espacés de manière à résister aux différents charges lors des travaux de réfections. Au vu de la largeur de l'épaisseur du joint (liant) entre les pierres constituant les voutes, la projection d'une contre-voute au moyens d'un béton projeté suffisamment ferraillé sur leur surface ainsi que ceux des murs, peut être adoptée. Cette solution sera associée avec les cintres d'étayement déjà prévue. En complément de ces travaux, il y a lieu de prévoir des tirants au niveau des planchers pour absorber les effets de traction, dû à des compressions par effets de voûtes. Cette technique permis de doter les voute d'une meilleure capacité de résistance.

Fig .IV.12:vue sur les voutes. Source : auteur

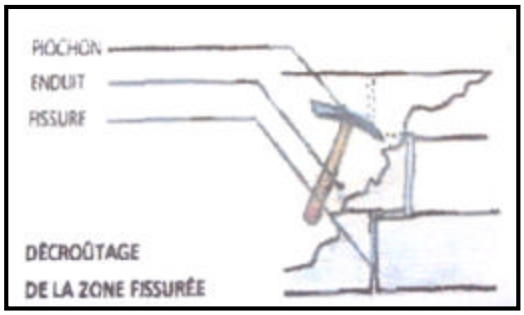
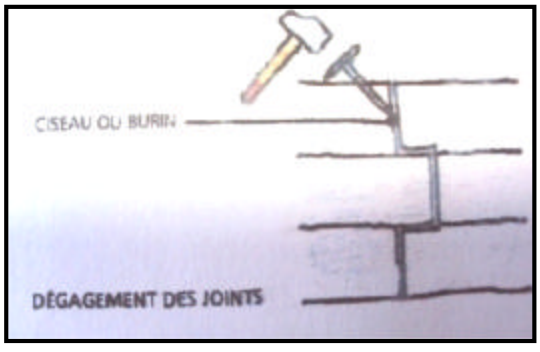
IV.6.2. Intervention sur les murs porteurs

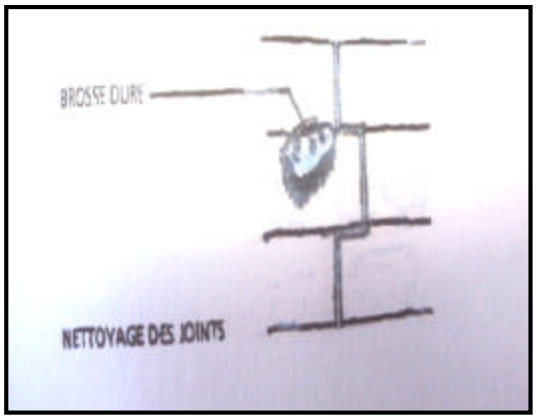
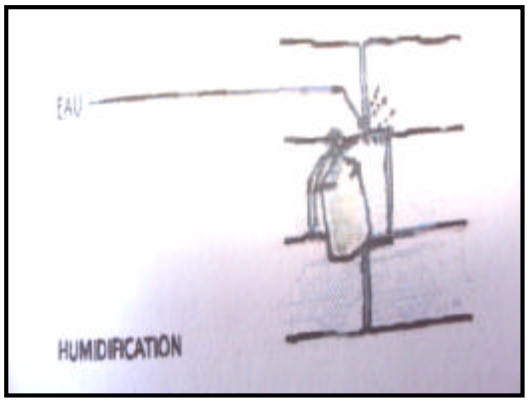
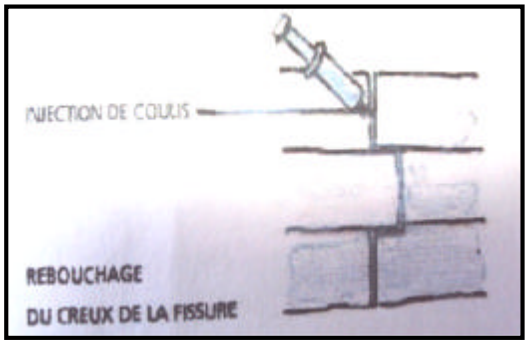
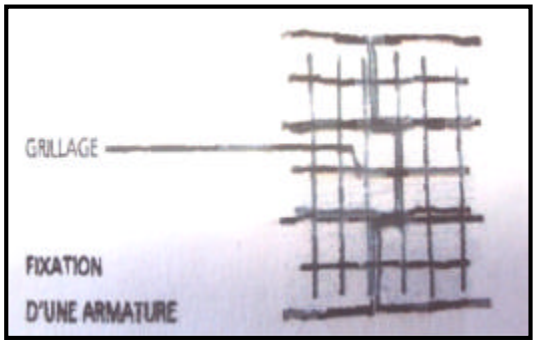
Les blocs dont leurs murs porteurs présentent des dégradations moins importantes, il y a lieu d'envisager la mise en place d'un béton projeté qui se fera par zones successives, après l'opération de dégarnissage et de nettoyage, de façon à résister à la fragilisation provisoire des murs. Les murs qui présentent des dégradations au niveau des crépissages (revêtement de mur), la reprise de ce dernier est effectuée à l'aide des mortiers à base de produits d'accrochage et selon une composition bien étudiée, assurera leur protection. Il reste entendu que l'élimination des végétations se trouvant sur ces murs, et le traitement des fissures sont à préconiser pour avoir une adhérence minimale. Toutefois, cette opération devra être précédée par le traitement des fissures qui ne sont pas évolutives, ces fissures selon leur largeur

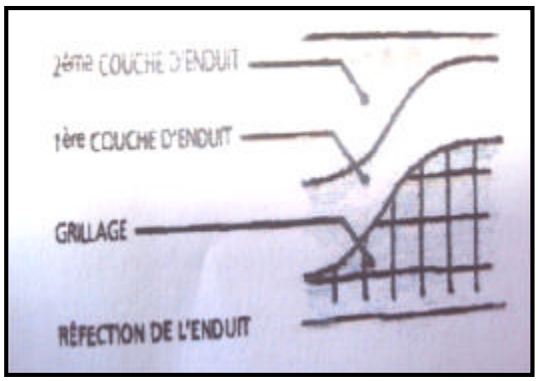
d'ouverture peuvent être simplement rebouchées avec un mortier à prise lente et sans retrait (chaux aérienne et sable tamise) ou renforcées si la largeur d'ouverture dépasse 10mm :

Fig .IV.13 : les murs porteurs en pierre taillé. Source: auteur

- Si la largeur de la fissure < 10mm, le processus de traitement est comme suit :

Décrouter les couches d'enduits autour de la zone fissurée a l'aide d'un piochon ou en utilisant un ciseau et un marteau. Prendre soin d'enlever les parties décollées et de dégager une surface minimale pour réfection de l'enduit	
Dégager les joints en mortier le long de la zone fissurée. Utiliser avec soin un ciseau ou un burin avec un marteau. le joint obtenu doit avoir une profondeur suffisante (jusqu'au fond du parement) pour assurer la consolidation et la bonne tenue du nouveau mortier de joint	

Nettoyer et dépoussiérer les joints (par exemple avec une brosse dure).	
Humidifier les joints avec de l'eau jusqu'à saturation, pour une meilleure prise du mortier.	
Préparer un mortier de chaux blanche (dose entre 1volume de liant pour 2 a 3 volumes de sable) pour reboucher le creux de la fissure jusqu'au du parement, en laissant éventuellement des accès pour l'injection de coulis.	
Fixer éventuellement sur la surface a renduire une armature de type grillage galvanise ou grillage de fibres synthétiques, avec un maillage supérieur a 2 cm (un maillage large permet a l'enduit d'adhérer correctement au support).	

Préparer et appliquer un enduit de chaux	

- Si la largeur de la fissure ≥ 10mm :

- Ancrer des épingles en fer doux (diamètre 10mm ou fer plat) dans des joints verticaux préalablement affouillés à cœur ; débarrasser les parements correspondants des traces de chaux,
- Placer les épingles au rythme d'une par assise et leurs ancrages sont décalés au moins d'une pierre par lit. Dégarnir soigneusement les joints autour des ancrages.
- Sceller les épingles au mortier de ciment, le corps des épingles à 1 ou 2 cm du parement.
- le Fouetter les épingles et la partie préparée du mur avec un enduit de ciment dosé à 350kg/m3 (mouiller le mur préalablement)

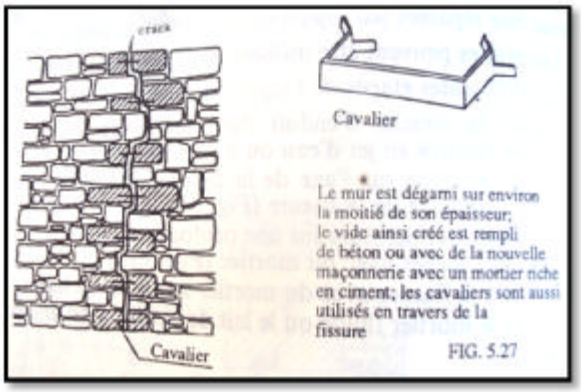


Fig .IV.14: traitement des murs porteurs.

- Procéder au décapage des enduits friables sur toute la surface.
- Dégarnissage du mortier des joints entre les pièces constituant les murs porteurs.
- Nettoyage des surfaces à la brosse métallique

- Reprendre les liants détériorés moyennant des mortiers à base de produits d'accrochage et selon une composition bien étudiée.
- Reprendre les enduits dégradés après en procédant à la mise en place d'un enduit classique.

IV.6. 3. Intervention sur les planchers :

Fig .IV.15 : vue sur les planchers. Source : auteur

1) Planchers effondres :

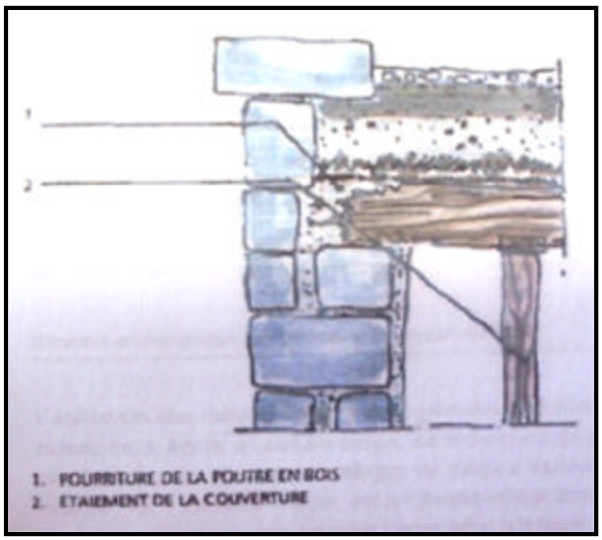
Les planchers de certains blocs étant dans un état de délabrement et de ruine avancés notamment ceux du bloc « B » qui sont effondrées, nécessitent leur enlèvement avec évacuation des gravats, tout en prenant la précaution de procéder à l'étayage des murs devenus élancés et de garder en place les tirants existant en aciers, ceci pour ne pas affecter les capacités portantes.

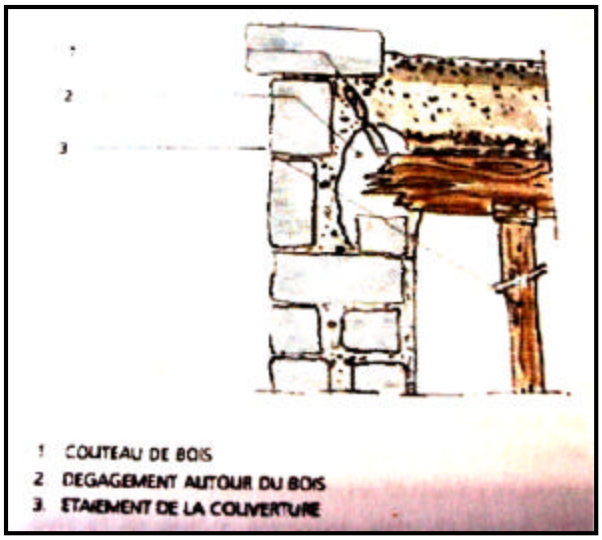
Nous vous recommandons la reprise des planchers effondrés par des planchers collaborant reposant sur des solives en charpente métallique ce qui permis de franchir des portées importantes et une exécution rapide des travaux ; le dimensionnement des solives ainsi que les dalles sont tributaires des charges aux quelles elles seront soumises. Ces planchers, outre leur fonction porteuse, ils sont destinés à rassembler les murs porteurs.

2) Planchers dégrades :

Les planchers qui présentent des dégradations locales notamment au droit des ancrages des solives avec les murs porteurs peuvent être renforcés comme su

- Etayer la solive pourrie à l'appui.
- Dégager soigneusement les pierres autour de l'encastrement du bois, ainsi que le bloc de pierre au-dessous.
- Nettoyer le bois pourri jusqu'à arriver au bois sain. Dépoussiérer l'extrémité après nettoyage (alternative : une pièce en bois pourra remplacer l'extrémité pourrie de la solive en bois. L'assemblage sera fait à une distance suffisante du mur et consolidé par des plaques en acier boulonnées, attachant les deux pièces).
- Encastrer et sceller dans la maçonnerie du mur un cordeau en pierre au-dessous de la solive. Ce corbeau sert de nouveau support, il doit dépasser la partie pourrie de la solive
- Déposer successivement l'étaiement du plancher, après réparation.





En ce qui concerne les solives en charpente métallique, le choix de leur maintien dépond de leur état de corrosion. Les solives légèrement corrodées feront l'objet d'un traitement spécial moyennant des produits de protection antirouille. Il est évident de procéder au brossage et nettoyage des partie corrodées avant leur traitement. Pour les solives dont leur état de corrosion est très avancé, leur remplacement s'avère nécessaire. Nous attirons l'attention sur la difficulté de ce choix en cas des planchers en voutains ; D'autres alternatives peuvent être envisagées.

- <u>Plancher constitués de solives métalliques :</u>
  - *Cas de dégradations moyennes :*

Passivation et renfort de la structure, par accroissement de l'inertie des poutrelles métallique

par soudure de plaque d'aciers, pour les zones avec peu d'éclatement en sous face

.

Fig .IV.15 : vue sur les planchers. Source : auteur

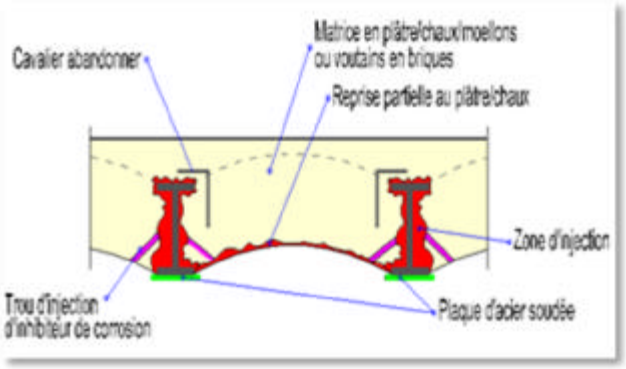


Fig .IV.16 : Consolidation par soudure de plaque d'aciers

Dans ce cas, il est nécessaire de veiller à:

- Une préparation des surfaces de contact des pièces assemblées est nécessaire soit par brossage ou grenaillage pour éliminer toutes traces de rouille et de calamine et de graisse.
- Une préparation soignée des bords des pièces à assembler par soudage est nécessaire. Pour obtenir des produits de soudage présentant d'excellentes qualités, il est important de faire subir aux pièces traitées des essais de contrôle classiques assez bien connus.
- La bonne corrélation entre l'épaisseur du cordon et l'épaisseur de la plus faible des pièces à assembler.
- Les soudures verticales seront obligatoirement montantes.

- *Cas de dégradation avancée :*

Ce cas ce caractérise par une défaillance structurelle remarquable, mettant ainsi en péril le bon fonctionnement du plancher.

La procédure à suivre est comme suit :

- Purge de la matrice en sous face et élimination des cavaliers et fentons irrécupérables.
- Passivation des parties accessibles et inaccessibles des poutrelles ayant subi une corrosion superficielle (les poutrelles fortement corrodées devront êtres remplacées par un profilé similaire)
- Mise en places de poutrelles de consolidation sous les poutrelles existantes, en veillant à les encastré correctement dans les porteur ou sur linteau suivant le cas, que tous les fers soit traités contre la corrosion avant la pose et l'utilisation de micro béton sans retrait pour le scellement.
- Mise en place d'entretoise (en U) posées sur les poutrelles de consolidation.
- Reprise partielle au mortier de plâtre/chaux en sous face.
- Assurer la circulation d'air.

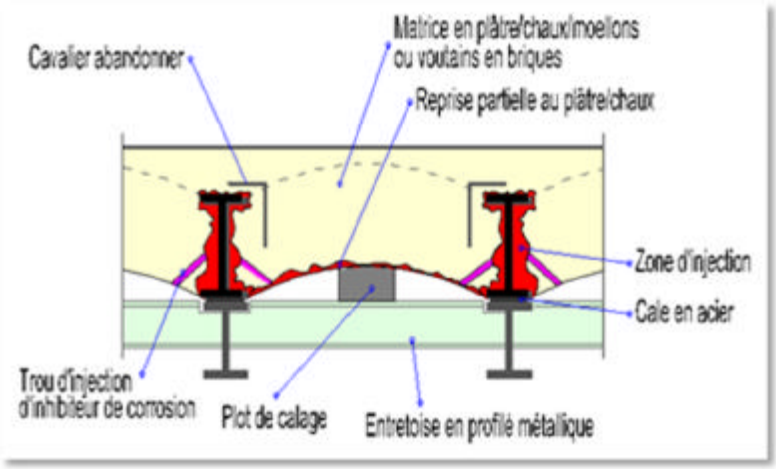


Fig .IV.17 : Consolidation par ajout de poutrelles

NB : Le bois est un matériau sensible qui réagit à toutes les variations, Il demande un entretien régulier sous menace de s'abîmer. Il peut s'altérer si les conditions ne sont pas réunies pour sa bonne conservation. De ce fait, préconiser un traitement préventif de l'ossature à base de produits insecticides et fongicides.

▪ Planchers constitués de solives en bois :

Reprise des planchers en bois qui doit être effectuée soigneusement.

- Pour les couvertures en tuile plate rouge de terre cuite :

Fig .IV.18 : La toiture (charpente en bois + tuile en panne). Source : auteur

Les couvertures en tuiles seront rétablies dans ses fonctions avec les dispositions supplémentaires en matière de constructions en maçonnerie chainée. Toutefois, nous vous préconisons ce qui suit :

- Nettoyage à l'eau par brossage tous les éléments organiques qui freinent l'écoulement des eaux.

- Après nettoyage et séchage du support, appliquer un produit hydrofuge à base de siloxane ou silane, afin d'éliminer l'absorption des eaux par capillarité et empêcher ainsi tout élément organique de se développer.

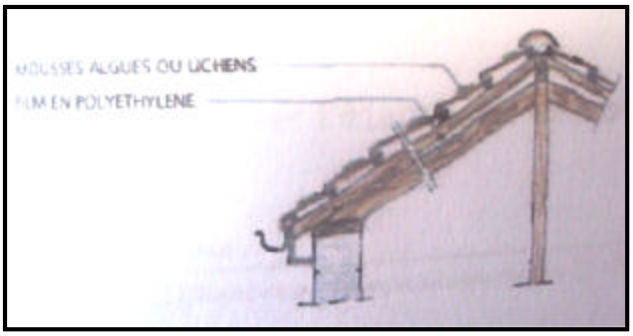
- Assurer un nettoyage régulier des canalisations d'évacuation au bas des versants de la couverture
- Dégager les fragments de tuiles qui restent en place.

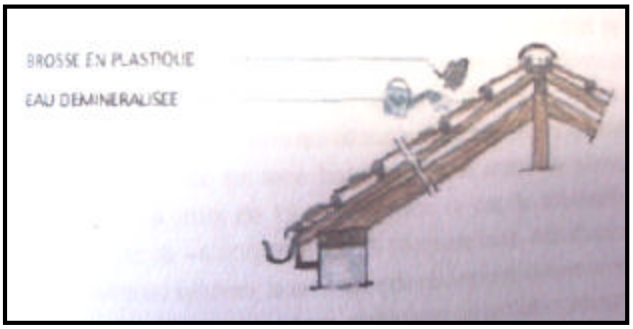
- S'assurer de la bonne conservation du support en bois

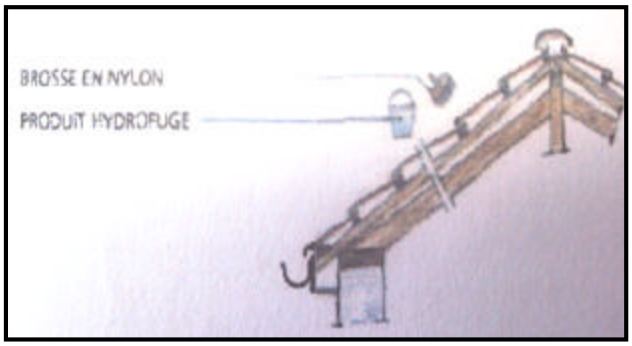
- Remplacer la tuile manquante par une autre qui possède les mêmes propriétés physiques et mécaniques. Pour cela il est préférable de récupérer une tuile ancienne.

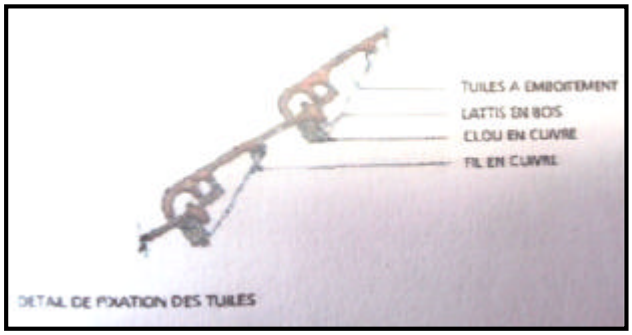
- Fixer la face inférieure de la tuile à l'aide d'un fil en cuivre qui l'attache à un clou accordé au lattis supérieur

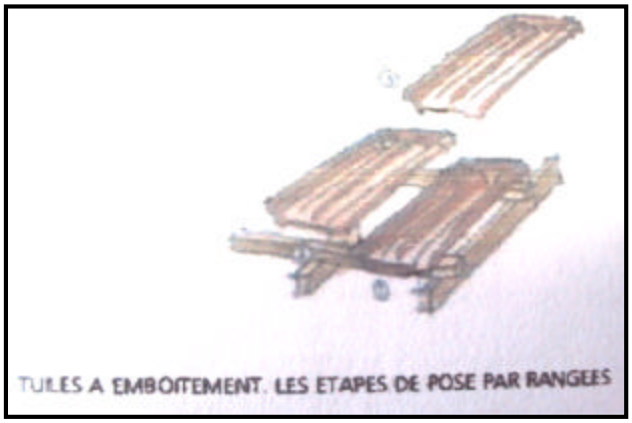
- S'assurer que toutes les tuiles sont fixées correctement à leurs supports











Dans le cas d'arrachements de tuiles :

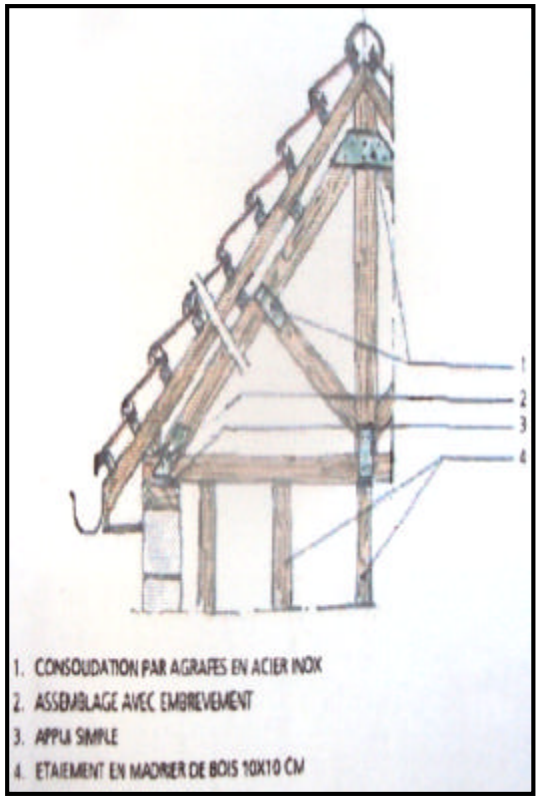
En ce qui concerne le bois constituant la structure porteuse de la couverture (les fermes en treillis), de préférable il y a lieu de restaurer autant que possible le bois altéré, avant de le remplacer par un autre.

Pour la réparation, il faut procéder à l'élimination de la cause de l'altération du bois. Ainsi, dans le cas de déformations structurelles, il faut commencer par la stabilisation de la structure avant toute intervention sur la pièce en bois altérée. Dans ce cas d'altération superficielle, il faut :

- Eliminer sur place tout le bois dégradé, jusqu'à arriver au bois sain. Le nettoyage se fera à sec.
- Traiter toutes les surfaces du bois au créosote, au chlorure de zinc ou au sulfate de cuivre, afin d'améliorer sa résistance aux attaques des insectes et des champignons.

Dans le cas où l'altération est profonde ou l'élément en bois est abimé il sera remplacé par un autre équivalent, assemblé aux pièces saines existantes grâce à des assemblages de bois traditionnels, qui pourront être consolidés, si nécessaire, par des agrafes en acier inox. Les assemblages constituent le point le plus important dans une structure composée de ferme (treillis) notamment au droit de leurs encastrements avec les murs porteurs. A cet effet, leurs réparation est d'une importance primordiale. Pour cela il faut procéder comme suit :

- Etayer l'ensemble de la charpente en bois.
- Eliminer le bois détérioré jusqu'à arriver au bois sain.
- Remplacer le bois détérioré par un bois sain, en utilisant un mode d'assemblage convenable (assemblage avec embrèvement, assemblage mi-bois, assemblage à tenon et mortaise, etc.).
- Des agrafes, des sabots ou des anneaux en acier inox boulonnés pourront être utilisés pour consolider les assemblages en bois de la charpente.
- Un traitement insecticide sera appliqué en surface et en profondeur sur la totalité de la charpente.
- Déposer progressivement l'étayement de la couverture installé au début des travaux.
- Dans le cas de la détérioration de la sablière, la remplacer par un chainage en béton en tête du mur. Une membrane en néoprène sera prévue au-dessous des entraits au contact avec l'appui, afin de protéger le bois contre l'humidité.
- Dans ce cadre nous vous recommandons de se conformer au DTR-C2.4.6 (règles de conception et de calcul des structures en bois).



IV.6. 4. Intervention pour les toitures :

Étant l'un des facteurs principaux ayant contribué à la dégradation de la mosquée en question, nous recommandons ce qui suit :

- Partie effondrée : reprendre la toiture ayant subi un effondrement.
- Partie à réparer : en ce qui concerne le bois constituant la structure porteuse de la couverture (les fermes en treillis), il y a lieu de restaurer autant que possible le bois altéré, avant de le remplacer par un autre.

Pour la réparation, il faut procéder à l'élimination de la cause de l'altération du bois. Ainsi, dans le cas de déformations structurelles, il faut commencer par la stabilisation de la structure avant toute intervention sur la pièce en bois altérée. Dans ce cas d'altération superficielle, il faut :

- Eliminer sur place tout le bois dégradé, jusqu'à arriver au bois sain. Le nettoyage se fera à sec.
- Traiter toutes les surfaces du bois au créosote, au chlorure de zinc ou au sulfate de cuivre, afin d'améliorer sa résistance aux attaques des insectes et des champignons.

Dans le cas ou l'altération est profonde ou l'élément en bois est abimé il sera remplacé par un autre équivalent, assemblé aux pièces saines existantes grâce à des assemblages de bois traditionnels, qui pourront être consolidés, si nécessaire, par des agrafes en acier inox.

- Reprendre la tuile aux endroits présentant des fuites et cassures en procédant à :
- Dégager les fragments de tuiles qui restent en place.
- S'assurer de la bonne conservation du support en bois.
- Remplacer la tuile manquante par une autre qui possède les mêmes propriétés physiques et mécaniques.
- Fixer la face inférieure de la tuile à l'aide d'un fil en cuivre qui l'attache à un clou accordé au lattis supérieur.
- S'assurer que toutes les tuiles sont fixées correctement à leurs supports
- Reprendre les descentes des eaux pluviales défectueuses.
- Assurer un nettoyage régulier des canalisations d'évacuation au bas des versants de la couverture

IV.6.5 Intervention pour les travaux secondaire

- **Travaux de dallage (support de revêtements de sol) :**

Les déformations du dallage résultent le plus souvent du tassement des sols et des remblais et d'autre causes divers tel que : la perte de résistance des matériaux, mouvement du sol etc. Nous préconisons de procéder comme suit :

- Fouiller manuellement 20 à 25 cm au-dessous du dallage afin de préparer le sol.
- Étaler éventuellement une couche isolante en Géotextile au-dessus de laquelle une couche de gros cailloux d'environ 10 à 20Cm sera damée afin d'empêcher les remontées capillaires de l'eau à travers le sol humide.
- Couler une dalle flottante en béton dosé à 350Kg/m3, d'une épaisseur de 10 à 15Cm, légèrement armé avec un treillis soudés en T6 de maille 15x15Cm. Il y a lieu de prévoir des joints entre la dalle flottante et les murs porteurs.
- Si le réaménagement à l'intérieur des blocs nécessite la projection d'une cloison, il est préférable de prévoir une longrine de 30x30cm suffisamment armée (un minimum en 6T12 à ne pas dépasser) sous la cloison. La longrine sera solidarisée avec les murs porteurs.

- **Travaux de maçonnerie et de revêtements :**

Les murs en maçonnerie qui seront repris ou nouvellement projetés, les revêtements de murs (enduit) ou de sol doivent être réalisés conformément au

- Recommandations stipulées dans les DTR (documents techniques et règlementaires) en vigueur suivants :
- DTR-C2.45 (Règles de conception et de calcul des maçonneries).
- DTR-E2.4 (Travaux de maçonnerie de petits éléments).
- DTR-E6.2.1 (Travaux d'enduits intérieurs en plâtre).
- DTR-E6.1 (Travaux d'enduits pour bâtiments).
- DTR-E6.3 (Travaux de mise en œuvre des revêtements de sol).

- **Travaux de menuiserie :**

Le remplacement de la menuiserie (portes, fenêtres, etc.) est obligatoire au vu de l'état très avancé des dégradations constatées.

- **Travaux de CES :**

Une étude préalable doit être réalisée avant d'entamer les travaux de CES, elle doit mettre en évidence les détaillés d'exécution pour l'installation de la plomberie, de l'électricité, de la

chaufferie et de climatisation. Dans ce cadre nous vous recommandons de se conformer aux DTR (documents techniques et règlementaires) en vigueur suivants :

- DTR-E10.1 (travaux d'exécution des installations électriques des bâtiments à usage d'habitation).
- DTR-E8.1 (travaux de plomberie sanitaire).
- DTR-C3.4 (travaux de plomberie sanitaire).
- DTR-E6.6 (travaux de peinture pour bâtiment).

Conclusion

Le patrimoine, un enjeu essentiel de notre histoire, a constitué une problématique pour toutes les civilisations .Pourtant, il est resté tout le temps menacé de déférents risques de détérioration et ça reste la responsabilisé des générations qui les utilisaient de les conserver et de les transmettre aux générations à venir. La réutilisation de la mosquée de Sidi Ghanem a conduit à des transformations par des extensions, des travaux de réfection et des remaniements correspondant à des changements d'usage, qui lui ont fait perdre beaucoup de sa physionomie originelle. Au regard de l'importance historique et culturelle de cette mosquée, elle mérite plus d'efforts et d'interventions pour leur préservation et protection. L'intervention dépend de son niveau de vulnérabilité, qui peut être un problème de matériaux ou de structure.

Référence

[IV.1] https://lemaghreb.dz/?page=detail_actualite&rubrique=Internationnal&id=96747
[IV.2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mila_(Alg%C3%A9rie)#Colonisation_fran%C3%A7aise
[IV.3] Benmicia Nawal, Le tourisme culturel durable et la capacité de charge touristique- Le cas de Mila., Mémoire de Magister(2015),Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen.
[IV.4] Direction de la culture de la wilaya de Mila
[IV.5] Nawal BENMICIA, The Restoration and Reuse of Historical Monuments: Case of the Mosque of Sidi Ghanem, Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism Vol. 1. Nr. 3. 2017
[IV.6] Vayssettes E., Histoire de Constantine sous la domination turque de 1517 à 1837, Paris, 2002, p. 118
[IV.7] Piesse L., Itinéraire de l'Algérie, de Tunis et de Tanger, Paris, 1882, pp. 396
[IV.8] Doukali. R., Rapport des fouilles effectuées dans la mosquée de Mila, réf. : dac/a2/n° 394/mn, septembre 1970.
[IV.9] Borhani M., Mirdamadi S, Les différents styles de calligraphie islamique et iranienne, dans TEHIRAN, N° 62, Janvier 2011

Conclusion générale

La mosquée est le noyau central autour duquel s'organise, pratiquement, toute agglomération musulmane. Elle n'est pas un simple bâtiment à dessiner juste l'agencement de ses espaces, mais il s'agit d'une ouvre architecturale particulière riche en détails constructifs et décoratifs.

Nous avons montré les éléments les plus communs de l'architecture de la mosquée, ainsi une courte chronologie de l'art architectural dans le monde musulman à travers les siècles. Il ressort de cette courte chronologie que l'école islamique est une école artistique complète qui a su élaborer des symbioses entre des traditions architecturales diverses pour produire un style orignal, il est manifeste que cette école a contribué et continue de contribuer à l'édification de la civilisation universelle.

La plus part des monuments historiques ont été réalisés en maçonnerie. Les constructions en maçonnerie sont très répandues, car elles sont relativement facile à réaliser et peu coûteux. Nous avons présenté les différents types de maçonneries, ainsi les principales caractéristiques des différents matériaux qui la constituent. La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne. Généralement, trois types de murs en maçonnerie existe : les murs d'appareil (La nature, le type de pierre et sa taille déterminent les différentes possibilités de les agencer), les murs constitués de deux parements en pierres de taille englobant un 'blocage', c'est-à-dire une masse de matériaux divers agglomérés par des mortiers en chaux ou à base de terre argileuse et les murs 'organiques (ou 'mixtes) dont les arêtes, les soubassements, les chaînages, les encadrements de baies sont faits en pierre de taille, tandis que le reste est constitué de petite maçonnerie où le liant domine.

La maçonnerie montre un comportement global complexe, largement influencé par l'hétérogénéité et l'anisotropie induites par l'arrangement géométrique de la structure, ainsi qu'à la différence de propriétés entre les éléments qui la composent. La détermination précise de sa résistance et des mécanismes susceptibles de se produire est rendue complexe par le grand nombre de combinaisons blocs/mortier possibles. De plus, l'influence de nombreux paramètres extérieurs (conditions limites, chargements...) conditionnent la rupture.

Le patrimoine a constitué une problématique pour toutes les civilisations en termes de vulnérabilité. Il possible de classer deux types de pathologies dans les structures en maçonneries, des pathologies liés aux matériaux et à la structure. Pour faire le diagnostic, Deux familles d'investigations ont été répertoriées: les méthodes destructives et les méthodes

non destructives. Concernant la caractérisation des maçonneries, le prélèvement par carottage est un bon moyen d'étudier la composition des maçonneries et d'identifier les caractéristiques mécaniques des pierres calcaires. Cependant, dans le cadre de l'étude de monuments historiques, la valeur architecturale des maçonneries conduit à limiter au maximum ce type d'investigation. Les méthodes non destructives de type mesure de vitesse du son peuvent alors être un moyen non destructif de caractérisation mécanique des pierres calcaires. Les relevés radars permettent en outre l'étude de la composition des maçonneries. Enfin l'instrumentation de l'édifice nous renseigne sur l'évolution des désordres en temps réel. Différentes techniques de réhabilitation et/ou de renforcement des éléments en maçonneries à l'aide de divers matériaux selon différentes méthodes d'application sont discutées

Dans ce mémoire, nous avons orienté la recherche vers l'un des monuments les plus importants en Algérie, c'est la mosquée de Sidi Ghanem (notre cas d'étude). Nous avons traité des données existantes sur la question de la réutilisation de ce monument historique, son analyse en termes de son architecture, la technique de sa construction et l'ornementation de ses murs qui portent l'empreinte de plusieurs époques. Ainsi nous avons déterminé les causes de son dégradation, et proposé des techniques de réhabilitation / et ou renforcement de quelques éléments endommagés dans ce monument.

Résumé

L'Algérie a hérité de son histoire, d'un riche patrimoine bâti, qui constitue un legs historique immense, d'une grande diversité typologique, témoignant des différentes civilisations qui se sont succédées sur le territoire algérien. L'un des monuments les plus importants en Algérie, est la mosquée de Sidi Ghanem. Cette mosquée du vieux Mila pose un véritable problème, nous ne connaissons pas sa forme originelle et nous ne savons pas comment elle a évolué dans le temps. Sa réutilisation a conduit à des transformations par des extensions, des travaux de réfection et des remaniements correspondant à des changements d'usage, qui lui ont fait perdre beaucoup de sa physionomie originelle. Ajouté à cela la dégradation de ce monument à cause d'une accélération potentielle de son altération du fait de l'influence des conditions environnementales. Notre objectif vise à faire une analyse de ce monument historique, à déterminer les causes de son dégradation et trouver des solutions pour le réhabiliter.

Mots clé : Monument historique, Mosquée, Réutilisation, Dégradation, Réhabilitation

Abstract :

Algeria has inherited its history, a rich built heritage, which constitutes an immense historical legacy, a wide typological diversity, testifying of the various civilizations that have followed one another on the Algerian territory. One of the most important monuments in Algeria is the mosque of Sidi Ghanem. This mosque of the old town of Mila poses a real problem, we do not know its original form and how it evolved over time. Its reuse has led to transformations through extensions, repair works and reshuffles corresponding to changes in use, which have caused it to lose much of its original appearance. Added to that the degradation of this monument owing to a potential acceleration of the deterioration due to the influence of environmental conditions. Our objective is to make an analysis of this historical monument, to determine the causes of degradation and find solutions to rehabilitate it.

Keywords: Historical monument, Mosque, Reuse, Degradation, Rehabilitation

ملخص

لقد ورثت الجزائر عبر التاريخ، تراثًا معماريًا غنيًا، يشكل إرثًا تاريخيًا هائلاً، وتنوعًا نموذجيًا واسعًا ، يشهد على مختلف الحضارات التي اتبعت بعضها البعض على التراب الجزائري. من أهم المعالم الأثرية في الجزائر مسجد سيدي غانم. هذا المسجد الذي يقع في مدينة ميلة القديمة يطرح مشكلة حقيقية فنحن لا نعرف شكله الأصلي وكيف تطور مع مرور الوقت. حيث أن إعادة استخدامه أدى إلى إحداث تغييرات و تحولات عن طريق التوسعات وأعمال الإصلاح والتعديلات المتعلقة بعملية إعادة استخدامه ، والتي تسببت في فقدان الكثير من مظهره الأصلي. ضف إلى ذلك تدهور و تلف هذا النصب بسبب تأثير الظروف البيئية. الهدف من هذا العمل هو إجراء تحليلا لهذا الصرح التاريخي، للوقوف على أسباب التدهور و التلف وإيجاد حلول لإعادة تأهيله.

الكلمات المفتاحية: معلم تاريخي ، مسجد ، إعادة استعمال ، تدهور ، إعادة تأهيل .