

N° Ordre...../FT/UMBB/ .....

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

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**

**Faculté de technologie**

**Département de Génie des procédés**



## **Thèse de Doctorat**

Présentée par :

**BOUZETINE Kamel**

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT** sciences en :

**Filière : Sciences et génie des matériaux**

**Spécialité : Physico-chimie des matériaux**

**Caractéristiques et techniques d'emploi des matériaux  
de construction anciens de la ville de Mila (cas de la mosquée Sidi  
Ghanem).**

### **Devant le jury composé de :**

Mr : BENMOUNAH	Abdelbaki	Professeur	UMBB	Président
Mr : HAMIANE	Messaoud	Professeur	UMBB	Encadreur
Mr : SAIDI	Mohammed	Professeur	UMBB	Examineur
Mr : DRICI	Salim	Professeur	U-Alger	Examineur
Mr : BOUAKAZ	Aissaoui	MCA	U-Djelfa	Examineur
Mme : HANAFI	Aicha	Professeur	U-Alger	Examineur

**Année Universitaire 2022/2023**

## *Remerciements*

Je remercié Monsieur le professeur HAMIANE Messaoud qui a encadré cette thèse, ainsi que les stages qui l'ont précédée, pour sa disponibilité et son aide. Je voudrais lui exprimer toute ma gratitude pour l'ensemble des discussions instructives que nous avons pu avoir, pour tout l'enrichissement intellectuel que cela m'a apporté, et pour m'avoir transmis son sens de la pédagogie et son souci du détail.

Je remercie les membres de jury pour avoir accepté de participer à évaluer ce travail.

Tous mes remerciements vont également à l'ensemble des personnes qui ont contribué à ce travail : monsieur Philippe Bromblet et monsieur Roland May (Centre interdisciplinaire du conservation et restauration du patrimoine) CICRP Marseille , de m'avoir accepter au sein de leurs laboratoires et pour l'ensemble des discussions enrichissantes ; monsieur Pierre Guibert et Remy Chapoulie (institut de recherche en archéomatériaux centre de recherche en physique appliquée en archéomatériaux IRAMAT, CRP2A) université de Bordeaux Montagne pour les testes de datation OSL ; Madame Brigitte pour les lames minces, Yanick pour la microscopie électronique, Nadia pour l'analyse pétrographique sans oublier le personnel administrative Cecile et Ourida. Merci à Monsieur Pierre pour les logiciels qui m'ont permis de mener à bien ce travail,

Merci également à Monsieur Pedro Pont et madame Reyes Montanes de Coloronda S.L pour les analyses FX et DRX et ATS.

Un merci tout particulier à ma femme Farida pour son soutien moral sans faille et son encouragement.

*Kamel*

## **Résumé :**

La mosquée de Sidi Ghanem est considérée comme la première mosquée en Algérie. Sa fondation remonte au premier siècle de l'Hégire. Son édification a été faite par le réemploi des matériaux des époques antérieures. Ce monument a subi d'importantes modifications à travers son histoire et se trouve dans un état de préservation pitoyable.

L'objet de ce travail est de dater cet édifice à travers les caractéristiques d'emploi des matériaux de constructions anciens de la mosquée de Sidi Ghanem de Mila : pour ce faire une première datation basée sur une lecture stratigraphique qui permet de le décomposer en plusieurs unités stratigraphiques relative à chaque période ; ce qui nous permettra de comprendre les phases de construction et de remonter à la l'édifice primitif. Deuxièmement une datation absolue par thermoluminescence en grain unique de quartz sur la brique pleine des arcades sur l'édifice primitif pour confirmer son ancienneté, et ensuite une deuxième datation par OSL sur la brique pleine des arcades situées sur l'extrémité Est des murs de l'édifice dans sa forme actuelle. La lecture stratigraphique a mis la lumière sur la mosquée primitive et d'autres unités stratigraphiques des époques antérieures à la période islamique ( mur antique, mur en moellons ...ect ) ; elle a permis également de déterminer l'agrandissement de la salle de prière et d'autre unités stratigraphiques postérieures (petites constructions greffées sur les murs de la mosquée actuelle qui remonte à des périodes postérieures).

La datation OSL affiche un intervalle entre [48 à 72] H, comme intervalle logique et acceptable de la fabrication de la brique TCP02 et donc de la construction de la partie primitive de la mosquée sous la règne des (Banū 'Umayyah) ou Omeyyades. Elle affiche un intervalle [397-465] H sur la brique TCP01 comme intervalle de modification de cette mosquée (extension) et ce sous la règne des (Banû Hammad) Hammadides.

L'étude des matériaux de construction tels que les pierres et les mortiers des unités stratigraphique par les méthodes scientifique analyse chimique par XRF, analyse par DRX analyse pétrographique sur lames minces, microscopie électronique à balayage, analyse chimique élémentaire et cartographie X des mortiers, a prouvé l'exactitude de notre étude stratigraphique et elle l'a confirmée car toutes les pierres et tous les mortiers de chaque unité stratigraphique étudiée sont différents les uns par rapport aux autres composés essentiellement de pierres calcaire de différentes stratifications géologiques, pour les mortiers sont principalement calcaires, avec une teneur variable en calcite en sable et des inclusions de terre. D'autres contiennent du charbon, tuileau ainsi qu'un mortier en plâtre.

Le constat d'état sur la conservation de la mosquée montre certaines lacunes notamment sur le traitement des remontées capillaires, le traitement biocide et plus dangereusement la stabilité de la structure ou nous recommandons le renforcement des piliers et colonnes par des tirants, surtout que la région Mila est considérée comme zone sismique de 2eme degré.

**Mots clé :** Mila, mosquée Sidi Ghanem, datation, matériaux de construction.

## الملخص:

يعتبر مسجد سيدي غانم أول مسجد في الجزائر، يعود تاريخ تأسيسه إلى القرن الأول من الهجرة وقد تم بناءه من خلال إعادة استخدام المواد العائدة إلى العصور السابقة. وقد شهد هذا المعلم التاريخي تغييرات كبيرة على مر تاريخه وهو في حالة من الحفظ يرثي لها.

الهدف من هذا العمل هو القيام بعملية تأريخ لهذا المبنى أولاً: من خلال تأريخ نسبي يستند إلى قراءة طبقاتية تسمح بتقسيمه إلى عدة وحدات طبقاتية متعلقة بكل فترة والتي سوف تسمح لنا فيما بعد فهم مراحل البناء والعودة إلى البناء الأصلي. ثانياً هو القيام بالتحديد الزمني التام باللمعان المحفز ضوئياً على حبات الكوارتز الموجودة في الطوب المحروق الموجود في أقواس المبنى لتأكيد أصالته، ثم تحديد زمني ثاني باللمعان المحفز ضوئياً على الطوب المحروق في الأقواس الموجودة على الطرف الشرقي من جدران المبنى في شكله الحالي.

وقد أُلقت القراءة الطبقاتية (الستراتيغرافية) الضوء على المسجد الأصلي والوحدات الطباقية الأخرى التي تعود إلى فترات ما قبل الإسلام (الجدار القديم، الجدار الطويي...)، كما ساعدت على تحديد زمن توسعة قاعة الصلاة وغيرها من الوحدات الطباقية اللاحقة (البناءات الصغيرة المطعمة على جدران المسجد الحالي التي يعود تاريخها إلى فترات لاحقة).

يُظهر عملية التحديد الزمني باللمعان المحفز ضوئياً فاصلاً يتراوح بين [84 إلى 72] هـ، يمثل فاصلاً منطقياً ومقبولاً لصناعة الطوب المحروق TCP<sub>02</sub> وبالتالي بناء الجزء الأصلي من المسجد في عهد الأمويين. ويعرض فاصلاً يتراوح بين [397-465] هـ على الطوب المحروق TCP<sub>01</sub> ويمثل فاصل التعديل الذي طرأ على هذا المسجد (التوسعة) والذي جرى في عهد الحماديين.

إن دراسة مواد البناء الحجر و الملاط في الوحدات الطباقية من خلال الأساليب العلمية، التحليل الكيميائي بالأشعة السينية التحليل المعدني التحليل البتروغرافي على شفرات رقيقة، المجهر الإلكتروني الماسح، التحليل الكيميائي المبدئي ورسم خرائط الأشعة السينية للملاط، تؤكد دقة دراستنا للطبقات وتوثيقها، لأن جميع الحجارة و الملاط الموجودين في كل وحدة طباقية يختلف بعضها عن البعض الآخر، الملاط هو أساساً جيري ذو محتوى متغير من كالسيت، الرمال، وخليط من الأتربة في حين تحتوي أخرى على الفحم، الملاط والطوب المحروق المسحوق و الملاط الجصي.

إن معاينة الحالة المتعلقة بالمحافظة على المسجد تظهر بعض أوجه القصور لا سيما في علاج انتشار الرطوبة، والمعالجة بالمبيدات الحيوية، والأخطر من ذلك استقرار هيكل المسجد الذي نوصي بتمتين أعمدته وسواريه بواسطة الساحبات، خاصة وأن منطقة ميلة تعتبر منطقة زلزالية من الدرجة الثانية.

كلمات مفتاحية: ميلة، مسجد سيدي غانم، تأريخ، مواد البناء.

**Abstract :**

The Sidi Ghanem Mosque is considered the first mosque in Algeria. Its foundation dates back to the first century of the Hegira. Its construction was made by the reuse of materials from earlier eras. This monument has undergone significant changes throughout its history and now it is in a state of pitiful preservation.

The object of this work is to date this building: first, by a relative dating based on a stratigraphic reading that allows it to be broken down into several stratigraphic units relating to each period; which will allow us to understand the phases of construction and go back to the original building and secondly, is to make an absolute dating by single grain thermoluminescence of quartz on the full brick of the arcades on the original building to confirm its age, and then a second dating by OSL on the full brick of the arcades located on the eastern end of the walls of the building in its current form.

The stratigraphic reading has shed light on the primitive mosque and other stratigraphic units from the pre-Islamic periods (ancient wall, rubbed wall ... (ect); it also helped to determine the expansion of the prayer hall and other later stratigraphic units (small buildings grafted onto the walls of the present mosque that dates back to later periods.

The OSL dating shows an interval between [48 to 72] H, as a logical and acceptable interval of the manufacture of the TCP02 brick and thus of the construction of the primitive part of the mosque during the reign of the Umayyads. It displays an interval [397-465] H on the brick TCP01 as the interval of modification of this mosque (extension) and this under the reign of the Hammadids.

The study of materials such as stone and mortar of stratigraphic units by scientific methods, chemical analysis by XRF, DRX petrographic analysis on thin blades, scanning electron microscopy, elementary chemical analysis and X-ray mapping of mortars, proved the accuracy of our stratigraphic study and confirmed it because all the stones and mortars in each studied stratigraphic unit are different from each other essentially limestone compounds of different geological stratification, for mortars are mainly calcareous, with a variable content of sand calcite and earth inclusions. Others contain charcoal, tile and a plaster mortar.

The status statement on the preservation of the mosque shows certain shortcomings notably on the treatment of capillary lifts, biocide treatment and more dangerously the stability of the structure where we recommend the reinforcement of pillars and columns by draughts, especially since the region of Mila is considered a 2nd degree seismic zone.

**Keywords :** Mila, Sidi Ghanem Mosque, dating, building materials.

# Table des matières

- Introduction générale.
- Problématique.
- Objectifs.
- Méthodologie.

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

## Partie I : Recherche bibliographique 01

<b>Chapitre : 01 Etat de connaissance sur les matériaux de construction anciens et leurs techniques de mises en œuvre.</b>	<b>03</b>
1. Introduction	04
2. La pierre	04
2.1. L'extraction	05
2.2. Le travail de la pierre	06
2.3. Formes et nomenclature de la pierre utilisée dans la construction	07
2.4. La pierre dans le mur	08
2.4.1 Appareils homogènes	08
2.4.1.1. Les appareils qui combinent des éléments sous leur forme originale	08
2.4.1.1.1. Appareil incertain ( <i>opus incertum</i> )	08
2.4.1.1.2. Appareil quasi-réticulé ( <i>opus quasi reticulatum</i> )	09
2.2.1.1.3. Appareil réticulé ( <i>opus reticulatum</i> )	10
2.2.1.1.4. Appareil quadrangulaires ( <i>opus vittatum</i> )	10
2.4.1.2. Appareils utilisant des éléments taillés (Grand appareil)	11
2.4.1.2.1. Appareil cyclopéen	11
2.4.1.2.2. Polygonal régulier	12
2.4.2. Appareils hétérogènes ( <i>Opus mixtum</i> )	12
2.5. La pierre dans les arcades	13
2.5.1 Définition	13
2.5.2 Parties de l'arc	14
2.5.3 Formes de l'arc	15
2.6 Caractéristiques des pierres de construction	17
2.6.1. Classification des roches	17
2.6.1.1. Roches carbonatées	18
2.6.1.2. Les grès	18
2.6.1.3. Les roches granitiques	19
2.6.2. Caractéristiques Techniques	20
2.6.2.1. La Masse volumique apparente	20
2.6.2.2. Porosité	20
2.6.2.3. Résistance à la compression	21

2.6.2.4. Résistance à la traction par flexion	21
2.6.2.5. Vitesse de propagation du son à travers les pierres	21
2.6.2.6. Module d'élasticité	22
2.6.2.7. Largeur de rayure	22
2.6.2.8. Résistance au gel	22
2.6.2.9. Description pétrographique des pierres naturelles	22
2.6.3. La dégradation de la pierre	23
2.6.3.1. Les origines des altérations	23
2.6.3.2. Les autres causes d'altération	24
2.6.3.3. Les type altérations	24
3. La brique	25
3.1. La fabrication de la brique en terre cuite	25
3.1.1. Masse au façonnage	25
3.1.2. Façonnage et séchage	27
3.1.3 Cuisson	27
3.2. Les formes et dimension	28
3.3. La Brique dans le mur	29
3.3.1 Opus <i>latericium</i>	29
3.3.2 Opus <i>testaceum</i>	29
3.4. Caractéristiques des briques	32
3.4.1. Analyse	32
3.4.2. Analyse minéralogique	33
3.4.3 Analyses physiques	33
3.4.4 Essais mécaniques	34
3.5. Altération des briques	35
4. Les mortiers	37
4.1. Les constituants du mortier	37
4.1.1. La chaux	37
4.1.2. Le plâtre	39
4.1.3 .Le sable	41
4.1.4. Le sablon	41
4.1.5. La pouzzolane	41
4.1.6. Terre cuite	42
4.2. Le mortiers à travers l'histoire	43
4.2.1. Préhistoire	43
4.2.2. Mortiers grecs	43
4.2.3. Les mortiers romains	44
4.2.4. Mortiers médiévaux	45
4.2.5. Les mortiers Ottomans	46
4.3. Altération des mortiers	48
5. Conclusion	49

## Chapitre 02 : Genèse des mosquées dans le monde musulman

1. Introduction	53
2. La mosquée, éléments architecturaux et architectoniques	54
2.1 Principaux éléments de l'architecture des mosquées	54
2.1.1. Le plan	54
2.1.1.1 Le plan Arabe	55
a) Le plan hypostyle	55
b) Le plan hypostyle basilicale à abside	56
2.1.1.2. Le plan Iranien (persane)	57
2.1.1.3. Le plan ottoman	58
2.1.2. Les Arcs	58
2.1.3. Le Mihrab	62
2.1.3.1. L'orientation des mihrabs dans les mosquées	63
a).La tendance Est	63
b).Tendance Sud-Est	64
c).La tendance cordouane	64
d).La tendance Sud	64
2.1.4. Façades, entrées, cours et iwân	65
2.1.4.1. La cour	66
2.1.4.2 Iwans	66
2.1.4.3. Revêtements	66
2.1.5. Coupole	66
2.1.6. Le Minaret	67
3. Les mosquées millénaires dans le monde musulman	70
3.1. La mosquée du Prophète à Médine	70
3.2. La mosquée d'El Basra	75
3.3. La mosquée d'El Kufa	75
3.4. Le Dôme du Rocher	77
3.5. La mosquée Al-Aqsa	79
3.6. La grande mosquée de Damas	82
3.7. La mosquée El Kairouan	84
3.8. La mosquée de Courdue	87
4. Caractéristiques architecturales des différentes dynasties passées par l'Algérie	88
4.1. Architecture zirides	90
4.2. Architecture Hammadites	94
4.3. Architecture Almoravide	95
4.4. Architecture Almohade	97
4.5. Architecture Zianide	98
4.6 Architecture Mérinide	99
4.7. Architecture Ottomanes	101
5. Conclusion	102

## **Chapitre 03: Histoire et archéologie de la ville et de la mosquée de Mila 105**

1. Introduction	106
2. Histoire de la ville de Mila	107
2.1. Origines Des Noms	107
2.2 Période Préhistorique	108
2.3. Période punique et romaine	108
2.4 Invasion vandale	109
2.5 Période byzantine	110
2.6 Période musulmane	110
2.7. La période coloniale	112
3. Archéologie de la ville de Mila	113
3.1. Sites Archéologiques et vestiges de la ville de Mila	113
3.2. Fouilles archéologiques	116
3.2.1. Fouilles archéologiques des années 1979-1880	116
3.2.2. Fouilles archéologiques des années 1926	117
3.2.3 Fouilles archéologiques des années 1957	118
4. Archéologie de la mosquée de sidi Ghanem	122
4.1. Description de la mosquée de Sidi Ghanem	122
4.2 Compagnes de fouilles archéologiques de 1968, 1969 et 1970	128
4.2.1. Première compagne de fouilles (1968)	128
4.2.2. Deuxième compagne de fouilles (1969)	130
4.2.3. Troisième compagne de fouilles (1970)	133
5. Conclusion	134

## **PARTIE II : Partie pratique**

### **Chapitre 01 : Méthodologie et techniques de caractérisations des matériaux. 137**

1. Introduction	138
2. Les méthodes utilisées dans l'analyse et la caractérisation des matériaux	141
2.1. L'observation	141
2.2. Analyse pétrographique sur lame mince	142
2.3. L'analyse thermique différentielle (ATD)	144
2.4. Thermogravimétrie (TG)	145
2.5. Définitions de la thermogravimétrie simultanée	145
2.6. L'analyse chimique par fluorescence X(XRF)	147
2.6.1. Principe	147
2.6.2. Rayons X et fluorescence	147
2.6.3. Méthode de préparation de l'échantillon	149
2.7 Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)	150
2.8 Microscopie électronique à balayage (MEB)	153
2.9 Datation par OSL	156

2.9.1. Origine de la luminescence	156
2.9.2. Les signaux d'OSL	158
2.9.3. Principe de la datation	158
2.9.3.1. Détermination de la paléodose	159
2.9.3.2. Détermination de la dose annuelle (débit de dose).	162
2.10 Spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS).	163
2.11 Spectrométrie Gamma	165
2.12 Caractéristiques physiques	168
2.12.1. Masse volumique spécifique	168
2.12.2. Masse volumique apparente	168
2.12.3. Absorption d'eau	169
2.12.4. La porosité totale	169

## **Chapitre 02 : Etat de conservation de la mosquée de Sidi Ghanem**

1. Introduction	172
2. Etat des lieux et facteurs de dégradations de la mosquée de Sidi Ghanem	173
2.1 Facteurs mécanique et instabilité de la maçonnerie	173
2.2 Les Remontées capillaires du sol	177
2.3. Infiltrations des eaux pluviales au travers des maçonneries	177
2.4. Le manque d'entretien	178
2.5 Les lichens et les champignons	180
2.6. Les traitements inadaptés	181
2.7 Altération physico-chimique	182
2.7.1. Description de la forme d'altération	183
2.7.2. Observation sous loupe binoculaire	184
2.7.3. Examen pétrographique sur lames minces	184
2.7.4. Analyse minéralogique par diffraction X	186
2.7.5. Analyse chimique par fluorescence X	187
2.7.6. Caractéristiques pétrophysique]	188
2.7.8. Mesure de la température et de l'humidité à l'intérieur de la mosquée	189
2.8. Essai de vieillissement	192
2.8.1. Résultats et discussion	193
3 Les travaux de sauvegarde	193
3.1 Stabilisation du terrain par la chaux :	193
3.2 Protection des puits de fouilles contre l'effondrement	194
3.3 Travaux d'étanchéité	195
3.4 Réfection des maçonneries endommagées :	195
3.5. Consolidation des maçonneries	196
3.6. Mise en place des portes et des fenêtres	196
3.7. Opération de désherbage :	197
4. Recommandations :	197
4.1 Stabilisation de la structure	197
4.2. Lutte contre les remontées capillaires par une barrière étanche	198

4.3. Les infiltrations des eaux	199
4.4. Le traitement biocide :	199
5. Conclusion	201

## **Chapitre 03 : Etude stratigraphique architecturale de la mosquée et essais de datation 202**

1. Introduction	204
2. L'analyse stratigraphique de la mosquée de Sidi Ghanem	205
2.1 Période coloniale	205
2.1.1. Le minaret	207
2.1.2. Les deux constructions	208
2.1.3. Etude stratigraphique des deux constructions de l'époque coloniale	210
2.1.4. La salle de prière	212
2.1.4.1. Le mihrab	215
2.1.4.2. Les portes et les fenêtres	217
2.2. Etude stratigraphique précoloniale	219
2.2.1. La construction ancrée au mur Est	219
2.2.2. La grande salle (salle de prière)	222
2.2.2.1. Le mur Sud	222
2.2.2.2. Le mur Ouest	223
2.2.2.3. Le mur Nord	224
3. datation par OSL en grain unique	226
3.1 Introduction	226
3.2. Principe de la méthode	226
3.3. Caractérisation des deux terres cuites	227
3.3.1. Aspect et morphologie	227
3.3.2. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X	229
3.3.3. Observation au MEB-EDS et cartographie X:	230
3.4. Mesure de la thermoluminescence	231
3.4.1. Préparation des terres cuites	231
3.4.2 Mesure de la dose équivalente	232
3.4.2.1. Instrumentation	232
3.4.2.2. Détermination de la dose archéologique	233
3.4.2.3. Détermination de la température de préchauffage	234
3.4.2.4. Facteur d'efficacité alpha	234
3.4.3.5. Détermination des doses équivalentes	235
3.4.3. Dose annuelle d'irradiation	236
3.4.3.1. Les composantes de la dose annuelle	236
3.4.3.2. Mesures radiochimiques	237
3.4.3.3. Composante environnementale de la dose annuelle	238
3.4.3.4. Le rôle de l'humidité	238
3.4.3.5. Résultats des évaluations de la dose annuelle	238
3.5. Datation des échantillons	241
4. Conclusion	243

<b>Chapitre 04 : Etude des matériaux de construction anciens et leurs techniques de maçonnerie</b>	<b>246</b>
1. Introduction	248
2. Les fondations.	249
2.1. Les fondations de l'ancienne enceinte	249
2.1.1. Echantillonnage	249
2.1.2. Fondation Sud	250
2.1.2.1. Description de la technique de maçonnerie	250
2.1.2.2. Caractérisation de la pierre Pfs	250
2.1.2.2.1 Analyse Minéralogique par diffraction X	251
2.1.2.2.2 Analyse pétrographique sur lame mince	251
2.1.2.2.3 Caractéristiques pétrophysique]	252
2.1.2.3. Caractérisation du mortier Mfs	252
2.1.2.3.1. Analyse minéralogique par diffraction X	253
2.1.2.3.2. Analyse thermique simultanée ATS	253
2.1.2.3.3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS	254
2.1.2.3.3. Cartographie X	254
2.1.3. Fondation centre	255
2.1.3.1. Description de la technique de mise en œuvre	255
2.1.3.2. Caractérisation de la pierre Pfc	256
2.1.3.2.1 Analyse Minéralogique par diffraction X	256
2.1.3.2.2. Analyse pétrographique sur lame mince	257
2.1.3.2.3. Caractéristiques pétrophysique	258
2.1.3.3. Caractérisation du mortier Mfc	258
2.1.3.3.1. Analyse minéralogique par diffraction X	259
2.1.3.3.2. Analyse thermique simultanée	259
2.1.3.3.3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS	260
2.1.3.3.4. Cartographie X	261
2.1.4. Fondation Nord	261
2.1.4.1. Description de la technique de maçonnerie	261
2.1.4.2. Caractérisation de la pierre Pfn	262
2.1.4.2.1. Analyse Minéralogique par diffraction X	262
2.1.4.2.2. Analyse pétrographique sur lame mince	263
2.1.4.2.3. Caractéristiques pétrophysique	264
2.1.4.3. Le mortier Mfn	264
2.1.4.3.1. Analyse minéralogique par diffraction	265
3. Les Murs	265
3.1. Mur de l'enceinte actuelle	265
3.1.1. Description de la technique de maçonnerie	265
3.1.2. Caractérisation de la pierre Pm01	266
3.1.2.1. Analyse Minéralogique par diffraction X	267
3.1.2.2. Analyse pétrographique sur lame mince	267
3.1.2.3. Caractéristiques pétrophysique	268

3.1.3. Caractérisation du mortier Mm01	268
3.1.3.1. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X	269
3.1.3.2. Analyse thermique simultanée	269
3.1.3.3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS	270
3.1.3.4. Cartographie X	271
3.1.4. Caractérisation de la pierre Pm02	272
3.1.4.1 Analyse Minéralogique par diffraction X	272
3.1.4.2. Analyse pétrographique sur lame mince	272
3.1.4.3. Caractéristiques pétrophysique	273
3.1.5. Caractérisation du Mortier Mm02	273
3.1.5.1. Analyse minéralogique des rayons X	274
3.1.5.2. Analyse thermique simultanée	274
3.1.5.3. Analyse chimique élémentaire MEB- EDS	275
3.1.5.4. Cartographie X	275
3.2. Mur de la petite construction	376
3.2.1. Description de la technique de maçonnerie	376
3.2.2. Caractérisation de la pierre Pmc	277
3.2.2.1. Analyse Minéralogique par diffraction X	277
3.2.2.2. Analyse pétrographique sur lame mince	278
3.2.2.3. Caractéristiques pétrophysique	278
3.2.3. Caractérisation du mortier Mpc	279
3.2.3.1. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X	280
3.2.3.2. Analyse thermique simultanée	280
3.2.3.3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS	281
3.2.3.4. Cartographie X	281
4. Conclusion	283
Conclusion générale	285
Références Bibliographiques	289

## LISTE DES FIGURE

Figure.1.1 : Mode d'extraction en bloc à la carrière antique	04
Figure.1.2 : Bloc de pierre équarri	06
Figure 1.3 : Pierre de taille	06
Figure 1.4 : Moellons faces de joint	07
Figure 1.5 : Nomenclature de la pierre de taille en fonction des dimensions de faces	07
Figure 1.6 : La pierre de taille dans le mur	08
Figure.1.7: Opus <i>incertum</i>	09
Figure.1.8: Opus <i>incertum</i>	09
Figure.1.9: Opus quasi reticulatum	09
Figure 1.10: Opus reticulatum	10
Figure 1.11: Opus reticulatum	10
Figure 1.12: Opus vittatum	11
Figure1.13 : Opus siliceum	11
Figure1.14: Opus quadratum	12
Figure1.15: Opus quadratum	12
Figure 1.16 Opus mixtum à bandes	13
Figure 1.17: Opus mixtum à panneaux	13
Figure.1.18: Parties de l'arc	14
Figure 1.19 : Formes de l'arc	16
Figure.1.20. Les principales formes d'altération de la pierre en œuvre	24
Figure 1.21 : Mélange par piétinement de l'argile avec l'eau et un dégraissant	26
Figure I.22 : Démoulage des briques après séchage	26
Figure I.23: Four pour la cuisson des briques	27
Figure I. 24 : Briques romaine triangulaires	28
Figure I.25 : Partition des briques carrées de mesures courantes	29
Figure I.26: Opus testaceum	30
Figure I. 27 : Appareil en épi	31
Figure I. 28 : Chaîne d'angle avec des briques de différentes couleurs	31
Figure I.29 : Observation microscopique et identification de minéraux de l'échantillon brique BR4 de la casbah d'Alger	32
Figure I.30: Cycle de la chaux	38
Figure I.31: Four à chaux	39
Figure I.32: Four à plâtre	40
Figure I.33: Cycle de gypse	40
Figure 2.1 : Mosquée d'El Kufa construite en 639 ap.jc	55
Figure 2.2 : Mosquée d'El Kufa après l'extension de ZIYAD en 670, plan et coupe	55
Figure 2.3 : plan de la mosquée d'El Kairouan en 836 ap.jc	56
Figure 2.4 : Plan actuel de la mosquée d'El Kairouan	56
Figure 2.5 : Plan de la mosquée d'Asfahane	57
Figure 2.6 : Vue axonométrique de la mosquée d'Asfahane	57
Figure 2.7: Plan de la mosquée de sultane Ahmed Istanbul	58
Figure 2.8: (1) Arc de plein cintre ; (2) Arc surbaissé ; (3) Arc surhaussé ;(4) Arc de plein cintre outrepassé ; ou fer à cheval (5) Arc brisé ; (6) Arc iranien ;(7) Arc lobé ;(8)	

Arc à lobes trèfles ;(9) Arc recticurviligne ;(10) Arc festonné ;(11) Arc à lambrequin ;	
(12) Arc en anse de panier	60
Figure 2.9 : Les arcades de la mosquée El Ahmadi Caire	61
Figure 2.10 : Mihrab de la mosquée d'El Nasir Mohammed Egypte	63
Figure 2.11 : Coupole de la mosquée d'el Imam El <u>Chafii</u>	67
Figure 2.12 : Minaret d'El Kairouan	68
Figure 2.13 : Différentes formes de minarets dans le monde musulman	69
Figure 2.14 : Plan de la mosquée du Prophète à Médine avant et après le changement d'el Qibla	71
Figure 2.15 : plan de la mosquée de médina au temps du prophète	72
Figure 2.16 : Représentation de la mosquée du Prophète à Médine avant et après le changement d'el Qibla	72
Figure 2.17 : Plan de la mosquée du Prophète à Médine au temps du Calife Ottomane Benou Affane	73
Figure.2.18 : Représentation de la mosquée du Prophète à Médine au temps du Califa Othmane Benou Affane	73
Figure 2.19 : Mosquée el BASRA sur selon le plan du prophète l'an 50 Hégire	76
Figure 2.20 : Mosquée el Kufa	76
Figure 2.21 : Plan de la mosquée Dôme du rocher	78
Figure 2.22 : Coupe de la mosquée Dôme du rocher	78
Figure 2.23 : Plan de la Mosquée EL Aqsa	81
Figure 2.24 : Plan axonométrique de la mosquée El Aqsa	81
Figure 2.25 : Le plan de la grande mosquée de Damas	83
Figure 2.26 : Vue de la mosquée de damas	83
Figure 2.27 : Plan actuel de la mosquée D'El Kairouan	85
Figure 2.28 : Vue perspective de la mosquée d'El Kairouan	85
Figure 2.29 : plan de la mosquée de Cordoue	87
Figure 2.30 : Plan de la mosquée Sidi Okba	90
Figure 2.31 : Plan et coupe de la mosquée de Sedrata	91
Figure 2.32 : plan et coupe de la mosquée du vieux Ténès	93
Figure 2.33 : plan de la Kalaa de Banu Hammad	94
Figure 2.34 : plan de la mosquée de Tlemcen	97
Figure 2.35: (a) mosquée Sayyidi Abû-l-H'asan ;(b) mosquée Awlâd al-Imâm; (c): mosquée Sayyidi Ibrâhîm	98
Figure.2.36 :(a) mosquée de Sayyidi Abu Madyan ;(b) mosquée de Sayyidi-l- H'alwî ;(c) mosquée de Mançûra	110
Figure 2.37 : plan de la mosquée de la pêcherie	101
Figure.3.1 : Carte administrative de la wilaya de Mila	106
Figure.3.2 : Table de Peutinger précisant l'emplacement de la colonie de Milev	109
Figure. 3.3: La place forte de Mila.	110
Figure 3.4 : Délimitation du vieux Mila	113
Figure.3.5: Mur Ouest de l'enceinte byzantine	114
Figure.3.6 : La fontaine romaine (Ain El Bled)	114
Figure.3.7 : Bab El Bled	114
Figure.3.8: Statue de Mlou	114

Figure.3.9 : Maisons de la casbah	115
Figure.3.10 : Ruelles de la casbah.	115
Figure.3.11 : Zaouïa El Tidjania	115
Figure.3.12 : Quelques vestiges de la ville de Mila	115
Figure 3.13 : Plan du temple de Mila	116
Figure.3.14 : Mila Croquis du plan de la vieille ville d'après Delamare	118
Figure.3.15 : (a) plan de fouille à 1 mètre ; (b) plan de fouille à 3 mètres ; (c) plan de fouille à 8 mètres ;(d) coupe A-B de la fouille ;(e) coupe C-D de la fouille	119
Figure.3.16 : Les modifications qui à subit la mosquée pendant l'occupation française	122
Figure.3.17: Vue intérieure et extérieure de la salle de prière de la mosquée de Sidi Ghanem	123
Figure.3.18 : Diversité des matériaux de réemploi : colonne en marbre blanc avec un chapiteau en marbre rouge	123
Figure.3.19 : Plan de masse de la salle de prière	124
Figure.3.20: Figure mur sud antique mur ouest en moellon	125
Figure.3.21: la position du Mihrab	125
Figure.3.22 : Disposition des colonnes	125
Figure.3.23 : Disposition des colonnes	126
Figure.3.24: Exemple de chapiteaux coiffant les colonnes	126
Figure.3.25: Les arcades outrepassés et brisé	127
Figure.3.26 : Minaret de la mosquée de Sidi Ghanem	127
Figure.3.27 : Emplacement des sondages	129
Figure.3.28 : Détail du sondage A.	129
Figure.3.29 : La porte d'entrée avec le ancien seuil et le seuil à l'époque coloniale	130
Figure 3.30 : Détail du sondage B	130
Figure.3.31 : Elargissement du sondage A	132
Figure.3.32 : Reprise du sondage B	132
Figure.3.33 : Révélation du mihrab au sondage C	132
Figure.1.1. Organigramme des étapes de caractérisation des matériaux archéologiques	139
Figure.1.2.Schema d'emplacement des prélèvements	140
Figure.1.3. Techniques d'observation des matériaux	141
Figure.1.4. Préparation d'une lame mince : (a) sciage ; (b) collage de la lame du verre ; (c) rodage;(d) lame mince finie	143
Figure.1.5 photo d'un microscope à lumière polarisante.	143
Figure.1.6.Montre le schéma de principe de DTA	144
Figure.1.7. Principes de mesure du DTA	144
Figure 1.8. Schéma de principe du différentiel horizontal TG/ DTA	146
Figure.1.9. Analyseur type ATG-DSC Q600 ? TA Instruments	146
Figure.1.10.Principe de la fluorescence X	148
Figure.1.11. Préparation d'une perle en verre	149
Figure.1.12. Spectromètre modèle Gold Award, l'EDX-7000P Shimadzu	150
Figure.1.13. Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés d'une distance d	151

Figure.1.14. Échantillon de poudre sur support	152
Figure.1.15. Diffractomètre sur poudre	152
Figure.1.16. Zoom autour du détecteur	153
Figure.1.17. Poire d'interaction	153
Figure.1.18. Applications des images en électrons rétrodiffusés et de la microanalyse de rayons X pour l'étude de la matière picturale	154
Figure.1.19. Cartographie X d'une corrosion	155
Figure.1.20. Photographie de l'appareil MEB équipé d'un détecteur EDS	156
Figure.1.21 : Schéma de bandes montrant : a) la création de charges libres due à l'irradiation et b) leur piégeage dans des défauts cristallins (P : piège, CL : centre luminogène, E profondeur du piège)	157
Figure.1.22. Processus de recombinaison électron-trou selon le modèle de Schön-Klasens (a) et de Bräunlich Scharmann (b)	157
Figure 1.23. Signal d'OSL d'un échantillon de quartz, enregistré après une préchauffe de 10s à 260°C	158
Figure.1.24: Schéma du principe de la datation par la luminescence (d'après Aitken, 1998).	158
Figure 1.25. Protocole SAR proposé par Murray and Wintle (2000a)	161
Fig1.26. Principe de mesure de la luminescence par la méthode SAR.	161
Fig1.27. Instrumentation Risø de type TL/OSL-DA-20,	161
Fig.1.28. Table porte disques	162
Fig1.29. Disque porte échantillon	162
Figure.1.30. Principe de la méthode ICP-MS	164
Figure.1.31. Analyseur ICP-MS Série 7700 (Agilent Technologies).	165
Figure.1.32. Principe d'un Spectrométrie Gamma	166
Figure.1.33. Spectromètre gamma, Eurisys Measurements brand, model EGPC 200 P17	168
Figure.2.1 Fissuration du soubassement d'une colonne suivi suite à un effondrement du mur Nord	173
Figure.2.2 Fissure sur les pierres du mur antique Sud.	174
Figure.2.3 Fissuration dans la maçonnerie sur l'angle sud-est de la salle de prière.	175
Figure.2.4 Effondrement d'une arcade sur les deux dernières colonnes de la première nef.	175
figure.2.5 Effondrement du plancher, fissuration de l'arc et fissuration de la maçonnerie de la façade Est.	176
Figure.2.6 Désaxement des colonnes sous le poids du plancher.	176
Figure.2.7 Efflorescence des sels sur la surface des pierres du mur antique	177
Figure.2.8. Formation des plaques sur la surface des pierres du mur Nord	177
Figure 2.9. Infiltration des eaux de pluie à travers le mur Nord de la salle de prière.	178
Figure.2.10. Erosion d'une maçonnerie en adobe sous l'effet des ruissèlements d'eau.	178
Figure.2.11. Erosion et désagrégation des briques et du mortier de chaux suite aux infiltrations de pluies.	179
Figure.2.12: Présence des végétations du au manqué d'entretien	180
Figure.2.13. Reste des pigeons sur la pierre.	180
Figure.2.14. Présence des lichens sur murs de la salle de prière.	181
Figure.2.15. Utilisation du ciment moderne sur la façade extérieure de la mosquée.	182
Figure.2.16. Pilier à l'intérieure de la salle de prière touché par cette altération.	183

Figure.2.17. Vue de face et vue de profil d'une pierre altérée.	183
Figure.2.18. Représentation d'une section polie montrant les différentes zones.	184
Figure.2.19. Zone $Z_{01}$ sous microscope polarisant en LP à gauche et LPA à droite.	185
Figure.2.20. Zone $Z_{02}$ sous microscope polarisant en LP à gauche et LPA à droite.	185
Figure.2.21. Zone $Z_{03}$ sous microscope polarisant en LP à gauche et LPA à droite.	186
Figure.2.22. Analyse minéralogique par DRX sur la Zone $Z_{01}$ .	186
Figure.2.23. Analyse minéralogique par DRX sur la Zone $Z_{02}$ .	187
Figure.2.24. Analyse minéralogique par DRX sur la Zone $Z_{03}$ .	187
Figure.2.25. Emplacement du thermo-hygromètre à l'intérieur de la salle de prière.	190
Figure.2.26. Résultats de prélèvement de thermo-hygromètre.	190
Figure.2.27. Valeurs moyennes de la température et de l'humidité, Année 2013.	191
Figure.2.28. L'échantillon de départ.	192
Figure.2.29. L'échantillon après 50 cycles.	192
Figure.2.30. L'échantillon après 100 cycles.	192
Figure.2.31. Stabilisation du terrain par la chaux.	193
Figure.2.32. Protection par des parpaquets en bois du puits Sud	194
Figure.2.33. Protection du puits central de la salle de prière.	194
Figure.2.34. Réfection de la toiture endommagée.	195
Figure.2.35. Maçonnerie refaite par la brique pleine et le mortier de chaux.	195
Figure.2.36. Consolidation des parties endommagées par la pierre et le mortier	196
Figure.2.37. Mise en place des portes et des fenêtres	196
Figure.2.38. Opération de désherbage et d'entretien du site.	197
Figure.2.39. La passerelle et une partie des tirants manquants.	198
Figure.2.40. Schéma de procédé de traitement des remontées capillaires par une barrière étanche	199
Figure.2.41. Colonisation des micro-organismes à l'intérieur de la salle de prière.	200
Figure.3.1. Schéma de l'enceinte de la vieille ville de Mila réalisée par Delamare montrant l'emplacement de la mosquée de Sidi Ghanem et Bab el Hadid	205
Figure.3.2. Schéma de l'enceinte de la vieille ville de Mila montrant l'emplacement de la mosquée de Sidi Ghanem et Bab el Hadid en 1937	206
Figure.3.3. Schéma actuel de l'enceinte de la vieille ville de Mila montrant l'emplacement de la mosquée de Sidi Ghanem et Bab el Hadid	206
Figure.3.4. Zoom sur le plan de la mosquée de Sidi Ghanem de 1840	207
Figure.3.5. Photographie montrant le minaret de la mosquée de Sidi Ghanem par Delamare et Bab El Hadid	208
Figure.3.6. Zoom sur le plan de la mosquée de Sidi Ghanem de 1840	208
Figure.3.7. Zoom sur le plan de la mosquée de Sidi Ghanem de 1937	209
Figure.3.8. Plan de toiture actuel de la mosquée	209
Figure.3.9. Détail montrant la maçonnerie de la construction (01) et le mur Est de la grande salle	210
Figure.3.10. Détail montrant la maçonnerie (02) et le mur Ouest de la grande salle	210
Figure.3.11. Plan de masse actuel de la mosquée	211
Figure.3.12. Plan de masse de la mosquée avant l'aménagement des français	211
Figure.3.13. Plan du premier étage	212

Figure 3.14. Photographies montrant le plancher et le toit modern	212
Figure 3.15. Analyse stratigraphique à l'intérieur de la salle de prière	213
Figure 3.16. Détail des unités stratigraphiques UST1 et UST2	213
Figure 3.17. Salle de prière, montrant la modification de la toiture	214
Figure 3.18. Plan de la mosquée avant l'aménagement colonial	215
Figure 3.19. Vue intérieure et extérieure du mihrab	216
Figure 3.20. Le nouveau mihrab au centre du mur Sud	216
Figure 3.21. Mihrab vu de l'extérieur avec la présence d'une maçonnerie modern	217
Figure 3.22. Petite fenêtre au-dessus du Mihrab bouchée par une maçonnerie de moellons	217
Figure 3.23. Porte à droite du Mihrab bouchée par une maçonnerie de moellons	218
Figure 3.24. Porte à droite du Mihrab bouchée par une maçonnerie de moellons	218
Figure 3.25. La position de la construction	219
Figure 3.26. Le mur nord de la petite bâtisse	219
Figure 3.27. Détail de l'unité stratigraphique N°01	220
Figure 3.28. Détail de l'unité stratigraphique N°02	220
Figure 3.29. Détail de l'unité stratigraphique N°03	221
Figure 3.30. Mur de la bâtisse adossé au mur sud de la salle de prière.	221
Figure 3.31. Détails des unités stratigraphiques du mur sud de la petite bâtisse.	222
Figure 3.32. Mur Sud vue de l'extérieure...	222
Figure 3.33. L'angle sud-ouest qui en présence de pierres d'angle qui affirme les contemporanéités des deux murs	223
Figure 3.34. Vue de l'angle Nord-Ouest de la salle de prière	224
Figure 3.35. Localisation des prélèvements des échantillons Tcp01 et Tcp02	225
Figure 3.36. Evolution de la luminescence avec le temps	227
Figure 3.37. Vue macroscopique du TCP01 et TCP02 à droite	227
Figure 3.38. Vue macroscopique sur section polies des deux terres cuites à gauche Tcp01 et Tcp02 à droite	228
Figure 3.39. Vue à loupe binoculaire des deux échantillons Tcp01 et Tcp02	228
Figure 3.40. Diffractogramme de l'échantillon Tcp01	229
Figure 3.41. Diffractogramme de l'échantillon Tcp02	229
Figure 3.42. Cartographie X du quartz de l'échantillon TCp01	230
Figure 3.43. Spectre 02 du quartz	230
Figure 3.44. Cartographie X du quartz de l'échantillon TCp02	231
Figure 3.45. Spectre 02 du quartz	231
Figure 3.46. Chronologique de l'édification de la mosquée	242
Figure 3.47. Chronologique de modification de la mosquée	243
Fig.4.1. Emplacement des prélèvements	249
Fig.4.2. Technique de construction mur de fondation Sud.	250
Fig.4.3. Section polie la pierre Pfs	250
Fig.4.4. Diffractogramme de la pierre Pfs	251
Fig.4.5. Vue au microscope polarisant de la pierre Pfs à gauche en LP, à droite en LPA	251
Fig.4.6. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mfs	252
Fig.4.7. Diffractogramme des rayons X du mortier Mfs	253

Fig.4.8.Analyse thermique simultanée du mortier Mfs	254
Fig.4.9.Spectre EDX du mortier Mfs	254
Fig.4.10.Cartographie X du mortier Mfs.	255
Fig.4.11. Technique de la mise en œuvre des fondations centre.	256
Fig.4.12.Section polie de la pierre Pfc	256
Fig.4.13. Diffractogramme de la pierre Pfc.	257
Fig.4.14.Vue au microscope polarisant de la pierre Pfc à gauche en LP, à droite en LPA.	257
Fig.4.15.Vue sous loupe binoculaire du mortier Mfc	258
Fig.4.16.Diffractogramme des rayons X du mortier Mfc	259
Fig.4.17.Courbe de l'analyse thermique simultanée du mortier Mfc	260
Fig.4.18.Spectre EDX du mortier Mfc	260
Fig.4.19.Cartographie X du mortier Mfc	261
Fig.4.20. Technique de construction mur de fondation Nord.	262
Fig.4.21. Section polie de la pierre Pfn	262
Fig.4.22.Diffractogramme de la pierre Pfn	263
Fig.4.23.Vue au microscope polarisant de la pierre Pfn à gauche en LP, à droite en LPA.	263
Fig.4.24.Vue sous loupe binoculaire du mortier Mfn	264
Fig.4.25.Diffractogramme des rayons X du mortier Mfn	265
Fig.4.26. Techniques de maçonnerie du mur de l'enceinte.	266
Fig.4.27.Echantillonnage de pierre et de mortier sur le mur de l'enceinte	266
Fig.4.28.Section polie de la pierre Pm01	266
Fig.4.29.Diffractogramme de la pierre Pm01	267
Fig.4.30.Vue au microscope polarisant de la pierre Pm01 à gauche en LP, à droite en LPA.	267
Fig.4.31.Vue sous loupe binoculaire du mortier Mm01	268
Fig.4.32.Diffractogramme des rayons X du mortier Mm01	269
Fig.4.33.Courbe de l'analyse thermique simultanée du mortier Mm01	270
Fig.4.34.Spectre des éléments chimique du mortier Mm01	270
Fig.4.35.Cartographie X du mortier Mm01	271
Fig.4.36. Section polie de la pierre Pm02	272
Fig.4.37. Diffractogramme de la pierre Pm02	272
Fig.4.38.Vue au microscope de la pierre Pm02 à gauche en LP, à droite en LPA.	273
Fig.4.39. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mm02	273
Fig.4.40. Diffractogramme des rayons X du mortier Mm02	274
Fig.4.41.Courbe de l'analyse thermique simultanée	274
Fig.4.42. Spectre des rayons x du mortier Mm02	275
Fig.4.43.Cartographie des images X du mortier Mm02	276
Fig.4.44. Technique de maçonnerie de la construction.	277
Fig.4.45. Section polie de la pierre Pmc01	277
Fig.4.46. Diffractogramme de la pierre Pmc	278
Fig.4.47.Vue au microscope polarisant de la pierre Pmc à gauche en LP, au centre en LPA et en lumière réfléchié à droite.	278
Fig.4.48.Vue sous loupe binoculaire du mortier Mpc	279
Fig.4.49.Diffractogramme des rayons X du mortier Mpc	280
Fig.4.50.Courbe de l'analyse thermique simultanée	280

Fig.4.51. Spectre des rayons X du mortier Mpc	281
Fig.4.52. Cartographie X du mortier Mpc	282

### Liste des tableaux :

Tableau 1.1: Valeur de rayure en mm pour la pierre calcaire	05
Tableau 1.2. Composition minéralogiques des échantillons de briques des édifices de la ville d'Alger	33
Tableau 1.3. Résultats des différents essais physiques des échantillons de briques des édifices la ville d'Alger	34
Tableau 1.4 : La dureté de Mohs des échantillons de briques de la ville d'Alger	34
Tableau 1.5 : Résultats des essais mécaniques des échantillons de briques	34
Tableau 2.1.Résultat de l'analyse chimique.	188
Tableau 2.2.Résultats des analyses pétrophysique.	189
Tableau 3.1.Analyse élémentaire du spectre 02	230
Tableau 3.2.Analyse élémentaire du spectre 02	231
Tableau 3.3.Protocole de mesure de la dose archéologique des grains fins extraits des terres cuites architecturales pour une prise d'essai (disque contenant un dépôt en couche mince de grains fins de quartz)	235
Tableau 3.4. Détermination des conditions de mesure de la dose archéologique des TCA sur la base des rapports de recyclage de l'OSL	235
Tableau 3.5. Détermination des doses équivalentes des TCA. Le rapport de recyclage a été réévalué à partir des mesures SAR. Le tableau présente la moyenne et l'écart-type sur la moyenne de ce rapport, données qui sont donc évaluées à partir d'un plus grand nombre d'aliqots que lors de l'étude des conditions de préchauffage. Les valeurs mesurées, proches de 1, confirment a posteriori le bien fondé des choix de préchauffage	236
Tableau 3.6. Humidité et teneurs en radioéléments des échantillons de brique. L'incertitude correspond à un écart-type	238
Tableau 3.7.Doses spécifiques annuelles issues de Guérin et al., 2011 (en mGy/an). Nous différencions différents fragments des séries U pour tenir compte du scénario de déséquilibre en uranium des échantillons (déséquilibre constant dans le temps ayant pour origine la mobilité de l'élément U et celle du radon-222)	240
Tableau 3.8.Composantes de la dose annuelle et dose annuelle totale	241
Tableau 3.9. Résultats de datation par OSL des deux terres cuites architecturales provenant de la mosquée Sidi Ghanem	241
Tableau 4.1.Codification des prélèvements	249
Tableau 4.2.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pfs	252
Tableau 4.3.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pfc	258
Tableau 4.4.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pfc	264
Tableau 4.5.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pm01	268
Tableau 4.6.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pm02	273
Tableau 4.7.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pmc	279

## Liste des abréviations

% : Pourcent

°C : Degré Celsius

µl: Microlitre

µm : Micromètre

Å : Angström

abs : Absorption

Ap-JC: Après Jésus – Christ.

ATD : L'analyse thermique différentielle

ATS : Analyse thermique simultanée(ATS)

Av-JC: Avant Jésus – Christ.

c : Vitesse de la lumière (3.108 m/s).

cm : Centimètre.

d ; Distance réticulaire

DC : Courant continu

E : Energie

EDS: Energy Dispersive Spectroscopy

ED-XRF: Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry

EN: Norme européenne

Fig : Figure

g/cm<sup>3</sup> : Gramme par centimètre cube

g: Gramme

Gy: Gray unité de mesure des radiations

Gy/an: Gray par an

HPGe : High Purity Germanium

h : Constante de Planck (6,6.10<sup>-34</sup> J.s)

H : Hégire

hkl : indices de Miller

HPGe : Détecteur au germanium de haute pureté

Ibid : Au même endroit, dans le même passage (d'un texte déjà cité)

ICP-MS : Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif

J.s : Joule par seconde

Kg : Kilogramme.

Km : Kilomètre

Km<sup>2</sup> : Kilomètre carré

Kα : Raie de spectre

λ : longueur d'onde.

LN : Lumière naturelle.

LP : Lumière polarisée

LPA : Lumière polarisée analysée.

l.min-1 : Litre par minute

m : Mètre

m/s : mètre par seconde

m/z : Masse sur la charge.

m<sup>2</sup> : Mètre carré  
Mbar : Millibar  
MEB: Microscopie électronique à balayage  
Mev : Mégaélectronvolt  
mg: Milligramme.  
mGy/an: Milligray par an  
mL: Millilitre  
mm/ Millimètre  
MPa : Mégapascal  
Mv: Masse volumique.  
mW: Milliwatt  
nm : Nanomètre  
Op cit : Ouvrage déjà cité  
OSL: Luminescence optiquement stimulée  
ppm: Partie par million  
Pt: Porosité totale  
Qsssl : Que le salut soit sur lui  
Rc : Résistance à la compression.  
RF : Courant alternatif  
Rf : Résistance à la flexion.  
s :Seconde  
SAR: Single-Aliquot Regenerative  
t: Temps  
Tab : Tableau  
TG : Thermogravimétrie  
UST: Unité stratigraphique.  
WD-XRF: Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry  
XRF : Spectrométrie par fluorescence des rayons X  
 $\varepsilon$  : Déformation  
 $\theta$ : angle  
 $\rho_s$ : Masse volumique spécifique  
 $\rho_v$  : Masse volumique apparente  
 $\sigma$  : Contrainte

## • Introduction générale :

Le patrimoine culturel et civilisationnel islamique constitue le répertoire et la mémoire vivante incarnant le génie créateur de l'oumma et véhiculant ses valeurs pérennes et les fondements de son identité propre qui la distingue de toutes les autres civilisations et cultures. La tradition architecturale représente à cet égard l'une des contributions les plus riches et les plus magnifiques que la civilisation islamique apporte au patrimoine universel. L'architecture islamique, avec ce qu'elle recèle comme valeurs esthétiques et artistiques, témoigne de façon éclatante de la splendeur de notre civilisation, du talent et de l'esprit inventif dont nos architectes, nos maîtres maçons et nos savants ont toujours fait preuve. Ce génie créateur hors du commun a donné naissance, au fil des siècles, à des monuments et autres merveilles d'architecture qui défient le temps et que l'on peut admirer un peu partout dans le monde, qu'il s'agisse des établissements religieux et culturels comme les mosquées, les forteresses et les citadelles, ou des institutions scientifiques et d'enseignement telles les médersas et les mosquées universités.

Dès l'origine, la mosquée a été le cœur de la cité islamique il a constitué, en même temps que l'institution primordiale de l'Islam, le lieu culturel qui caractérise la civilisation islamique.

Les mosquées diffèrent, bien entendu, selon l'époque et le lieu, mais elles reflètent toutes, à leur manière, l'unité du monde musulman, non seulement en tant que lieux de prière, mais comme centres de la vie autour desquels les cités se développèrent. La mosquée est un lieu qui n'est pas seulement destiné à réunir les fidèles pour la cérémonie de la prière. Espace majeur de la cité islamique, elle fait souvent partie d'un complexe qui rassemble des bâtiments destinés à de multiples usages culturels. C'est dans les mosquées qu'on trouve des exemples de nombreuses formes artistiques : céramiques, carreaux de faïence émaillée, calligraphie, verrerie, tissus, tapis, sculptures sur pierre et sur bois, métaux ouvragés, stuc et arts du livre.

La ville Mila fut une ville importante dans l'antiquité, elle constitue un carrefour de plusieurs civilisations, passant par l'époque phénicienne, romaine, byzantine, musulmane et ottomane, ces civilisations ont donné à cette ville historique un aspect cosmopolite qui représente une perle archéologique à explorer.

Selon Stéphane Gsell « *Procopé atteste que Mila fut fortifié au temps de l'empereur Justinien* »<sup>1</sup>. Ibn Khaldoun a cité Mila parmi les villes qui appartiennent à la puissante tribu berbère des Ketama. En 1064,

---

<sup>1</sup>Gsell Stéphane - Les Monuments Antiques de l'Algérie - Tome II, Paris 1901, page 366.

Abū Ubayd al-Bakrī la décrit qu'elle existait de son temps. Elle est entourée, dit-il, d'une muraille de pierres autour de laquelle existe un faubourg; elle renferme une mosquée, des bains et des marchés<sup>2</sup>. Ibn Idriss al-Qurtubi al-Hassani, en 1154, après avoir avancé que cette ville n'est éloignée de Constantine que de 18 milles<sup>3</sup>.

L'enceinte de la ville, dont le plan irrégulier ne peut guère s'expliquer que par le désir d'enfermer des édifices d'une époque plus ancienne, à un développement d'environ 1.200 mètres d'après Delamare, avec quelques rectifications de détail. Réparée sur bien des points, mais parfaitement distincte dans toutes ses parties<sup>4</sup>.

A l'intérieur de l'enceinte, ce trouve une mosquée, appelé mosquée de Sidi Ghanem ou mosquée de Abou al-Mouhajir Dinar al-Ansari, que certains historiens tel que Mobarek EL Mili<sup>5</sup> et Abū al-Maḥāsīn Jamāl ad-Dīn Yūsuf bin at-Taḡrībīrdī attribuent même, à ce conquérant musulman la construction de cette mosquée en 59 Hégire.

### • **Problématique:**

Les études sur la mosquée de Sidi Ghanem sont rares et elles se limitent à des études historiques qui ont cité superficiellement cette mosquée, des fouilles archéologiques ont été réalisées à la fin des années soixante et qui demeurent inachevées à ce jour et qui ont révélé très peu d'informations sur l'histoire et la chronologie de construction de cet édifice. Il s'ajoute à tout cela le caractère exceptionnel de ce dernier qui est construit dans sa grande partie en pierre de réemploi, ce qui rend ce travail de recherche un travail original et plein de déficit. Cela nous a permis de formuler la problématique de notre travail:

Quelle est la chronologie de construction de l'édifice, la nature des matériaux de construction utilisés et quelle est l'état de conservation se trouve ce monument ?

De cette problématique ressort les questions secondaires suivantes :

- Dans quel état de conservation se trouve cette mosquée ?
- La mosquée nommée actuellement Sidi Ghanem est-elle la vraie mosquée *Abou al-Mouhajir Dinar al-Ansari* ? Si oui, est-elle la mosquée originelle ou elle a subi des modifications durant son usage ?
- Comment établir une chronologie d'édification et des éventuelles modifications structurales apportées à cet édifice par les civilisations qui se sont succédées dans cette ville ?
- Quels sont les différents matériaux et leurs techniques de mise en œuvre qui caractérisent chaque période chronologique ?
- Quelle est la part des sciences de datation dans l'étude de cette mosquée ?

<sup>2</sup> Tissot, ( Ch.), Géographie comparée de la province romaine d'Afrique R.S.A.C,T02,1888. Page 22.

<sup>3</sup> Dureau de La Malle, Histoire des Guerres des Romains, des Byzantins et des Vandales, Paris ,1852 .p 214-216

<sup>4</sup> Gsell, op cité, p, 366,

<sup>5</sup> مبارك بن محمد الميلي ، تاريخ الجزائر في القديم والحديث ، ج 1 ، المؤسسة الوطنية للكتاب الجزائر 1983 ، ص 284

<sup>6</sup> أبو المحاسن ابن تغري بردي ;حسن المحاضرة في ملوك مصر و القاهرة ، ص 345.

## • Objectifs :

Pour répondre aux questions posées dans la problématique, nous avons commencé par un diagnostic sur l'état de conservation de cette mosquée puis une étude stratigraphique architecturale de la mosquée, ce qui nous a permis de mettre la lumière sur les importantes modifications que l'édifice a subies jusqu'à l'arrivée à la structure initiale (primitive). Cette étude stratigraphique est complétée par des datations OSL, luminescence stimulée optiquement afin de remonter à la période de construction de ce dernier et nous avons complété ce travail par l'étude des matériaux de construction en œuvre.

Les points suivants résument nos objectifs :

- Constat d'état de conservation de la mosquée et les formes de dégradations présentes.
- Etude stratigraphique architecturale sur l'édifice suivie d'une datation par luminescence stimulée optiquement, OSL.
- Etude des matériaux de construction anciens et qui compose les unités stratigraphiques par (microscopie optique, analyse pétrographique, analyse chimique par fluorescence X, analyse minéralogique par diffraction des rayons X, DRX, analyse thermique simultanée et le microscope électronique à balayage MEB couplé au spectromètre EDS qui permettent l'analyse chimique élémentaire et cartographie des rayons X de distribution des éléments chimiques).

## • Méthodologie :

Pour réaliser les objectifs visés nous avons pensé utile de planifier notre travail de la façon suivante :

Une partie théorique précédée d'une introduction générale, en commençant par le premier chapitre qui traite l'état de connaissance sur les matériaux de construction anciens et leurs méthodes de mise en œuvre, un deuxième chapitre qui donne un aperçu général sur les mosquées anciennes dans le monde musulman et en Algérie et leurs genèses à travers une étude architecturale et architectonique et leur évolution dans le temps, un troisième chapitre qui met le contraste sur l'histoire de la ville de Mila et la mosquée de Sidi Ghanem par les sources historiques et leur stratigraphie archéologique sur la base des fouilles antérieures.

La partie pratique renferme quatre chapitres. Le premier chapitre donne la description du cortège analytique utilisée dans l'étude et la caractérisation des matériaux de construction anciens de la mosquée. Le deuxième chapitre étudie l'état de conservation de cette mosquée à différentes échelles : structurelle, physique et physico-chimique. .

Le troisième chapitre est consacré à l'étude stratigraphique architecturale de la mosquée suivi d'une analyse de datation par thermoluminescence stimulée optiquement OSL sur des briques en terre cuite, le dernier chapitre permet l'étude et la caractérisation, chimique, minéralogique pétrographique, thermique, pétrophysique et cartographie X sur les matériaux de construction de l'édifice et les méthodes de leurs mises en oeuvre une liste des figures, des tableaux et des abréviations sont présentés pour faciliter la lecture de ce manuscrit.

Nous avons clôturé notre travail par une conclusion générale et des références bibliographiques.

Un organigramme général descriptif de notre travail est présenté par le schéma 01.

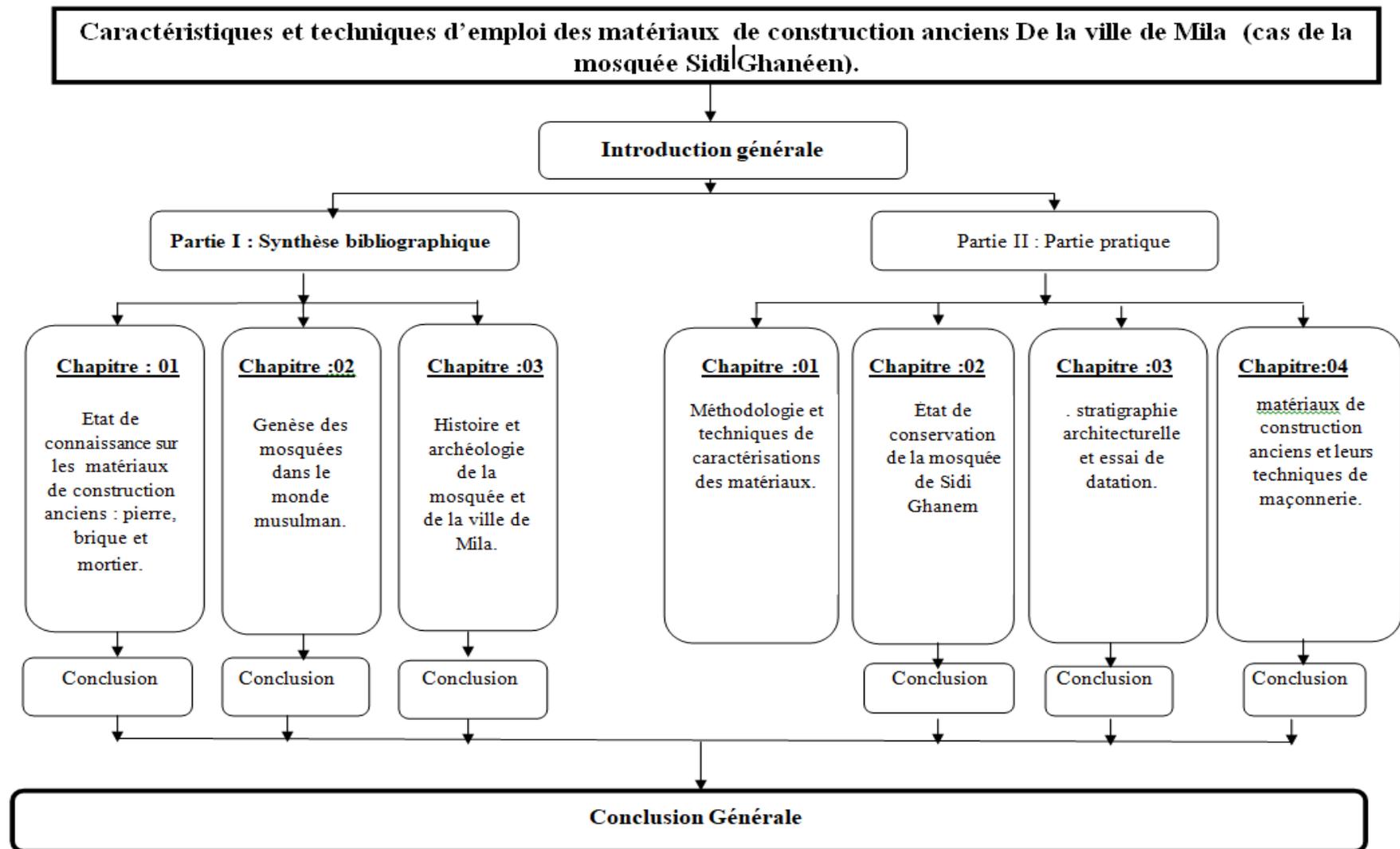


Schéma 01 : Organigramme descriptif du plan de travail général.

**PARTIE I :**

*Synthèse Bibliographique*

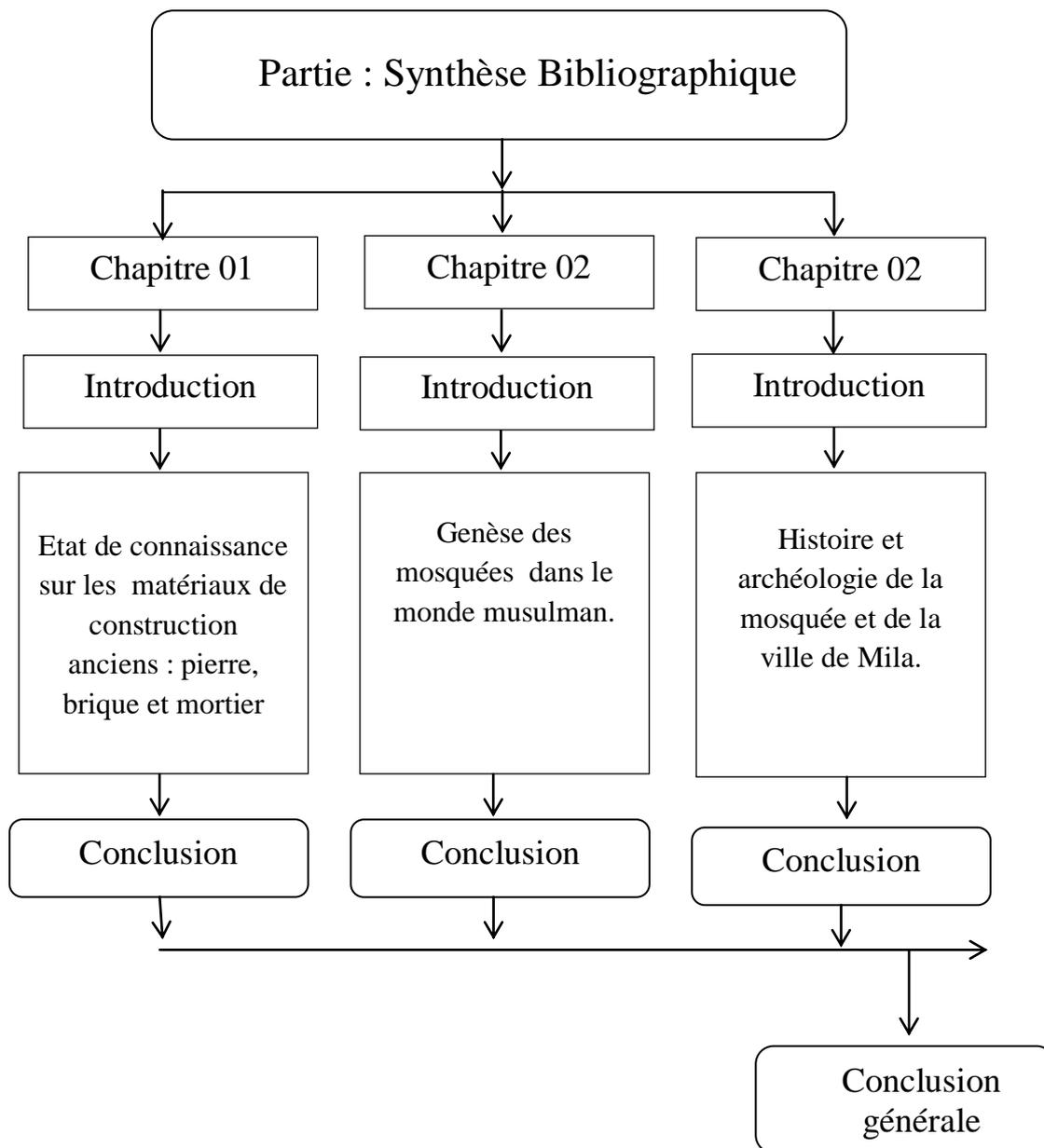


Schéma 02 : Organigramme descriptif de la partie synthèse bibliographique.

## **Chapitre 01 :**

*Etat de connaissance sur les matériaux de construction  
anciens et leurs techniques de mises en œuvre.*

## • Introduction :

La connaissance de l'histoire d'usage des caractéristiques matériaux de construction anciens est primordiale dans notre travail ce qui donne l'importance de commencer notre travail par un aperçu sur les différents types de matériaux utilisés dans le site, leurs caractéristiques, méthodes d'élaboration, leurs modes de mise en œuvre ainsi que la chronologie de leurs usage. Connaître l'histoire de l'utilisation des matériaux de construction par les anciennes civilisations et leurs techniques de mise en œuvre, allant de la période romaine ou la ville de Mila était une ville romaine importante, nous avons étudié la pierre et la brique en terre cuite comme étant les deux matériaux les plus utilisés dans l'édification de cette ancienne mosquée et nous terminons par les mortiers qui sont des matériaux qui peuvent être des éléments clé dans notre étude car la ville de son état actuel a été reconstruite par le réemploi des pierres (pierre de taille, moellons, galets, colonnes, futs, chapiteaux et probablement les briques cuites) par les byzantins et les musulmans, le seul matériaux qu'on ne peut pas utiliser deux fois est le mortier.

## 2. La pierre :

La pierre sous ses différentes formes est le matériau le plus ancien que l'homme a utilisé de la préhistoire jusqu' à une période très proche de notre ère, L'utilisation de la pierre comme matériau de construction débute tout naturellement par la collecte , en surface , de fragments minéraux délités de la masse rocheuse par l'action des intempéries et de la végétation , ou résultant d'éboulis au pied d'accidents de terrain. Ces éléments, de dimensions très variables, permettent d'élever des murs de pierre sèche. dont la stabilité est assurée par l'utilisation des blocs les plus volumineux et les plus réguliers, montant en parements et retenant un remplissage de blocaille. Les galets marins ou fluviatiles, constituent, en raison de leurs dimension et de leur régularité un matériau de choix mais leur rotondité interdit leur assemblage vif, il convient alors de faire appel à un mortier , deux produits dont la coïncidence naturelle n'est pas toujours assurée<sup>1</sup>.

Le choix d'une pierre se faisait généralement en fonction de la géologie de l'environnement immédiat des édifices<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Jean-Pierre Adam, *La construction romaine, matériaux et techniques*, éditions A. et J. Picard, 1984, page 23.

<sup>2</sup>Maria Philokyprou, *Méthode RehabiMed ;Architecture Traditionnelle Méditerranéenne ; partie 2 , La dégradation des matériaux de construction*, Page 22.

Les propriétés chimiques et physiques des pierres dépendent autant de leur genèse que du genre et de la quantité des minerais entrant dans leur composition. Ainsi, les roches éruptives, sédimentaires et métamorphiques ne sont pas les seules à se définir par des propriétés distinctes, car il en est de même des différents genres de roches appartenant à ces groupes. Leur composition minéralogique détermine leurs propriétés chimiques. Elle détermine aussi leur structure, leur texture et leurs traits physiques et mécaniques <sup>3</sup>.

### 2.1. L'extraction

Tout comme le ramassage des pierres, l'extraction commence par la mise en exploitation des affleurements de surface, (Figure.1.1) et de nombreuses carrières se limiteront, en raison de l'abondance rocheuse de certains sites à ce mode d'approvisionnement.

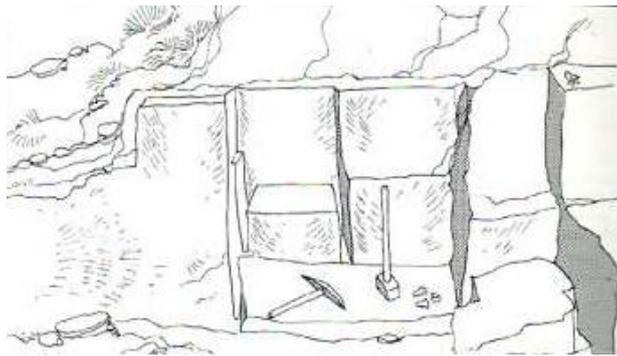


Fig.1.1.Mode d'extraction en bloc à la carrière antique <sup>4</sup>.

Les qualités physiques du matériau sont estimées traditionnellement et empiriquement par le tailleur de pierre, en fonction de la dureté de taille. La dureté est essentiellement réservée aux pierres calcaires. La détermination de la largeur de rayure fournit pour chaque matériau une valeur chiffrée de la dureté. Ceci présente l'avantage de pouvoir mettre en relation les valeurs de dureté avec celles se rapportant à des caractéristiques physiques et mécaniques. La caractéristique de dureté s'obtient par la mesure de la largeur d'une rayure faite sur la surface rectifiée d'un bloc de pierre. Le tableau 1.1 indique quelques valeurs de la largeur des rayures pour des pierres calcaires.

Tableau 1.1 : valeur de rayure en mm pour la pierre calcaire <sup>5</sup>.

Type de calcaire	Tendre	demi-ferme	Ferme	dure	Froide
Rayure en mm	>1,8	1,8-1,4	1,4-1	1-0,75	<0,75

<sup>3</sup>Wieslaw Domaslawski ; La conservation Préventive de la pierre, UNISCO 1982, page 15.

<sup>4</sup>Jean Pierre Adams, op cit., page 23.

## 2.2 Le travail de la pierre :

Lorsque la pierre débitée est relativement tendre, la lame de l'outil est dentelée et rien ne la distingue des scies à bois, pour les roches dures on utilise une lame lisse en ayant recours à un abrasif (sable), une fois le bloc équarri, (figure 1.2), le tailleur de pierre lui donnait sa forme définitive, (figure 1.3).



Fig.1.2. Bloc de pierre équarri <sup>5</sup>.

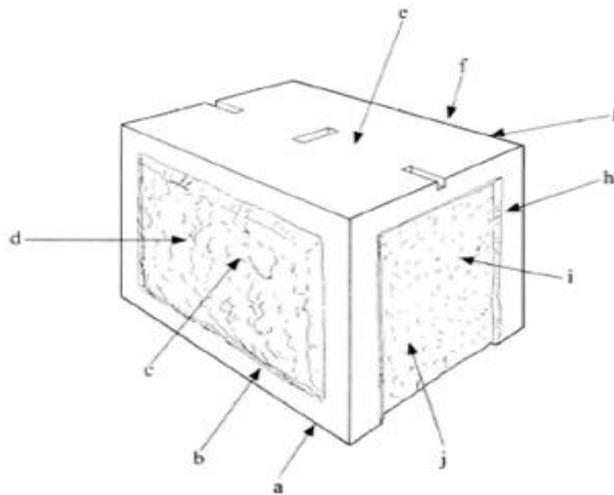


Fig.1.3. : Pierre de taille: a. lit de pose; b. ciselure périmétrale; c. face de parement; d. bossage; e. lit d'attente; f. face arrière; g. arête; h. anathyrose; i. face de joint; j. surface démaigrie <sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup>Adams, op cit., page 25.

<sup>6</sup>René Ginouvès, Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome I. Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor, école française de Rome 1985, page 304.

### 2. 3. Formes et nomenclature de la pierre utilisée dans la construction :

La nomenclature de la pierre varie selon la forme, pour les moellons elle varie en fonction du nombre de faces travaillées (figure I.4), pour la pierre de taille la nomenclature est en fonction DES dimensions de chaque face (figure.I.5) il peuvent être aussi en fonction de leur position dans le mur (figure.1.6).

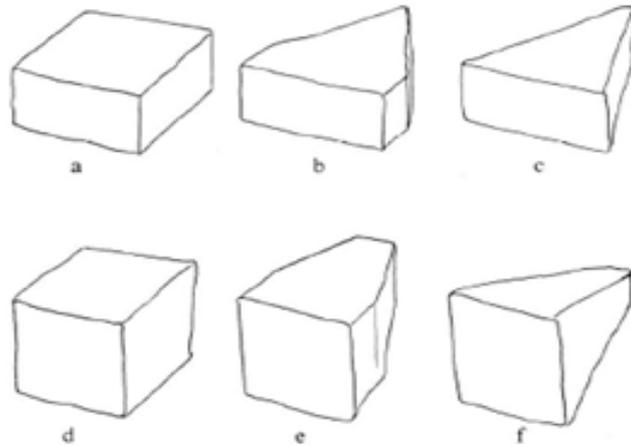


Fig.1.4. Moellons faces de joint : a. en retour d'équerre ; b. en retour d'équerre et démaigries; c. démaigries; d. en retour d'équerre; e. en retour d'équerre et démaigries avec queue abattue ; f. pyramidantes avec queue abattue <sup>7</sup>.

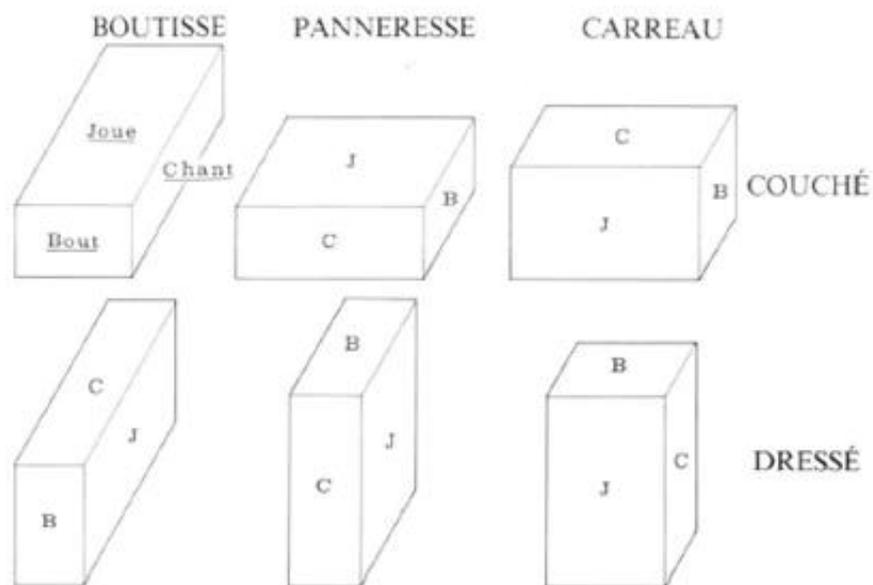


Fig.1.5.Nomenclature de la pierre de taille en fonction des dimensions de faces <sup>8</sup>.

<sup>7</sup>René Ginouvès, op cit., page 305.

<sup>8</sup>Ibid..

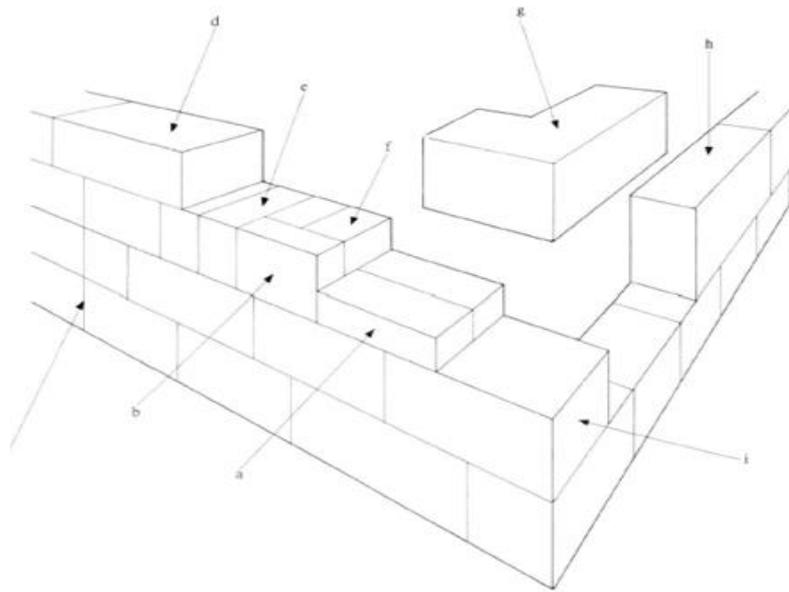


Fig.1.6.La pierre de taille dans le mur: a. panneresse; b. carreau; c. coup de sabre; d. parpaing en panneresse; e.parpaing en boutisse; f.boutisse; g. pierre d'angle en crossette; h. parpaing en carreau; j. chaîne d'angle en besace<sup>9</sup>.

## 2.4. La pierre dans le mur

### 2.4.1 Appareils homogènes

Il y a des appareils qui combinent des éléments sous leur forme originelle et/ou des éléments taillés de petites dimensions; des appareils qui mettent en œuvre des éléments de grandes dimensions taillés et ceux qui combinent des éléments moulés.

#### 2.4.1.1. Les appareils qui combinent des éléments sous leur forme originelle et/ou des éléments taillés de petites dimensions

Dans cette catégorie chaque élément pouvant être porté par un seul homme, c'est-à-dire des moellons. On regroupe parfois ces différentes variétés sous le terme **PETIT APPAREIL**<sup>10</sup>.

##### 2.4.1.1.1. Appareil incertain (OPUS INCERTUM)

Appareil mettant en œuvre des cailloux et/ou moellons de forme irrégulière, sans qu'on puisse y distinguer des assises bien différenciées,

On caractérise cet appareil d'une part d'après la technique de liaison entre ses éléments, d'autre part d'après le degré de régularité des éléments utilisés. On a ainsi :

- Incertain fruste: il est composé de cailloux et de moellons bruts de dimensions diverses.
- Incertum régulier : il utilise des moellons à face de parement travaillée, de dimensions assez voisines, avec des arêtes qui se trouvent assez fréquemment en contact, (figure. I.7) et figure. (I.8).

<sup>09</sup> René Ginouvès, op cit., page 305.

<sup>10</sup>Jan Pierre Adams, op cit., page 134.

- Incertum soigné: il utilise des moellons travaillés sur plusieurs faces, mais dont les joints assez fins ne dessinent pas un schéma géométrique reconnaissable <sup>11</sup>.

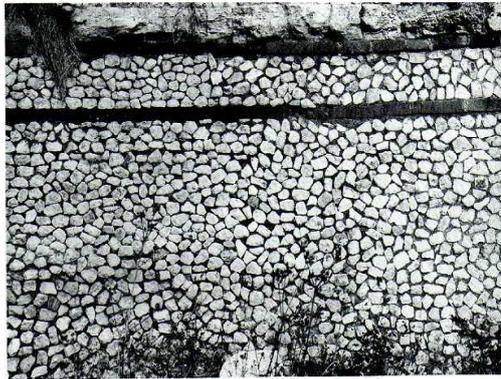


Fig.1.7. Opus incertum<sup>12</sup>.

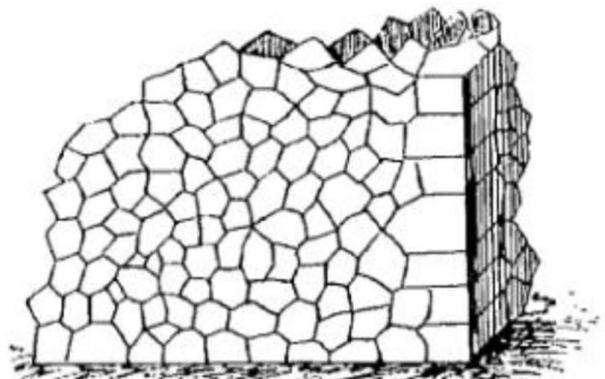


Fig.1.8. Opus incertum<sup>13</sup>.

**2.4.1.1.2 Appareil quasi-réticulé (opus quasi reticulatum):** appareil intermédiaire entre l'incertum et le réticulé: Est fait de moellons travaillés sur plusieurs faces, plus ou moins quadrangulaires ou trapézoïdaux en parement, disposés en assises peu régulières avec des joints obliques par rapport à l'horizontale <sup>14</sup> (figure .I.9).

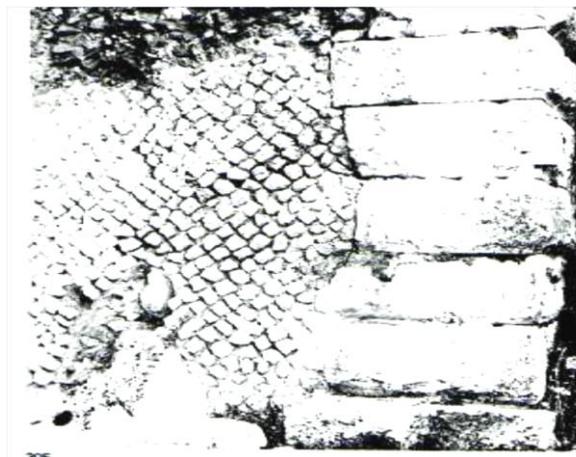


Fig.1.9. Opus quasi reticulatum<sup>15</sup>.

<sup>11</sup> René Ginouvès, op cit., page 305.

<sup>12</sup> Germain de Montauzan, Les Aqueducs antiques, DJVU 1908, page 239.

<sup>13</sup> Jan Pierre Adams ; op cit., page 127

<sup>14</sup> René Ginouvès, op cit., page 312.

<sup>15</sup> Jan Pierre Adams ; op cit, page 141.

### 2.4.1.1.3. Appareil réticulé (*opus mixtum*)

L'*opus reliculatum*, formé de petits éléments à base carrée enparement, mais disposés en diagonale, de façon à donner l'apparence d'un tissu à mailles<sup>15</sup>, d'un réseau (figure.1.10) et (figure 1.11).

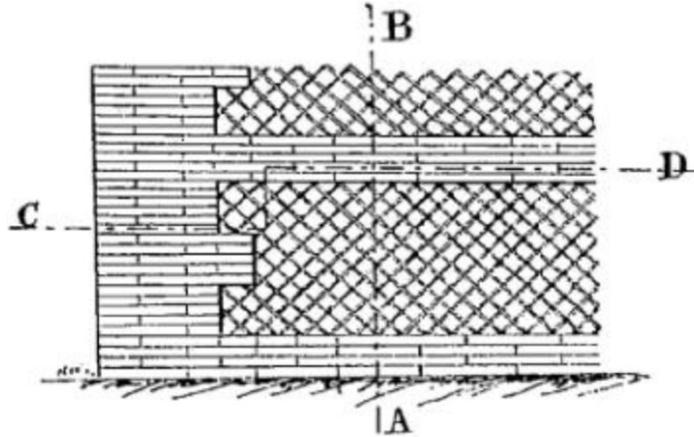


Fig.1.10. *Opus mixtum*<sup>16</sup>.

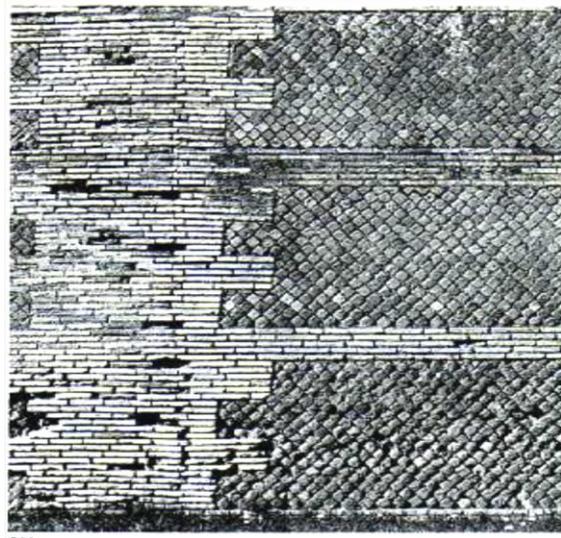


Fig.1.11. *Opus mixtum*<sup>17</sup>.

### 2.2.1.1.4 Appareil à moellons quadrangulaires (*opus vittatum*)

Les moellons travaillés sont parallélépipédiques, et disposés en assises horizontales, avec une volonté évidente de faire alterner les joints.

<sup>15</sup> Germain de Montauzan, op cit., page 274.

<sup>16</sup> Ibid.,.

<sup>17</sup> Adams, op cit., page 155.

Dans cet appareil, les assises peuvent être de hauteur égale ou inégale, (figure.1.12), et on peut trouver des hauteurs décroissantes du bas vers le haut <sup>18</sup>.



Fig.1.12.Opus vitatum<sup>19</sup>.

## 2.4.1.2 Appareils utilisant des éléments taillés de grandes dimensions (Grand appareil)

### 2.4.1.2.1 Appareil cyclopéen

Appareil formé de blocs bruts ou à peine dégrossis de très grandes dimensions, calés par des cailloux ou des éclats, et normalement liés par un mortier de terre. On appelle : Bouchon ou cale, chacun des éléments de dimension réduite qui contribue à boucher l'intervalle entre les gros blocs, tout en les maintenant en place.

Cet appareil est susceptible d'un certain nombre de variantes

- Appareil Polygonal appareil formé de blocs présentant en général plus de quatre faces de joint. On peut aussi désigner l'appareil par l'expression opus siliceum<sup>20</sup>, (figure. 1.13).



Fig.1.13.Opus siliceum<sup>21</sup>.

---

<sup>18</sup> René Ginouvès, op cit., page 96.

<sup>19</sup> Helene Dessales, petit catalogue des techniques de la construction romaine, école normale supérieure, France, page 4.

<sup>20</sup> René Ginouvès, op cit., page 97.

<sup>21</sup> Adams, op cit., page 113.

#### 2.4.1.2.2 Polygonal régulier

Il est formé de blocs de taille analogue, avec des joints bien ajustés. Opus quadratum (figure 1.14) et (figure 1.15)

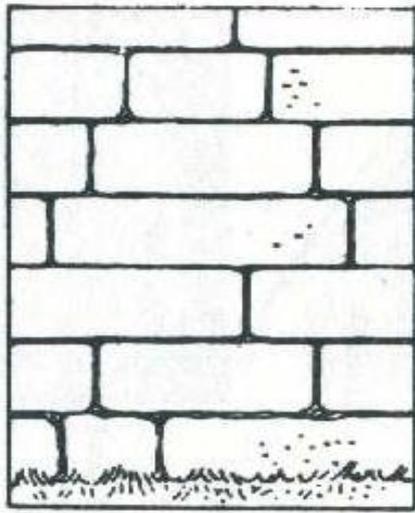


Fig. 1.14. Opus quadratum<sup>22</sup>.



Fig. 1.15. Opus quadratum<sup>23</sup>.

#### 2.4.2. Appareils hétérogènes :

Nous regroupons sous cette appellation des appareils qui mêlent des systèmes de construction différents, soit par la nature du matériau, soit par le rôle différent confié aux divers éléments.

**2.4.2.1. Opus mixtum :** appareil combinant des parties réalisées en briques cuites avec des parties réalisées en Moellons et éventuellement en blocs.

L'opus mixtum comporte un certain nombre de variétés, selon la disposition des surfaces de briques et de pierres :

- **Opus mixtum à bandes :** ici une ou plusieurs assises de pierre alternent avec une ou plusieurs assises de briques, (figure I.16).
- **Opus mixtum à panneaux :** ici les surfaces de pierre forment des panneaux entourés de briques, (figure I.17).
- **Opus mixtum décoratif :** il présente des arrangements variés, par exemple des losanges de pierre dans une paroi de briques, ou un dessin en forme de fleur.
- **Appareil à cadres et remplissage :** Cet appareil combine une structure portante et un remplissage : il évoque donc le *PAN DE BOIS* {supra, dans la mesure où tous les éléments n'y jouent pas un même rôle: son emploi dans une certaine zone de l'Afrique du Nord l'a fait appeler aussi *APPAREIL PUNIQUE*<sup>24</sup>.

---

<sup>22</sup> Germain de Montauzan, op cit, page 277.

<sup>23</sup> Adams, op cité, p 121

<sup>24</sup> René Ginouvès, op cit., page 101.



Fig.1.16. Opus mixtum à bandes<sup>25</sup>.



Fig.1.17. Opus mixtum à panneaux<sup>26</sup>.

## 2.5. La pierre dans les arcades :

### 2.5.1. Définition :

ARC (m) : construction occupant l'épaisseur d'un mur, franchissant un certain espace normalement vide, et répondant à l'une au moins des deux conditions suivantes

- condition technique : être appareillé de telle manière que la construction travaille à la compression,
- condition formelle : présenter un creux au soffite.

---

<sup>26</sup> Helene Dessales, op cit, page 5.

<sup>27</sup> Ibid.

### 2.5.2 Parties de l'arc:

- Intrados (m) : surface intérieure (inférieure) de l'arc.
- Extradados (m) : surface extérieure (supérieure) de l'arc.

L'extrados peut être dit parallèle s'il suit la courbure de l'intrados, sinon il est plat, ou à degrés (figure I.18).

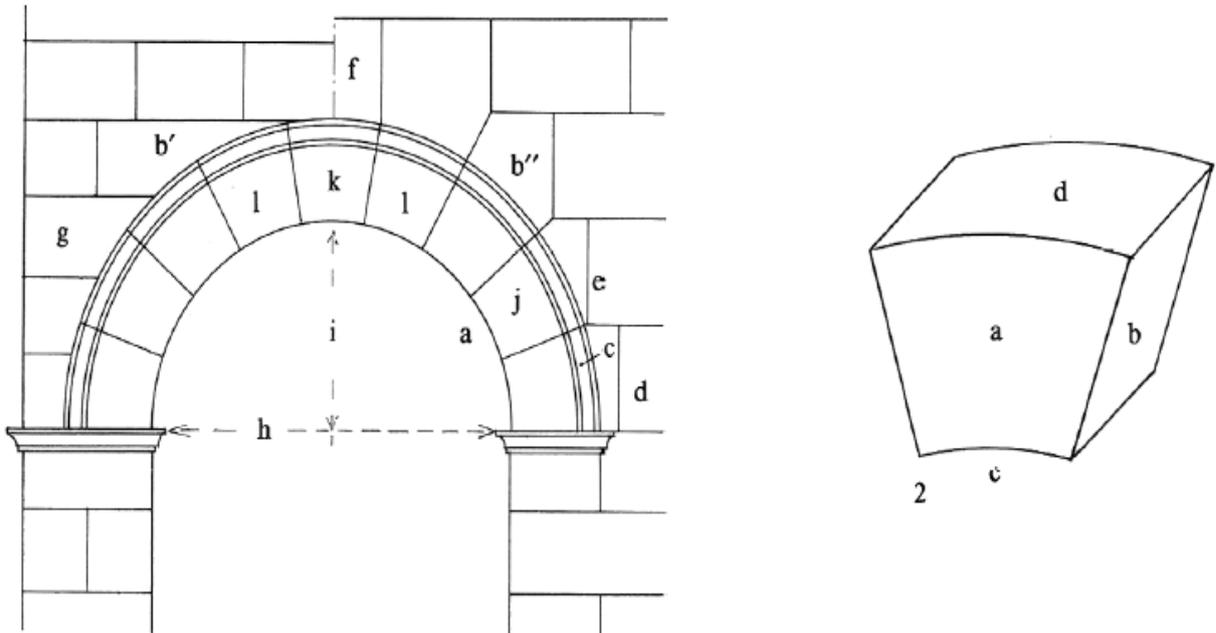


Fig.1.18. (1). *parties de l'arc*. a : intrados ; b : extrados (b' : extradossé; b'' : à degrés); e : archivolte; d : naissance; e : rein; f : sommets; g : écoinçon; h : portée; i : flèche; j : voussoir; k : clef; l : contreclef.

(2). *Voussoir* : a : tête; b : lit de coupe; c : douelle d'intrados; d : douelle d'extrados <sup>28</sup>.

- Archivolte (f) : décoration suivant en façade la ligne de l'arc; le mot est évidemment construit de la même manière que «architrave».

L'archivolte peut présenter une mouluration d'architrave (ionique, à fascies), ou un décor plus complexe. S'il y a continuité entre cette mouluration et celle d'une architrave, on a affaire à l'arc Syrien,

- Naissance (f) : plan horizontal séparant l'arc des éléments sur lesquels il repose ; on peut utiliser le mot Retombée.
- Rein (m) : zone située entre la naissance de l'arc et la moitié de son parcours vers le sommet.

<sup>28</sup> René Ginouvès, op cit., page 330.

<sup>29</sup> Adams, op cit., page 166. Sommet (m) : point le plus haut de l'arc.

- Écoinçon (m) : zone du mur comprise entre les extrados de deux arcs conjoints, ou entre un extrados et un élément vertical.

### 2.5.3 Formes de l'arc:

- *Arc plat* : forme limite de l'ARC, dont l'intradoses horizontal.

*Arc dièdre* : celui dont le tracé forme un triangle. L'arc dièdre est dit *à degrés* si les côtés du triangle présentent une série de plans alternativement horizontaux et verticaux.

Il est dit *à degrés abattus* si l'angle saillant de ces degrés est tranché en biseau.

Il est dit *arc dièdre émoussé* si la liaison entre les deux obliques du tracé se fait non par une pointe, mais par un arrondi.

- *Arc surbaissé*: arc dont le tracé est une courbe inférieure au demi-cercle.
- *Arc en plein cintre* : arc dont le tracé est un demi-cercle, ou à peu près.
- *Arc surhaussé* : expression désignant un arc dont le tracé passe au-dessus du demi-cercle.
- *Arc en plein cintre surhaussé* : dont le demi-cercle se prolonge vers le bas par des retombées verticales.
- *Arc outrepassé*, syn. arc en fer-à-cheval : arc dont le tracé est un segment de cercle supérieur au demi-cercle.
- *Arc en parabole* : arc en chaînette.
- *Arc brisé ou arc en ogive* : arc dont le tracé est fait de deux courbes concaves vers l'intrados, réunies au sommet.
- *arc brisé à double courbure ou en accolade* : chacune de ses moitiés comporte, à la base, une convexité vers l'extérieur, au sommet une concavité vers l'extérieur.
- *Arc en ellipse*: arc elliptique.
- *Arc en anse de panier* : arc dont le tracé est une courbe surbaissée complétée de part et d'autre par une courbe plus courte.
- *Arc rampant* : arc dont les naissances ne sont pas au même niveau.
- *Arc renversé* : arc dont l'intrados est tourné vers le haut<sup>30</sup>.

Chacun de ces arcs peut être qualifié de TRONQUÉ si son sommet est coupé selon une horizontale, (figure.1.19).

---

<sup>30</sup> René Ginouvès, op cit., page 78.

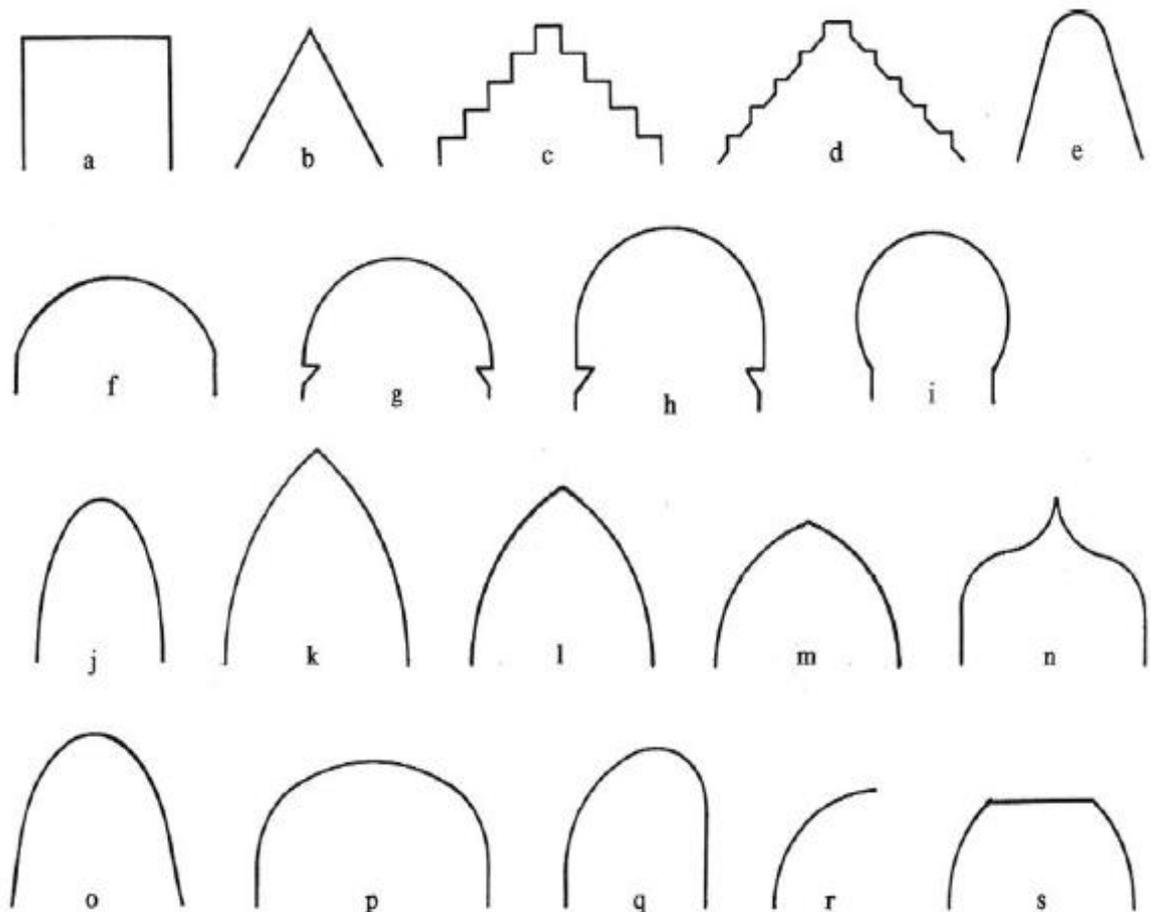


Fig.1.19. *Formes de l'arc*. a: plat; b: dièdre; c: dièdre à degrés; d: dièdre à degrés abattus; e : dièdre émoussé; f : en segment sur baissé; g : en plein cintre; h : en plein cintre surhaussé; i: outrepassé; j : en parabole; k: en ogive, lancéolé; l: en ogive, tiers point; m: en ogive, surbaissé; n: à double courbure; o : en ellipse; p : en anse de panier; q: rampant; r: demi- arc; s: tronqué<sup>31</sup>.

---

<sup>31</sup>René Ginouvès, op cit., page 332.

## 2.6 Caractéristiques des pierres de construction

### 2.6.1 Classification des roches :

Les matériaux naturels qui composent notre sous-sol sont très divers puisqu'ils varient, de roches dures et compactes (comme le granite ou les calcaires marbriers), à des roches meubles ou non cohésives (comme le gypse ou les sables). Depuis le début de l'époque historique, tous ces matériaux ont été utilisés par l'homme pour construire son habitat, ses monuments, ou pour aménager et façonner son environnement<sup>32</sup>.

Il est possible de distinguer **trois types de formations** :

- **le sol** qui correspond à ce que nous nommons généralement la terre. Il s'agit de l'altération de la roche mère du sous-sol au contact de l'atmosphère (cycles de gel-dégel, par exemple) et de la biosphère (action des animaux, des végétaux, des micro-organismes, de l'homme) ;
- **deux types de formations qui correspondent au sous-sol** :
  - **les formations superficielles** en surface ; elles correspondent à l'accumulation récente de sédiments, apportés par les rivières (alluvions), glissés sur les pentes (colluvions), ou transportées par le vent, les glaciers, etc.,
  - **les formations géologiques** Il s'agit souvent de roches anciennes, épaisses, composant des couches plus ou moins continues dans l'espace<sup>33</sup>.

Dans ce dernier ensemble, source quasi exclusive de l'exploitation pour la construction en pierre, il est également nécessaire de différencier **quatre grandes familles de roches** :

- les **roches magmatiques volcaniques**, comme le basalte ;
- les **roches magmatiques plutoniques**, comme le granite ;
- les **roches métamorphiques**, comme l'ardoise ou le marbre ;
- les **roches sédimentaires**, comme le calcaire, la meulière, le grès. Selon leur type, ces gisements de pierres ont des organisations différentes, les roches sédimentaires étant le plus souvent organisées en couches superposées, les matériaux volcaniques en coulées longitudinales, les roches plutoniques en filons ou en batholites, tandis que les roches métamorphiques ont des gisements à structure complexe, nettement définie par la tectonique et les plissements »<sup>34</sup>.

---

<sup>32</sup>Athina Boleti , Modalités d'exploitation dans le monde égéen protohistorique et antique  
Collection Cahiers archéologiques de Paris 1, 2017 page 18.

<sup>33</sup>Jean-François Beaux, Bernard Platevoet, Jean-François Fogelgesang, Atlas de Pétrologie, édition Dunod, Paris, 2012, page 102.

<sup>34</sup>Michel Demange , Les minéraux des roches , Caractères optiques Composition chimique et Gisement, édition Transvalor - Presses des mines, 2009 pages 39-68.

### 2.6.1.1 Roches carbonatées

Les roches carbonatées appartiennent, hormis le marbre qui est une roche métamorphique, à la famille des roches sédimentaires. Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

- **du point de vue chimique** : elles contiennent au moins 50 % de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), ont généralement une faible dureté (rayées au couteau), et font effervescence à l'acide chlorhydrique (dégagement de  $\text{CO}_2$ ) ;
- **du point de vue géologique** : elles proviennent la plupart du temps de l'accumulation de dépôts, fossiles ou terrigènes, d'où leur importance stratigraphique. Elles peuvent être aussi issues de précipitations chimiques (tufs) ou biochimiques (récifs de corail) <sup>35</sup>.

Leur **classification** est faite suivant leurs caractéristiques principales :

- la **proportion de calcite** : calcaire pur, calcaire dolomitique, calcaire argileux... ;
- le **milieu de dépôt** : calcaire marin, calcaire lacustre, calcaire continental... ;
- la **taille des grains** : calcaire micritique (calcite microcristalline dont la taille n'excède pas 10  $\mu\text{m}$ ), calcaire sparitique (calcite spathique d'environ 100  $\mu\text{m}$ ), calcaire grossier (calcite de plus de 200  $\mu\text{m}$ ) ;
- leur **texture**, leur compacité, la nature et/ou la quantité de fossiles : calcaire marbrier, calcaire coquillier, calcaire oolithique, calcaires récifaux, calcaires à milioles... <sup>36</sup>

Certaines roches carbonatées issues de processus particuliers ont reçu des appellations spécifiques, parmi lesquelles :

- la **craie** : roche sédimentaire marine contenant plus de 90 % de  $\text{CaCO}_3$ , à grain fin, poreuse et tendre, formée par l'accumulation de végétaux unicellulaires, les coccolithes ;
- le **tuffeau** : appellation régionale de calcaires du turonien qui correspond à une variété crayeuse, tendre et poreuse, se prêtant bien à la sculpture ;
- le **marbre** : roche métamorphique dérivant d'un calcaire par augmentation locale de température (métamorphisme de contact) et de pression (transformations minéralogiques).
- **Les roches calcaires** sont de loin les matériaux naturels <sup>37</sup>.

### 2.6.1.2. Les grès

Appartiennent également à la famille des roches sédimentaires. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- ce sont **souvent des roches poreuses**, bien que résistantes et rayant le verre ;

---

<sup>35</sup> Michel Demange ,op cit, page 92.

<sup>36</sup>Jean-François, op cit, page 102.

<sup>37</sup> B.H. Purser, Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents. Tome 1: les éléments de la sédimentation et de la diagenèse. Edition Technip 1980, page 245.

- **du point de vue chimique**, les grès sont composés pour l'essentiel de grains de quartz (silice : SiO<sub>2</sub>), liés par un ciment calcaire, argileux, ou lui-même siliceux ;
- **du point de vue géologique**, ils proviennent du dépôt de sables apportés par les fleuves (deltas, plages) ou le vent (dunes), et consolidés ultérieurement. Ils sont caractéristiques de périodes géologiques pendant lesquelles les continents ont subi de fortes érosions. Ils sont donc issus de produits de l'altération.

Les grès se distinguent entre eux :

- **par la nature de leur ciment** : calcaire, argileux, ou siliceux ;
- **par la taille** et la répartition des tailles **de leurs grains** : de la centaine de micromètres à quelques millimètres ;
- **par leur couleur** : grès jaune, grès rose... ;
- **par leur texture** liée à leur mode de dépôt. Les grès sont souvent structurés en séquences de quelques centimètres composées de grains grossiers, puis de plus en plus fins<sup>38</sup>.

### 2.6.1.3. Les roches granitiques

Les roches granitiques appartiennent à la famille des roches magmatiques, plutoniques. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- **du point de vue chimique**, leur composition est essentiellement silicatée (73 à 74 % de SiO<sub>2</sub> – 13 à 14 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 8 à 9 % de K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) ;
- **du point de vue géologique**, ces roches sont issues de la cristallisation lente d'un magma riche en silicium. Il en résulte une texture grenue solide due à la présence exclusive de cristaux plus ou moins bien développés ;
- **du point de vue minéralogique**, elles sont composées de minéraux silicatés, qui sont, pour 80 %, du quartz et des feldspaths, soit potassiques (orthose...), soit calco-sodiques (plagioclases...). Les autres minéraux sont très souvent des micas, plus rarement des amphiboles et des pyroxènes ;
- **Du point de vue physique**, il n'y a pas de vide laissé entre les cristaux. Leur porosité est donc souvent très faible, voire négligeable. La bonne cohésion due à l'engrenage des cristaux induit également une grande résistance mécanique et une forte durabilité, ainsi que la possibilité de prendre le poli<sup>39</sup>.
  - Leur **classification** et leur description se font suivant :

---

<sup>38</sup> B.H. Purser, op cit., page 268.

<sup>39</sup> A; Nédélec J-L. Bouchez, Pétrologie des granites Structure - Cadre géologique, Edition Vuibert 2011, page 56.

- **La composition chimique et la nature des feldspaths** : granite alcalin riche en quartz et en feldspaths potassiques, granite calco-alcalin contenant aussi des feldspaths calco-sodiques, ainsi que des micas et autres minéraux accessoires, granite monzonitique contenant autant de feldspaths potassiques que de plagioclases. Les roches magmatiques grenues contenant une majorité de feldspaths calco-sodiques (plagioclases) sont dénommées « granodiorites » par les géologues, mais sont souvent appelées « granites » dans le langage courant ;
- **La taille des grains** : microgranite, granite porphyrique (contenant quelques grands cristaux parfois centimétriques)<sup>40</sup>.

## 2.6.2. Caractéristiques Techniques

### 2.6.2.1 la Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est une caractéristique habituellement mesurée sur les pierres.

Elle reflète leur degré de compacité et permet d'évaluer leur masse pour un volume connu. La compacité d'une pierre est le rapport de sa masse volumique apparente à sa masse volumique absolue. Influencée par la texture, elle n'est jamais égale à 1. On en conclut que la masse volumique apparente d'une pierre est toujours plus faible que la masse volumique moyenne des constituants, même si la pierre n'est pas poreuse<sup>41</sup>.

La masse volumique apparente des pierres varie approximativement comme suit :

- Pierres calcaires (tendres au dures) : 1.500 - 2.800 kg/m<sup>3</sup>
- grès : 2.000 - 2.500 kg/m<sup>3</sup>
- granits : 2.500 - 3.000 kg/m<sup>3</sup>
- porphyres : 2.000 - 2.800 kg/m<sup>3</sup>
- basaltes : 2.800 - 3.000 kg/m<sup>3</sup>
- marbres : 2.600 - 2.800 kg/m<sup>3</sup>
- ardoises : 2.650 - 3.000 kg/m<sup>3</sup>

### 2.6.2.2. Porosité :

On distingue deux types de porosité :

- la porosité fermée : les pores de la pierre sont isolés les uns des autres ;
- la porosité ouverte : les vides sont reliés entre eux par des canaux plus ou moins importants qui peuvent rendre la pierre plus ou moins perméable.

---

<sup>40</sup>A, Nédélec J-L. Bouchez, op cit., page 56.

<sup>41</sup>Extrait de la norme européenne NBN EN 1936, page 08.

On constate que la porosité augmente des pierres compactes, qui prennent le poli, aux pierres très tendres, non polissables<sup>42</sup>.

- granits : 0 à 2 %
- marbres et calcaires compacts : 0,2 à 5 %
- grès : 0,5 à 25 %
- calcaires : 5 à 50 %
- ardoises : < 3 %.

### **2.6.2.3. Résistance a la compression**

La connaissance de la résistance à la compression des pierres permet de choisir, en fonction des sollicitations auxquelles le matériau sera soumis dans l'ouvrage, la pierre ayant la résistance suffisante<sup>43</sup>.

- pierres calcaires : 2 à 240 N/mm<sup>2</sup>
- marbres : 40 à 230 N/mm<sup>2</sup>
- granits : 80 à 400 N/mm<sup>2</sup>
- grès : 15 à 290 N/mm<sup>2</sup>
- ardoises : 40 à 260 N/mm<sup>2</sup>
- travertins : 2 à 80 N/mm<sup>2</sup>
- quartzites : 100 à 325 N/mm<sup>2</sup>.

### **2.6.2.4. Résistance a la traction par flexion**

La valeur de la résistance à la traction des pierres est beaucoup plus faible que celle de leur résistance à la compression : elle vaut environ 1/10 de la résistance en compression pour les granits ou les calcaires, et 1/15 environ pour les grès<sup>43</sup>.

### **2.6.2.5. Vitesse de propagation du son à travers les pierres**

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le temps de passage, à travers un échantillon du matériau étudié, d'une impulsion recueillie à une distance connue de la source émettrice. La vitesse du son à travers une pierre est déterminée notamment par la nature et l'état du matériau étudié : porosité, taux d'humidité, nature des particules qui le constituent, microfissures, etc. Cette caractéristique doit plutôt être considérée comme une méthode de caractérisation simple, non destructive et relativement précise permettant d'identifier rapidement les matériaux, afin d'en déterminer l'homogénéité et de détecter des différences de qualité<sup>44</sup>.

---

<sup>42</sup> Extrait de la norme européenne NBN EN 1936, page 12.

<sup>43</sup> Extrait de la Norme européenne NBN EN 1926 .page 08.

<sup>44</sup> Extrait de la Norme européenne NBN EN 12372 page 06

La vitesse de propagation du son à travers les pierres varie approximativement comme suit :

- marbres : 3800 - 6200 m/s
- calcaires : 2400 - 6200 m/s
- grès : 1200 - 5600 m/s
- granits : 4000 - 7000 m/s
- travertins : 2200 - 4800 m/s
- quartzites : 5000 - 6400 m/s.

#### **2.6.2.6. Module d'élasticité**

Un grand nombre de caractéristiques des pierres naturelles utilisées en construction sont déterminées par la manière dont elles réagissent aux efforts exercés; ces derniers provoquent un état de tension qui engendre des déformations. Le rapport entre la tension ou contrainte exercée ( $\sigma$ ) et la déformation ( $\varepsilon$ ) constitue la base du calcul du module d'élasticité

#### **2.6.2.7. Largeur de rayure**

Cette mesure de la dureté est essentiellement réservée aux pierres calcaires. La détermination de la largeur de rayure fournit pour chaque matériau une valeur chiffrée de la dureté. Ceci présente l'avantage de pouvoir mettre en relation les valeurs de dureté avec celles se rapportant à des caractéristiques physiques et mécaniques.

On a par exemple :

- pierre tendre : > 1,8 mm
- pierre demi-ferme : 1,8 à 1,4 mm
- pierre ferme : 1,4 à 1 mm
- pierre dure : 1 à 0,75 mm
- pierre froide : < 0,75 mm.

#### **2.6.2.8. Résistance au gel**

Les pierres, comme beaucoup de matériaux, renferment un certain nombre de vides (ou pores) dans lesquels l'eau peut circuler. Le gel donne naissance à la formation de glace; l'augmentation de volume qui accompagne la congélation repousse l'eau vers les pores libres. Ainsi, au cours des cycles successifs de gel et de dégel, des quantités supplémentaires d'eau pénètrent dans la pierre. La teneur en eau des matériaux augmente donc progressivement jusqu'à un seuil critique où l'eau, bloquée dans les pores, exerce des pressions incompatibles avec la résistance des pierres, qui se fendent, se délitent ou s'effritent<sup>45</sup>.

#### **2.6.2.9. Pétrographie des pierres naturelles**

Il est important d'effectuer une description pétrographique des pierres naturelles, non-

---

<sup>45</sup> Extrait de la Norme européenne EN 12371.

-seulement afin de réaliser un classement pétrographique, mais également dans le but de souligner les caractéristiques susceptibles d'influer sur leur comportement chimique, physique et mécanique. On examine au microscope pétrographique les caractéristiques microscopique tel que :

- La couleur et la structure de la pierre
- sa composition et son identification :
- composants principaux
- liant
- résidus organogènes
- microstructure et texture
- composants accessoires
- sa structure poreuse, son état de fissuration et la présence de discontinuités
- son homogénéité l'identification des minéraux susceptibles de nuire à sa durabilité <sup>46</sup> .

### **2.6.3. La dégradation de la pierre :**

La cause la plus grave de détérioration de la pierre par l'eau est la « maladie de la pierre » qui s'attaque à son épiderme et nécessite son remplacement. C'est un phénomène chimique qui s'opère sur les parements qui peu à peu se désagrègent : en effet, la maçonnerie absorbe l'eau qui s'évapore ensuite à la surface de la pierre. Sur les pierres malades, le calcin (fine couche à la surface de la pierre composée de carbonate) se transforme en une couche boursouflée, fissurée et friable. Le calcin est une pellicule protectrice de la pierre et s'il disparaît, la pierre se retrouve à nu et fragilisée face aux intempéries, attaques chimiques ou organiques.<sup>47</sup>

#### **2.6.3.1. Les origines des altérations :**

L'eau est le principal agent de dégradation de la pierre. Son action peut être aggravée par l'effet de l'air. L'eau s'attaque à la pierre sous forme d'eau de pluie, de ruissellement, de vapeur d'eau, de remontée capillaire. L'origine de la présence d'eau « indésirable » est liée à des défauts d'entretien, d'étanchéité, ou de l'usage de matériaux non respirants à l'image des enduits ou mortier en ciment. L'effet de l'eau sur une pierre dépend de sa nature et de ses caractéristiques physiques (porosité). Ainsi, l'action de l'eau peut entraîner des désordres allant de la simple dégradation des parements à l'affaiblissement des structures. L'eau peut favoriser aussi le développement de micro-organismes et végétations qui affectent les maçonneries<sup>48</sup>.

---

<sup>47</sup>Bromblet (P.), Oriol (G.), Martinet (G.), Philippon (P.), Vergès-Belmin (V.) - Altération Des Pierres Des Monuments. - Vol. Iii (2002).

<sup>48</sup>10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, ICOMOS, Suède (2004).

### 2.6.3.2. Les autres causes d'altération

Les autres altération sont liées à la pollution atmosphérique qui conduit la pierre à présenter des salissures noires (sulfures), les contaminations biologiques qui pare la pierre de traces verdâtres (lichens, algues, mousses, champignons), le sel qui fait subir à la pierre une réaction chimique (cristallisation de la gypse-plâtre-, salpêtre), le feu qui calcine la pierre, les conditions atmosphériques (gel/dégel) qui peuvent faire éclater la pierre selon la porométrie du matériau (capacité des pores à stocker et rejeter l'eau), la présence d'autres matériaux qui conduit la pierre à s'altérer au contact de matériaux incompatibles avec elle (le fer rouille dans la pierre qui se rompt) et les actions humaines car parfois la pierre ne supporte pas les badigeons, peintures, résidus de traitement antérieurs.

### 2.6.3.3. Les type altérations

Les types d'altération sont de trois natures :

- la desquamation : la pierre se désagrège en plaque, la couche inférieure devient sableuse.
- la pulvérulence : la pierre se désagrège en poussière.
- l'alvéolisation : la pierre présente des cavités (profondément rongée tel un gruyère).

La (figure.1.21) illustre les principales formes d'altération de la pierre en œuvre.



Fig.1.20. Les principales formes d'altération de la pierre en œuvre<sup>49</sup>.

<sup>49</sup>ICOMOS-ISCS, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, 2008, p 1-28.



Fig.1.21. (suite). Les principales formes d'altération de la pierre en œuvre.

### 3. La brique :

Dès la plus haute antiquité, les propriétés plastiques de l'argile furent mises à profit pour façonner ces parallépipèdes rectangles que nous appelons briques qui, séchées au soleil ou durcis par la cuisson, deviennent de véritables pierres artificielles. Nous désignerons, sous le nom de briques, deux sortes de matériaux : 1° ceux qui soumis à une dessiccation lente, sous l'action de l'air et du soleil, forment la catégorie des briques crues. 2° ceux qui, subissant au feu une dessiccation plus rapide et plus complète, constituent la catégorie des briques cuites 50.

En Mésopotamie, les briques cuites furent longtemps réservées aux constructions étanches : bassins ou canalisations, ou aux parties d'édifices plus vulnérables, tels que les encadrements de baies ou le revêtement des grands monuments. Dans le monde occidental, grec et romain, la cuisson de l'argile fut beaucoup plus tardive et n'intéressa longtemps (souvent jusqu' au I<sup>er</sup> siècle . av. J.-C.) que les tuiles et ornements de faitage des édifices, destinés à assurer une couverture étanche et la protection des extrémités des pièces de bois de la charpente.

#### 3.1. La fabrication de la brique en terre cuite

**3.1.1. Masse au façonnage :** L'argile, utilisée pure, additionnée d'eau, étant très avide de ce liquide, va en se desséchant se fissurer d'autant plus si le matériau naturel est dit *argile grasse* certaines argiles, dites *maigres*, sont naturellement mélangées à des sables,

---

50 Pierre Chabat, la brique et la terre cuite, étude historique, première partie, Paris 1881, page 2.

leur aspect est moins plastique et le phénomène de retrait à la dessiccation plus faible. Cette observation a conduit les utilisateurs à introduire dans l'argile un *dégraissant* susceptible de combattre les effets de retrait et de fissuration dus au départ de l'eau.

l'argile est déposée dans une fosse inondée, à proximité d'un point d'eau, ou elle est malaxée au pied par foulage, avec le dégraissant qui peut être parfois cendre, sable ou gravillons, (figure.1.21).

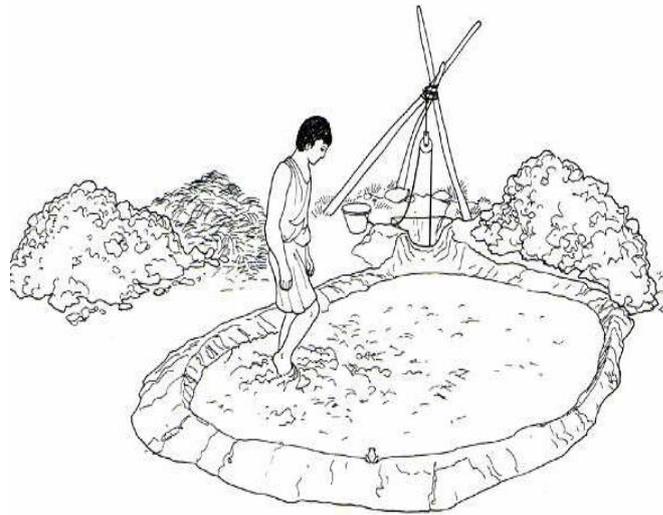


Fig.1.21. Mélange par piétinement de l'argile avec l'eau et un dégraissant <sup>52</sup>.

La mise en forme des briques se fait dans des moules constitués d'un cadre de bois sans fond, divisé en un nombre variable de cases de dimensions égales, que l'ouvrier remplit puis démoule d'un coup sec sur l'air de séchage <sup>52</sup>,(figure.1.22).

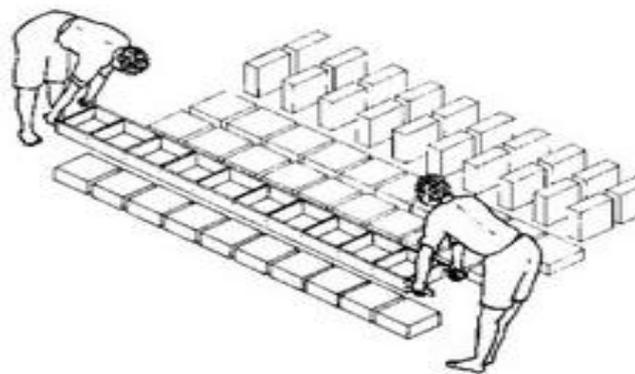


Fig .1.22.Démoulage des briques après séchage <sup>53</sup>.

---

<sup>51</sup> Adams, op cit., page 62.

<sup>52</sup> René Ginouvès, op cit., page 308.

<sup>53</sup> Adams, op cit., page 63.

### 3.1.2. Séchage

Bien que la fabrication se fasse en toute saison, sauf au moment des grosses pluies lorsque l'aire de séchage n'est pas couverte par une toiture, Vitruve recommande de choisir l'automne ou le printemps pour les Operations de moulage, époques où le soleil n'est pas trop ardent, afin d'éviter que celui-ci ne provoque un dessèchement très rapide de l'épiderme entraînant la fissuration du matériau<sup>54</sup>.

### 3.1.3. Cuisson

Les fours employés pour la cuisson des briques sont identiques à ceux du potier, seules les dimensions varient en raison du grand volume de matériaux à traiter au cours de chaque cuisson. Le four à céramique peut être circulaire ou de forme allongée, il est installé en partie en terre, afin de mieux conserver la chaleur et de faciliter les opérations de chargement et de déchargement des matériaux, (figure.1.23). La partie inférieure est constituée par la chambre de chauffe, approvisionnée en combustible par une ouverture que l'on va partiellement murer durant la cuisson afin de maîtriser la ventilation, mais en laissant l'espace nécessaire au passage du combustible. Ce dernier est constitué de végétaux à ignition vive, tels que buissons desséchés, herbes, noyaux divers<sup>55</sup>.

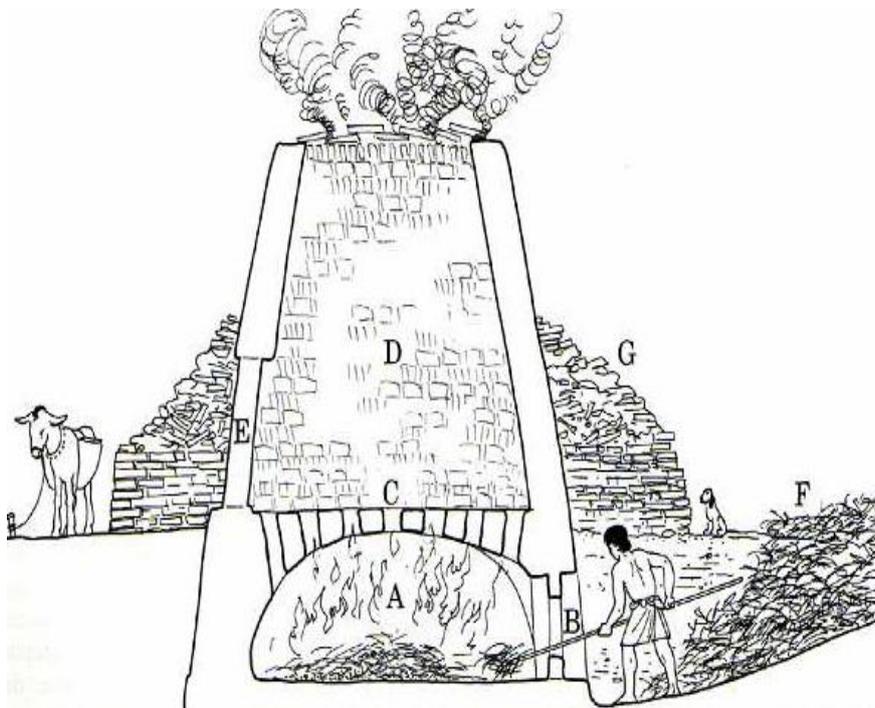


Fig.1.23.Four pour la cuisson des briques<sup>56</sup>.

<sup>54</sup> René Ginouvès, op cit., page 311.

<sup>55</sup> Adams, op cit., page 64.

<sup>56</sup> Ibid.,

### 3.2. Forme et dimensions:

La forme et les dimensions des briques diffèrent chez les Grecs et chez les Romains :

Les briques grecques sont carrées; les romaines, oblongues. Et à chaque modèle répondent des demi-briques, destinées à faciliter la « découpe » lors de la mise en œuvre

#### - *Briques grecques*

Les briques des Grecs se désignent par le nombre de palmes ou quarts de pied qui exprime la longueur de leur côté :

Le tetradoron mesure quatre palmes, soit 1 pied de 0,509 m ;

Le pentaxloron, cinq palmes, soit 1 pied 1/4.

Épaisseurs : non spécifiée<sup>57</sup>.

#### - *Briques romaines*

Pour les romaines les formes des briques sont rectangulaire, carrée, triangulaire, trapézoïdale, circulaire, en quart de rond, et autre.

Les briques triangulaires sont obtenues par fractionnement de *bipedales*, *sesquipedales* ou *bessales*, ce qui explique en partie les variations de modules.

Les briques sont fractionnées après cuisson.

Les tranches coupées, rugueuses, permettaient aussi une meilleure adhérence au mortier.

***Bipedales*** 2 pieds (59,2 cm), permet de réaliser 9 briques carrées de 19,7 cm de côté (*bessales*), ou 18 briques triangulaires de 19,7 cm x 19,7 cm x 27,8 cm

***Sesquipedales*** 1 pied et demi (44,4 cm), permet la réalisation de 4 briques triangulaires de 44,4 cm X 31,4 cm et 8 de 22,2 x 22,2 x 31,4 cm

***Bessales*** 2/3 de pied (19,7 cm), 2 briques triangulaires de 19,7 x 19,7 x 27,8 ou 4 de 19,7 x 14 x 14 cm<sup>58</sup>, (figure.1.24) et (figure.1.25)



Fig.1.24. Briques romaine triangulaires<sup>59</sup>.

<sup>57</sup> Auguste Choisy, Vitruve, Analyse, Tome 1, Paris 1909, page 8-9

<sup>58</sup> Adams, op cit, page 159.

<sup>59</sup> Helene Dessales, petit catalogue des techniques de la construction romaine, école normale supérieure, France, page 8.

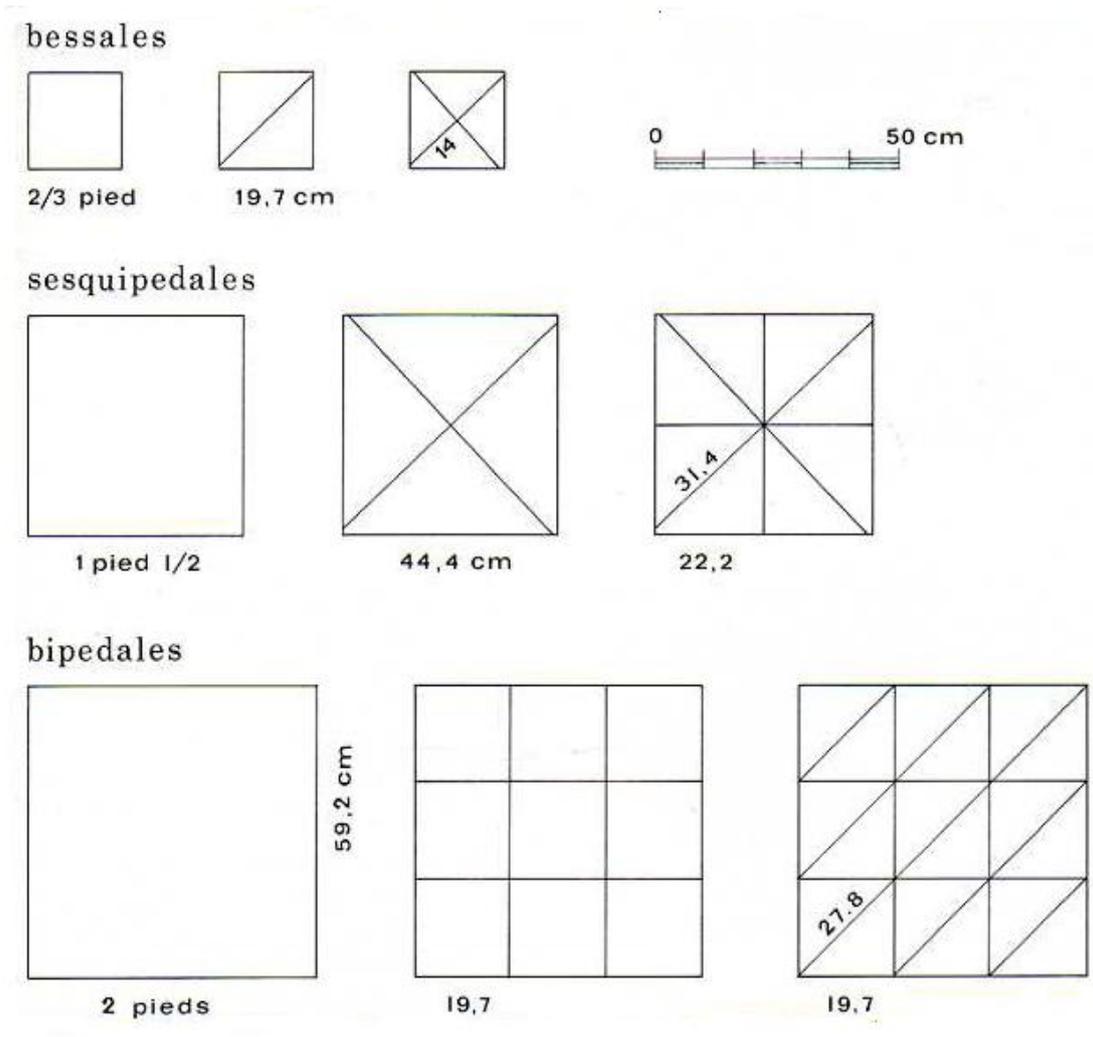


Fig.1.25.Partition des briques carrées de mesures courantes<sup>60</sup>.

### 3.3. La Brique dans le mur

**3.3.1 Opus latericium:** appareil utilisant seulement des briques crues.

**3.3.2 Opus testaceum:** appareil utilisant seulement des briques cuites, (figure.1.26).

Dans les deux cas, la construction normale présente des caractères comparables à ceux de l'«isodome», avec assises de hauteur égale et éléments de même longueur en façade, les joints alternant d'assise à assise. La description de l'appareil implique donc seulement l'indication du type de briques utilisées, avec éventuellement leur mode de segmentation et l'indication de la manière dont elles sont utilisées (côté original ou côté coupé en façade, etc.)<sup>61</sup>.

<sup>60</sup> Adams,op cit, page159.

<sup>61</sup> René Ginouvès, op cit., page100.

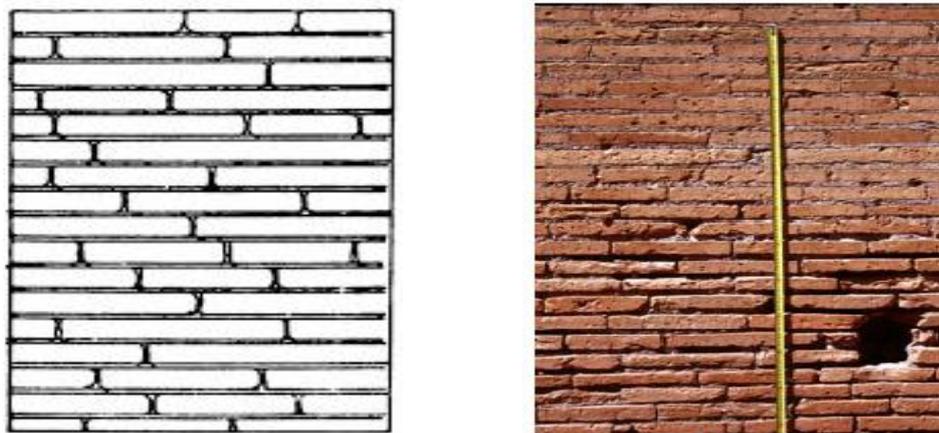


Fig.1.26.Opus testaceum<sup>62</sup>.

- **Appareil à bordures de tuiles** : appareil utilisant des fragments de tuiles dont la bordure est présentée en façade, ce qui donne l'impression de briques épaisses.
- **Appareil en épi** : l'appareil utilise des briques cuites, disposées, dans chaque assise, en oblique par rapport à l'horizontale, les obliques de deux assises superposées étant de sens contraire. Comme cet arrangement est analogue à celui qu'on rencontre aussi pour la construction en pierre, (figure.1.27).
- **Chaîne d'angle** : Appareil longeant un angle et se distinguant de l'ensemble de la construction par les dimensions et/ou la catégorie de matériau et/ou la forme des éléments qu'il met en jeu<sup>63</sup>, (figure.1.28).
- **Appareil à tubes**: employé essentiellement dans la construction des voûtes, mais aussi exceptionnellement pour les murs, il met en œuvre des tubes de terre cuite cylindriques qui se termine d'un côté par un col, qui s'enfonce dans l'extrémité large de l'élément suivant (ce qui permet en particulier l'inflexion de la ligne selon la courbure de la voûte)

<sup>64</sup>.

---

<sup>62</sup> Helene dessales, op cit., page 4.

<sup>63</sup> Adams, op cit., page 196

<sup>64</sup> René Ginouvès, op cité, page 101.

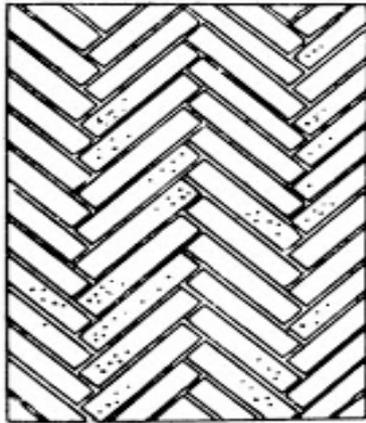


Fig .1.27.Appareil en épi<sup>65</sup>



Fig.1.28.Chaine d'angle avec des briques de différentes couleurs<sup>66</sup>.

---

<sup>65</sup> Helene Dessales, op cit., page 5.

<sup>66</sup> Helene Dessales, op cit., page 6.

### 3.4 Caractéristiques des briques

La brique et le mortier sont des pierres artificielles, les méthodes utilisées dans la caractérisation de la pierre sont pratiquement les mêmes que celles utilisées dans l'étude et la caractérisation des briques et des mortiers, à savoir l'analyse pétrographique sur lames minces, analyse minéralogique par DRX, analyse chimique par FX et les analyses physiques : masse volumique, masse spécifique, porosité, absorption, dureté et les essais mécaniques.

Nous allons présenter dans la suite de ce paragraphe une caractérisation des briques en terre cuite de la casbah d'Alger de la période ottomane réalisée par la doctorante Mahindad Naima dans son projet de thèse de doctorat.

#### 3.4.1. Analyse pétrographique

La figure 1.29 montre que la matrice est de couleur rouge-orangée, carbonatée, dont la texture

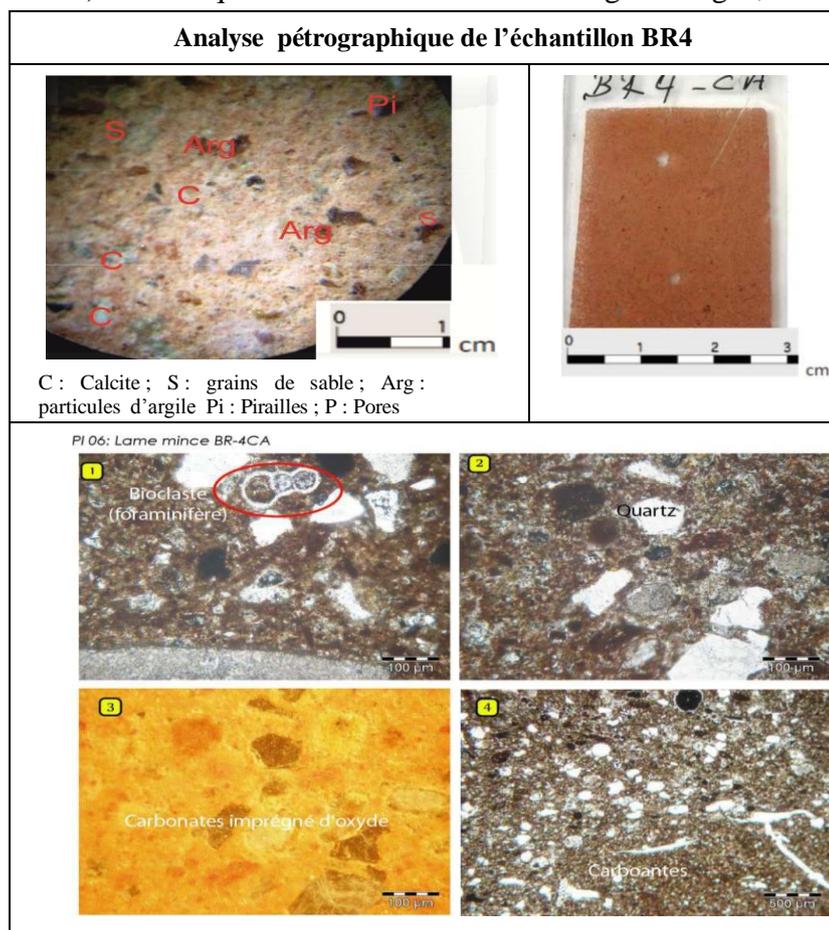


Fig.1.29 : Observation microscopique et identification de minéraux de l'échantillon brique BR4 (La casbah d'Alger)<sup>67</sup>.

<sup>67</sup>MAHINDAD Naima, les différents systèmes constructifs et l'évolution des caractéristiques des matériaux de archéologiques du VIII au XVII<sup>ème</sup> siècles en Algérie, thèse de doctorat, université de Boumerdes, 2017, page 185.

est d'apparence compacte et homogène. Elle a l'apparence d'une micrite avec moins de 10% de grains très fin (mudstone). C'est une roche oxydée avec probablement la présence d'hématite, de nodules de nature carbonatés, des bioclastes (bivalves micritisés, foraminifères unisériés et bisériés benthiques et parfois complètement oxydés), de l'argile en très faible proportions. Les grains de quartz sont monocristallins. La matrice est très compacte avec une porosité de rétraction réduite<sup>68</sup>.

### 3.4.2. Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique des échantillons de briques étudiés pour les édifices sélectionnés de la ville d'Alger. Cette analyse a permis d'obtenir les résultats présentés dans Tableau.1.2

Tableau 1.2 : Composition minéralogiques des échantillons de briques des édifices de la ville d'Alger<sup>69</sup>.

Matériaux Présents	Casbah D'Alger BR4
Quartz	44,5
Albite	10
Orthoclase	5
Gypse	3
Calcite	22,5
Dolomite	7
Muscovite	3
Hématite	-
Autres	5

### 3.4.3 Analyses physiques

Les analyses physiques ont porté sur le calcul des masses volumiques apparente et spécifique, de la porosité totale et la porosité ouverte ainsi que l'absorption d'eau et le taux d'humidité<sup>70</sup>. L'ensemble des résultats sont reportés dans le tableau.1.3.

Tableau 1.3. Résultats des différents essais physiques des échantillons de briques des édifices la ville d'Alger<sup>71</sup>.

Echantillons	Mv en g/cm <sup>3</sup>	Mv en g/cm <sup>3</sup>	porosité t %	porosi té ouverte %	L'absorpti on D'eau %	Le taux d'humid ité %
Casbah d'Alger	1,49	2,13	30,04	27,04	18,15	2,12

La dureté des briques est déterminée par rapport à l'échelle de Mohs, tel que, il est reporté dans le tableau .1.4.

Tableau.1.4.La dureté de Mohs des échantillons de briques de la ville d'Alger<sup>72</sup>.

Echantillons	Echantillon rayé par	Classification	Spécification
Casbah d'Alger BR4	Feldspath	5	Demi-dure

### 3.4.4 Essais mécanique :

Les essais mécaniques des briques prélevés dans les édifices sélectionnés de la ville d'Alger, ont porté sur des essais de compression et de flexion.les resultats sont montrés sur le tableau.1.5.

Tableau.1.Résultats des essais mécaniques des échantillons de briques des édifices de la ville d'Alger<sup>73</sup>.

Echantillons	Compression (MPa)	Flexion (MPa)
Casbah d'Alger BR4	6,84	5,13

<sup>71</sup> MAHINDAD Naima, op cit., page 188.

<sup>72</sup> MAHINDAD Naima, op cit., page 189.

<sup>73</sup> MAHINDAD Naima, op cit., page 190.

### 3.5. Altération des briques

Les altérations de la brique résident dans l'altération de sa surface, de son aspect, dans l'augmentation de sa porosité et sa friabilité, jusqu'à la désagrégation<sup>74</sup>

Les briques en terre cuite peuvent être affectées par un certain nombre d'altérations et de dégradations semblables à celles qu'on retrouve dans la pierre. La principale cause des différents désordres est la présence d'eau sous toutes ses formes. Elle peut se manifester en surface du fait des intempéries telles que pluies, ruissèlement, phénomène de gel et dégel mais aussi à l'intérieur des structures ou même à l'intérieur du matériau du fait de la condensation de l'humidité ou de sa remontée dans les murs par capillarités. Cette eau peut provoquer une dissolution interne des briques qui perdent leur résistance mécanique. Ce phénomène est qualifié selon Gilles Fauck<sup>75</sup> « d'effets électrolytique », il atteste que les argiles qui sont des silicates d'alumine, en présence d'eau acide ou chargée de sels perdent leurs ions alumines, ce qui désagrège l'intérieur de la brique et lui donne un aspect cartonneux.

Les altérations les plus fréquentes qu'on peut relever sur les briques et de même sur les maçonneries réalisées avec ce matériau sont :

- Une perte de matière suite à une désagrégation: C'est un détachement de grains individuels ou d'agrégats de grains. Les particules du matériau ne sont plus liées<sup>76</sup>. C'est la dégradation la plus dangereuse, elle se manifeste selon différentes formes dont la plus grave est "l'alvéolisation" qui se manifeste sous forme de cavités (alvéoles) variables en forme et taille et qui peuvent être interconnectées<sup>77</sup>. Elles apparaissent à la base des murs, dans les zones soumises à des remontées capillaires.

Dans cette catégorie d'altérations, on peut aussi citer l'éclatement et l'écaillage qui peuvent être provoqués par un gonflement lié au gel ou bien à la présence de sels. Gilles fauck<sup>78</sup> explique que ce phénomène est dû à la cristallisation de l'halite (un chlorure de sodium) présente dans la composition de la brique qui provoque des pressions engendrant son éclatement.

---

<sup>74</sup>Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Mission ingénierie et référence technique, Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, Juin 2006, p34

<sup>75</sup> Gilles fauck, pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre, les cahiers techniques du bâtiment, N° 179, avril 1997,

<sup>76</sup>ICOMOS-ISCS, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, 2008, p 24

<sup>77</sup>ICOMOS-ISCS, op cite, p 34

<sup>78</sup>Gilles fauck, op cit, p 2

Altération chromatiques et dépôts : Il s'agit de l'accumulation superficielle de matériaux exogènes formant une couche peu cohérente et d'épaisseur variable ainsi qu'une modification d'un ou plusieurs des paramètres caractérisant la couleur de la brique<sup>79</sup>.

Parmi ces altérations, nous comptons, les efflorescences qui sont des amas de cristaux blancs dont l'aspect est poudreux, aciculaire (en forme d'aiguilles) ou filamenteux, elles sont localisés en surface et dont l'origine est les sulfates (sels solubles) qui peuvent être contenu dans les mortiers de jointoiement qui migrent vers la brique<sup>80</sup>. Ainsi que les encroûtements qui sont des couches superficielles compactes et dures. Elles sont généralement de couleur blanc sale, ce sont des dépôts de calcite en surface dans des parties ayant reçu de l'eau qui a percolé à travers la maçonnerie (eau non canalisée)<sup>81</sup>.

Dans certains cas on peut trouver des encroûtements noirs dus à la pollution et aux salissures qui finissent par se déposer sur certains supports.

- Les attaques biologiques : L'atmosphère saturée d'humidité favorise les attaques biologiques dont les origines sont les plantes et les microorganismes tels que les bactéries, cyanobactéries, les algues, les moisissures et lichens (symbioses des trois derniers)<sup>82</sup>. Ces altérations peuvent avoir différents aspects en fonction de la plante ou du micro organisme incriminé<sup>83</sup>:

- Les taches noires attestent de la présence de champignons microscopiques qui se développent en surface de la brique.

- Les taches verdâtres indiquent que les mousses se développent en surface grâce à la présence de l'eau et de matière nutritive produite grâce à une colonisation bactérienne.

- Les taches jaunes sont des lichens qui en présence d'eau colonisent les briques.

- Les taches rouges sont dues à la présence d'algues lichénoïdes.

- Les salpêtres qui sont liés à la présence des bactéries nitrifiantes dans l'environnement de la structure maçonnée, ils proviennent d'une cristallisation de nitrates (d'ammonium, de calcium ou de potassium) à la surface de la maçonnerie.

---

<sup>79</sup>ICOMOS-ISCS, op cit, p 50-52

<sup>80</sup> Gilles fauck, op cit, p 1-2

<sup>81</sup>ICOMOS-ISCS, op cit, p 56

<sup>82</sup>ICOMOS-ISCS, op cit, p 70

<sup>83</sup>Gilles fauck, op cit, p 3

#### **4 .Les mortiers :**

Les peuples de l'Antiquité ne connaissaient pas le ciment qui est d'un emploi courant de nos jours. Leurs matériaux de construction étaient le bois, la pierre taillée ou polie, la brique d'argile séchée au soleil. Les pierres de taille étaient le plus souvent posées les unes sur les autres sans mortier de liaison. Les liants utilisés étaient l'argile, le plâtre, la chaux. Mais le liant, qui a été sans doute très employé aux époques les plus reculées comme enduit pour les murs, était la chaux grasse. Les Etrusques, les Phéniciens, puis les Grecs et les Romains s'en servirent pour leurs travaux de maçonnerie.

La chaux est obtenue par cuisson de roches calcaires, puis par extinction de la chaux vive avec de l'eau, ce qui donne l'hydroxyde de chaux ou chaux grasse. Le durcissement de la chaux grasse ne peut s'effectuer que grâce au gaz carbonique de l'air, d'où le nom de chaux aérienne donnée à la chaux grasse.

Romains furent sans doute les premiers à confectionner un véritable liant hydraulique, c'est-à-dire capable non seulement de durcir à l'air mais aussi sous l'eau, sans action de gaz carbonique<sup>84</sup>.

#### **4.1. Les constituants du mortier :**

##### **4.1.1. La chaux :**

Vitruve distingue trois états de la chaux par trois dénominations dont il importe de préciser le sens :

*Calx viva*;

*Calx macerata*;

*Calx extincta*

Deux de ces dénominations s'expliquent d'elles-mêmes :

La *calx viva* est la chaux telle qu'elle sort du four; elle se présente en mottes,

La *calx macerata* est la chaux gâchée en pâte;

Reste, pour le troisième état que Vitruve désigne sous le nom de *calx extincta*, la chaux fusée, c'est-à-dire délitée et réduite de « grumi » en poussière par une immersion rapide ou une légère aspersion d'eau<sup>85</sup>.

---

<sup>84</sup>Frédéric Davidovits, Les mortiers de pouzzolanes artificielles chez Vitruve, évolution et historique architecturale. Thèse de DEA université Paris X-Nanterre, 1993, page 2.

<sup>85</sup>Auguste Choisy, Vitruve, Analyse, Tome 1, Paris 1909, page 14.

- **Fabrication de la chaux :**

La chaux est obtenue par calcination de pierre calcaire vers 1 000 °C, opération pendant laquelle elle va abandonner son gaz carbonique. L'équation chimique de la calcination du calcaire pur s'exprime par :

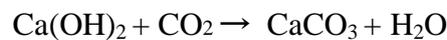


Le produit restant un oxyde de calcium, est appelé chaux vive ; on a alors des pierres pulvérulentes en surface qu'il convient d'hydrater pour obtenir un liant. Cette hydratation ou extinction se fait par immersion et provoque la dislocation des blocs, qui foisonnent, dégagent une forte chaleur et se transforment en pâte qui est la chaux éteinte. C'est ce matériau plastique que l'on va mêler aux agrégats pour obtenir les mortiers.

L'équation chimique de cette seconde transformation s'exprime ainsi :



En présence du gaz carbonique la chaux hydratée se transforme en calcaire en dégageant de l'eau selon la réaction<sup>86</sup> :



La (figure.1.30), montre le cycle de la chaux

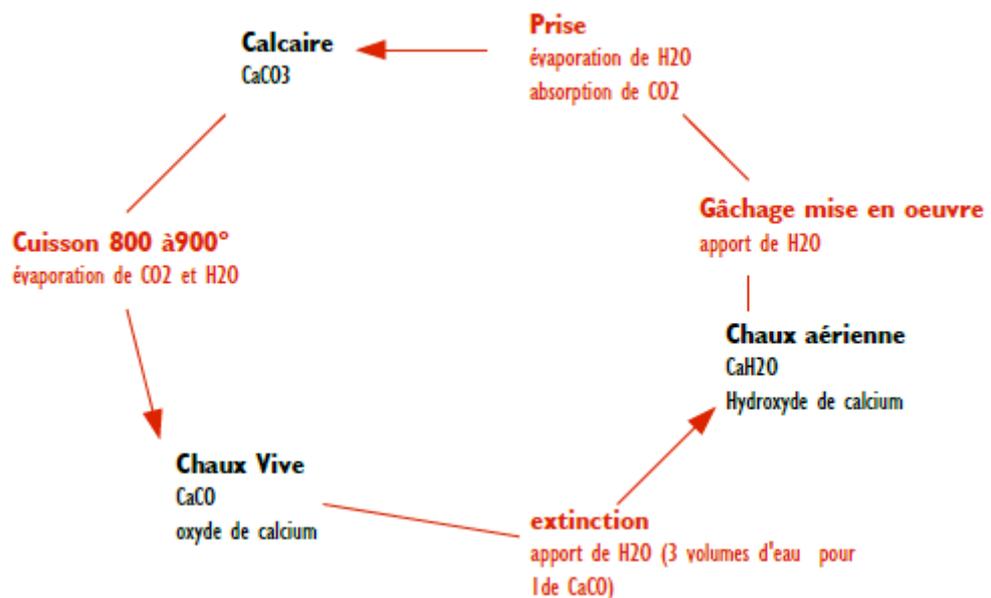


Fig.1.30: Cycle de la chaux<sup>87</sup>.

<sup>86</sup> Adams, op cit, page72.

<sup>87</sup> <http://www.sainbiose.com>.

La cuisson se fait dans des fours identiques à ceux utilisés par potiers, (figure.1.31), le four est une construction de plan circulaire et de volume tronconique, de dimensions extrêmement variables.

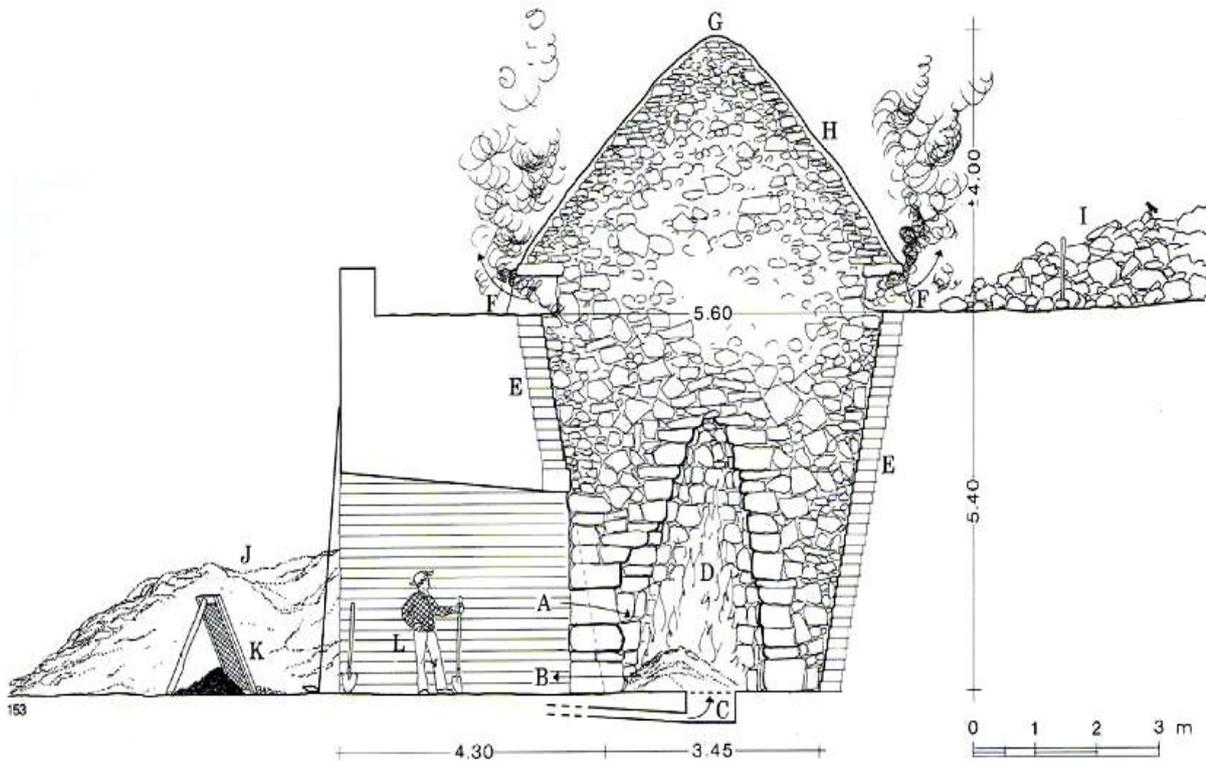


Fig.1.31.Four à chaux<sup>88</sup>.

#### 4.1.2. Le plâtre :

La cuisson du gypse s'effectue dans des fours identiques figure I.31 mais avec un temps de cuisson beaucoup plus court. La température demandée pour la transformation de la pierre à plâtre, le sulfate de chaux hydrate,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en sulfate de chaux anhydre,  $\text{CaSO}_4$  est relativement basse généralement 48h suffisent. Les pierres sont ensuite écrasées ou meulées et donnent une poudre qui, mêlée à l'eau, forme un liant dont la prise est presque instantanée<sup>89</sup>, (figure.1.32).

<sup>88</sup> Adams, op cit, page 72.

<sup>89</sup> Adams, op cit, page 73.

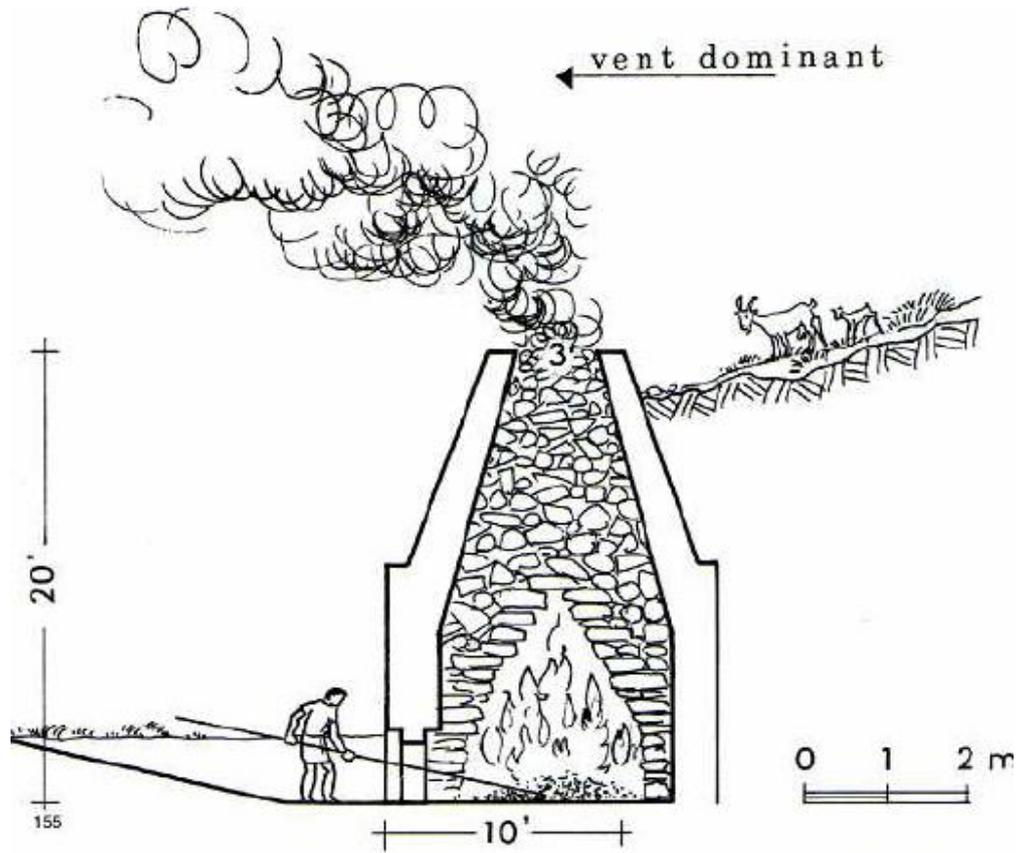


Fig.1.32. Four à plâtre<sup>90</sup>.

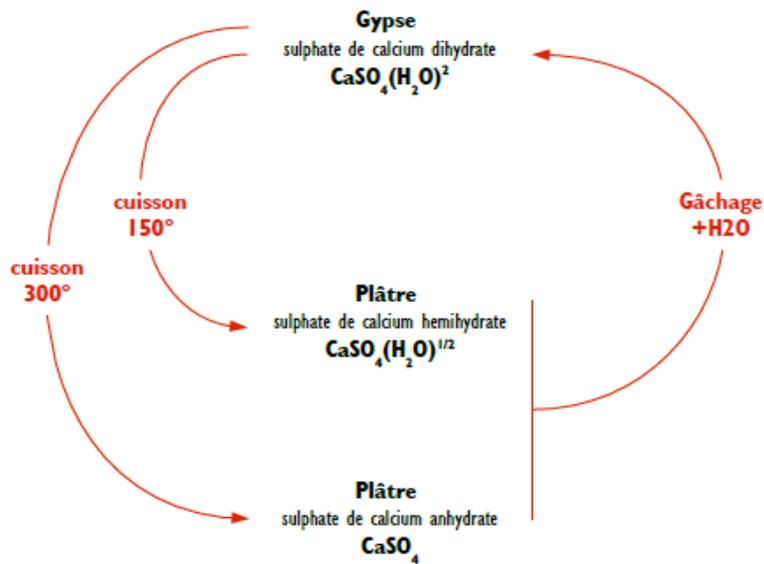


Fig.1.33. Cycle du gypse<sup>91</sup>.

<sup>90</sup> Adams, op cit., page 75.

<sup>91</sup> <http://www.sainbiose.com>

#### **4.1.3. Le sable :**

On le nomme sable aux substances minérales en grains de grosseurs (appréciables et insolubles dans l'eau).

Quelle que soit la composition du sable, on le divisera : en sable gros, sable moyen, et en sable fin. On le séparera des parties terreuses en poussière qui lui sont souvent unies. Ces parties, que l'on désignera sous les noms de terre, ou sablon).

Le sable, quel qu'il soit, n'a point sur la chaux d'action chimique qui puisse en changer la nature ; les sables poreux et rugueux se lient mieux avec elle, mais en général elle ne fait que les envelopper sans cesser d'être soluble dans l'eau.

La surface des sables, mêlés à la chaux, est attaquée par elle ; des affinités se développent, et produisent une adhérence réciproque, que la présence de l'eau ne peut, ni empêcher ni détruire ; les sables siliceux sont plus propres que d'autres à les faire naître ; mais dans tous les cas, la présence des sables doit être considérée comme ne pouvant rien changer à la nature chaux.

#### **4.1.4 .Le sablon :**

On nommera sablon tout débris de minéraux, quartz, basalte, schiste, etc., réduit en poudre très-divisée.

Des expériences directes ont prouvé que le sablon, étant mêlé à la chaux, ne peut pas lui faire perdre de ses qualités, à moins que son volume ne soit en disproportion avec celui de la chaux ; les circonstances peuvent être telles, qu'il lui donne quelque propriété hydraulique, et la transforme à froid, de chaux pure en ciment<sup>92</sup>.

#### **4.1.5. La pouzzolane :**

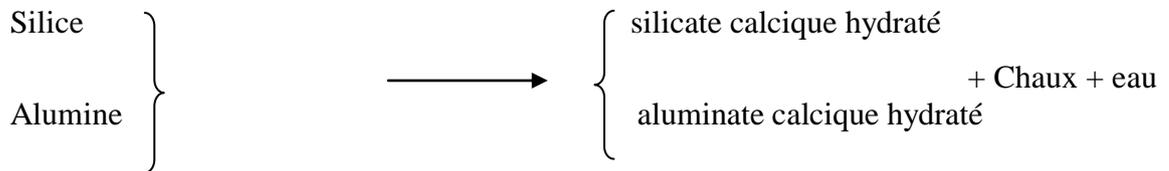
Les pouzzolanes de Pozzuoli (localité de Pouzzoles, une ville proche de Naples), mais aussi du Latium, sont des roches pyroclastiques meubles ou de faible cohésion provenant des éruptions volcaniques de type explosif, le terme de pouzzolanes s'applique à tout un ensemble de matériaux volcaniques meubles, non cimentés, émis puis déposés par voie aérienne et refroidis dans l'air. Actuellement, ce terme est employé pour tous les matériaux siliceux ou silico-alumineux qui ne possèdent pas en eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes<sup>93</sup>.

---

<sup>92</sup> Raucourt Colel, Traité sur l'art de faire de bons mortiers et d'en bien diriger l'emploi, ou Méthode générale pratique pour fabriquer en tous pays la chaux, les ciments et les Mortiers, 2<sup>e</sup> édition Paris 1828, pages 5-6.

<sup>93</sup> Coutelas, op cit., page 84.

La réactivité des pouzzolanes volcaniques (aspect chimique de la pouzzolanité) est fonction de la nature et de la proportion des phases qui les composent. Parmi celles-ci, on retrouve le verre volcanique, très sensible au pH basique développé par la chaux en solution, qui tend à se dissoudre par attaque calcobasique. Cette phase vitreuse, soluble, est potentiellement la seule réactive (Pichon *et al.* 1996). Le schéma, simpliste, de la réaction, peut s'écrire sous la forme (Dron 1978)<sup>94</sup>:

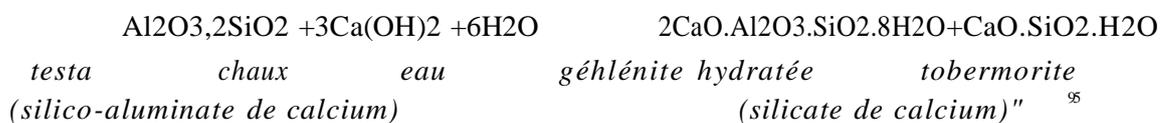


#### 4.1.6. Terre cuite (*Testa*) :

M. FRIZOT dans sa thèse explique la grande efficacité chimique de la *testa* quand elle est mêlée à la chaux pour la confection du mortier; il aurait dû préciser que la réaction chimique, de type pouzzolanique, s'effectue facilement parce que la *testa* est fabriquée avec une argile kaolinitique, ce qui est une caractéristique géologique de l'Italie. Même si son analyse chimique est fautive, il conclut avec raison:

*'Les argiles cuites à une température assez basse sont les meilleures [...], alors qu'une argile qui aurait subi un début de vitrification serait inefficace dans cette réaction: l'intérêt du tuileau antique provient essentiellement de la médiocrité de sa fabrication et de sa cuisson; des céramiques sigillées bien cuites ne donnerait certainement pas satisfaction dans un mortier.'*

Réactions chimiques, chaux + *testa* (brique pilée) :



Si l'on compare les formules de réactions de la chaux aérienne pure et celles de la chaux hydraulique artificielle, elles n'ont rien en commun. Le mélange chaux/*testa* se comporte comme une chaux hydraulique lorsque l'on ajoute l'eau au mortier. La *testa* est donc un parfait substitut pour la pouzzolane naturelle<sup>96</sup>.

94 Coutelas, op cit., page 85

95 Davidovits, op cit., page 13

96 Davidovits, op cit., page 14

## **4.2. Le mortiers à travers l'histoire :**

### **4.2.1. La préhistoire :**

En Turquie, dans l'étonnante ville néolithique de Çatal Hüyük (environ 6000 av. J.-C), le «plâtre» qui recouvre tous les sols, murs et plafonds et qui sert de support aux peintures et aux animaux modelés des temples, n'est en fait que de l'argile blanche trouvée sur place et appliquée telle quelle ; quant au mortier de terre utilisé pour la construction des murs, il est noir et riche en cendres et débris d'ossements, mais un véritable liant y est encore inexistant<sup>97</sup>.

Les constructeurs préhistoriques se servaient également d'argile crue, dont ils enduisaient les sols et les parois de leurs maisons faites de planches et de clayonnages. Les murets découverts lors de fouilles sont toujours faits de pierres sèches et les pavages datant (environ 450 av. J.-C.) sont uniquement recouverts de terre battue. Des campagnes de fouilles ont mis à jour au nord de l'Europe, ont révélé des vases de céramique dont les décors incisés étaient remplis d'une matière blanche et dure. Celle-ci, à l'analyse, s'est révélée être du calcaire, parfois mêlé de poudre d'ossements brûlés, de plâtre ou d'argile mais ce n'était pas possible de déterminer si cette pâte blanche a été appliquée à l'origine sous forme de chaux (parfois mêlée à d'autres éléments) qui se serait régulièrement carbonatée, ou s'il s'agissait simplement de calcaire finement pilé et rendu pâteux par l'adjonction de corps gras ou d'autres matières organiques qui auraient pu servir de «colle ». Pourtant, en ce qui concerne la construction, nous pouvons affirmer qu'en Europe centrale et septentrionale, aucun exemple d'utilisation de chaux ne nous est actuellement connu pour l'époque préhistorique<sup>98</sup>.

### **4.2.2 .Mortiers grecs :**

Les Egyptiens, furent parmi les premiers à utiliser le plâtre (sulfate de calcium demi-hydrate obtenu par la cuisson du gypse à environ 120 °C) pour le jointoiment des blocs de la pyramide de Chéops (vers 2600 av. J.-C).

Mais c'est par les civilisations grecque et romaine que le mortier de chaux nous est parvenu.

En effet, des fouilles ont attesté que les constructeurs grecs connaissaient les liants artificiels depuis une époque très reculée<sup>99</sup>.

Dès le VIIe siècle av. J.-C. les architectes grecs eurent généralement recours à la technique des stucs et revêtements pour dissimuler l'aspect rude de certains matériaux comme le

---

<sup>97</sup> Adams, op cit., page 69.

<sup>98</sup> Daumas, Histoire générale des techniques, Paris 1962, tome1, page 203.

<sup>99</sup> Daumas, op cit., page 205.

tuff et le calcaire Mais le mortier de chaux n'a été utilisé en Grèce pour la construction des murs qu'à partir de la fin du IIe ou du début du Ier siècle av. J.-C. (maisons de Délos et de Théra). Dans les constructions antérieures, les pierres étaient liées par un mortier simplement fait de terre et d'argile.

De façon générale, les mortiers helléniques sont à base de chaux et de sable fin; les stucs à base de chaux, de plâtre et de poudre de marbre. Mais, selon les nécessités du moment, des adjuvants ont parfois été additionnés pour rendre le mortier plus dur et plus stable. A Théra, l'on introduisait dans le mélange chaux-sable de la poudre volcanique ou de la «terre de Santorin» exploitée sur l'île. On obtenait ainsi des mortiers stables à l'eau et dont les propriétés ont une certaine analogie avec les mortiers modernes à base de liants hydrauliques. Ce procédé était également connu hors de l'île, puisqu'on a trouvé de cette «Terre de Santorin » dans les stucs qui ornaient l'Héphaïstéion d'Athènes. Ailleurs, à défaut de roche volcanique, on utilisait de la tuile ou brique pilée, ainsi qu'en témoigne la coloration rose de certains enduits extérieurs. Le premier emploi connu de tuileau remonte à l'époque de la construction des citernes de Jérusalem (au Xe siècle av. J.-C) 6. Cet usage semble avoir été introduit par des ouvriers phéniciens qui connaissaient donc empiriquement les propriétés des matériaux qu'on appelle aujourd'hui pouzzolanes artificielles<sup>100</sup>.

#### **4.2.3. Les mortiers romains :**

La civilisation romaine a amélioré les procédés de fabrication de la chaux et les techniques de mise en œuvre du mortier; elle a su exploiter toutes les possibilités de ce matériau, et elle a surtout, en la vulgarisant, répandu cette nouvelle technique dans tout l'Empire.

Une des plus anciennes mentions de l'«opus *caementicum* » se trouve chez Caton (IIe siècle av. J.-C) qui décrit déjà une construction «ex calce et *caementis*». La date exacte de l'introduction du mortier de chaux à Rome n'est pas connue, mais on sait que cette technique a été utilisée dès les deux derniers siècles de la République (IIe et Ier siècle av. J.-C), qu'elle se développa et se généralisa rapidement, supplantant les systèmes précédemment utilisés, tels que F «opus *quadratum*» (gros blocs ajustés sans mortier) et l'«opus *latericum*» primitif, en «*later crudus* » ou briques séchées<sup>101</sup>.

Vitruve est la source la plus complète pour l'étude des éléments constitutifs du mortier de chaux romain (Ier siècle après J.-C).

---

<sup>100</sup>Orlandos, Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs, Paris 1966-1968, volume, page 136.

<sup>101</sup>Caton, Les agronomes latins, Paris 1861.page 282.

Mais outre ces éléments de base, il mentionne aussi l'emploi d'adjuvants déjà utilisés par les Grecs tels que la cendre volcanique ou la tuile pilée (tuileau)<sup>102</sup>.

Les Romains ont pratiqué à grande échelle l'adjonction à la chaux d'argile cuite et surtout de pouzzolane qui confère au mortier des propriétés hydrauliques. Mais outre ces caractéristiques de composition, le mortier romain doit aussi son exceptionnelle qualité au soin avec lequel on choisissait et mélangeait ses éléments constitutifs. Ce mortier était utilisé massivement pour noyer un blocage de galets de toutes dimensions au cœur des murs, formant ainsi un béton compact entre les deux parements appareillés. Toute cette masse était tassée avec des pilons, de manière à remplir absolument tous les interstices, à chasser la moindre bulle d'air<sup>103</sup>

#### **4.2.4. Mortiers médiévaux :**

Bien que les mortiers médiévaux soient encore très mal connus, il semble qu'aucun progrès technique remarquable n'ait été réalisé pendant cette période. Après l'éclatement de l'Empire romain, il est difficile de conserver une vue d'ensemble de cette évolution, car à la suite des grandes invasions, chaque pays, chaque région a désormais suivi sa propre voie. Dès lors les mortiers varient eux aussi beaucoup de lieu en lieu, d'époque en époque, voire même entre des édifices contemporains. Ils sont très souvent de qualité médiocre, friable, peu homogène et appliqués sans le tassement caractéristique des constructions romaines; à l'intérieur des murs, il reste souvent de nombreuses cavités.

En Allemagne, les recherches de E. Hennig et R.D. Bleck, ont permis d'établir le non-fondé de certaines croyances persistantes, au sujet de protéines animales qui auraient été incorporées aux mortiers médiévaux. En effet, l'adjonction de substances telles que blanc d'œufs, lait, caséine ou sang n'est pas attestée dans la littérature historique; d'autre part, ces chercheurs ont examiné des échantillons de mortier datés du XIe au XVIIe siècle. Jamais ils n'ont pu établir la présence de matières organiques. Par contre, l'adjonction de plâtre ou de tuileau a été prouvée, car ce sont là, nous l'avons vu, des additifs classiques.

---

<sup>102</sup>Choisy, op cit., page 14.

<sup>103</sup>Caton, op cit., page 28.

#### 4.2.5. Les mortiers ottomans

Les documents habūs, des sources écrites de la période ottomane en Algérie nous renseignent sur les différentes appellations du mortier et son mode de fabrication selon l'usage auquel il est destiné.

*«Le mortier qui était désigné dans les documents habūs par le terme générique debaghlī ou celui de «Khumra» quand il est prêt à l'emploi, est un liant à base de chaux. Ces qualités essentielles de prise (colle) ont permis différents appareillages de murs mais aussi de couvertures (Voûtes, coupoles....)»<sup>104</sup>.*

Le mortier pouvait avoir plusieurs destinations soit de remplissage, de jointoiment ou d'enduit. Quelle que soit sa destination d'usage, les composants de base sont les mêmes. Ce sont des mortiers à base de sable et de chaux.

Ces documents rapportent qu'on additionnait à ces mélanges d'autres composants tels que les tuileaux ou la briques pillées et la pierraille dans certains cas. R. Lespes<sup>105</sup> mentionne que les sables rouges plus au moins argileux, des formations pliocènes, mélangés à la chaux grasse composaient le mortier qui avait servi à la construction des maisons de la Casbah d'Alger et de l'enceinte ottomane. Par ailleurs les écrits de A. Rozet<sup>106</sup> atteste que le mortier de l'époque ottomane était composé de la chaux et de terre rouge du terrain diluvien. les résultats de ces travaux qui se basent sur l'exploitation des archives ottomanes, attestent que le principal composant des mortiers à l'époque Ottomane à Alger est la chaux.

*« La fabrication de la chaux se déroulait dans des endroits assez proche de la ville et débute par la calcination des pierres calcaires (une qualité de pierre calcaire blanc, aussi bien pur que très tendre). Le matériau consommé, mue vers une chaux vive »<sup>107</sup>*

S. Chergui en se basant sur les registres de comptabilité<sup>108</sup> des documents habus, mentionne l'utilisation de deux types de chaux qui pouvait avoir plusieurs appellations selon sa nature et son usage, comme elle le précise dans sa thèse.

*« La première, appelée «djir ghabra», c'est-à-dire la chaux en poudre caractérisant la chaux vive, et la seconde «djir dhars», c'est-à-dire la chaux éteinte.*

---

<sup>104</sup>S. Chergui, Construire, gérer et conserver les mosquées en al-djaza'ir ottomane, Thèse de Doctorat, Sorbonne, Paris, Sorbonne 2007 pages. 296-297

<sup>105</sup>R. Lespes. Alger, Etude géographique et d'histoire urbaine, Librairie Félix Alcan, mai 1930, Paris, page 55.

<sup>106</sup>S chergui, op cit., page 297.

<sup>107</sup>S.Chergui, op cit., page 298.

<sup>108</sup>Les registres de comptabilités font partie des archives laissées par l'administration ottomane. Ils sont mentionnés par S.Chergui, op cit., page 297-298.

*Dans la comptabilité de shawwāl 1148/ 1735-36, il est mentionné que djir dhars résulte d’extinction (tardjīh), alors que celle de rabī al-awal 1150/1737-8 atteste qu’une quantité de chaux vive (djir ghabra) a été éteinte directement sur chantier »*

Ces différents types de chaux par un simple mélange « à des proportions variables d’agrégats, à savoir Sable, tuileau ou galet d’oued»<sup>109</sup> permettent la fabrication de mortier malléable destinés à différents usages tels que:

*« Le crépissage (talbīs) ou pour la réfection (djīrghabra li tarqī) ou bien le badigeonnage (djīrdhars 'ilbayyād) »<sup>110</sup>*

Cette recherche doctorale, nous renseigne sur les proportions précises à respecter entre le liant et les agrégats ainsi, le sable doit être mélangé à la chaux selon des proportions bien précises (Une part de chaux pour deux à trois parts de sable). Il présente des granulométries largement dépendantes de l’utilisation du mortier à gâcher, que ce soit un mortier de remplissage , de jointoiement ou d’enduit: S. Chergui <sup>111</sup> souligne que :

*«Lors de la reconstruction (binā) de Djāma al-sayyida, il a été mentionné l’utilisation d’une part de sable grossier (ramlhasbā) intégré au mortier de remplissage au niveau des planchers des boutiques, d’autre part le sable fin (ramldaḳīq) a été utilisé pour le crépissage (lil- talbīs)».*

Quand le mortier est destiné à être utilisé comme, enduit pour des surfaces nécessitant une parfaite étanchéité comme le revêtement des terrasses, le crépissage des surfaces des citernes ou le calfeutrage des chutes d’eau pluviale, il devait être parfaitement étanche. Dans sa fabrication, les maçons de l’époque ajoutaient de nouveaux composants comme les cendres et l’huile d’olive et appliquaient une technique de mise en œuvre très spécifique.

---

<sup>109</sup> S.Chergui, op cit., page 297.

<sup>110</sup> S.Chergui, op cit., page 300.

<sup>111</sup> Ibid.,

### 4.3. Altération des mortiers :

Le mortier utilisé aussi bien pour le hourdage ou comme enduit, constitue la partie la plus stratégique et la plus vulnérable de la maçonnerie, son altération et la rupture de sa continuité met en péril l'ensemble de la maçonnerie.

Les causes de pathologies des mortiers peuvent être de 3 ordres<sup>112</sup>:

- **Causes mécaniques** : des contraintes dues à des tassements différentiels, ou séismes, qui peuvent dépasser la résistance du mortier et le fissurer ainsi que l'incrustation de la végétation à l'intérieur des joints.

- **Causes chimiques** ; dues à l'humidité (présence d'eau) ou à la pollution : la chaux de nature basique, sont sensibles à l'action des acides, ce qui se traduit par des chaînes de décomposition qui produisent des sels, dont certains (les sulfates) cristallisent en produisant un certain nombre d'altération comme les gonflements, l'écaillage.

- **Causes biologiques** : la capacité des micro-organismes, bactéries, levures et champignons à transformer de l'azote atmosphérique en acide nitrique, ou des pyrites en acide sulfurique. La multiplication de ces phénomènes provoque des altérations parfaitement observables.

- **Causes humaines** : Les actions de l'homme tels que des interventions de restauration maladroites comme l'utilisation de matériaux incompatibles ou bien des actions mécaniques malheureuse ou l'exécution de travaux inappropriés ( installation de câbles , coffret électrique ...) peuvent engendrer une détérioration prématurée du bâtiment.

L'ensemble de ces causes induisent des pathologies qui couvrent un large domaine de désordres qui sont similaires à ceux qui affectent la brique. On peut en citer :

- **Perte de la matière** : qui revêt différentes manifestation tels que la desquamation, l'écaillage et l'effritement, le gonflement et le décollement. Ces manifestations sont la conséquence du taux d'humidité dans le mortier de pose ou l'enduit, le second facteur est La présence de sulfate qui peut provenir des matériaux de maçonnerie eux-mêmes ou bien de l'environnement immédiat<sup>113</sup>.

---

<sup>112</sup> Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Mission ingénierie et référence technique, Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, Juin 2006, p34.

<sup>113</sup>R.P.J. Van Hees, L.Binda, I.Papayanni and E.Toumbakari, Characterization and damaged analysis of old mortars,RILEM TC 167-COM: « Characterization of old mortars with respect to their repair », in Materials and structures, Vol 37, November 2004, pp 644-648.

- **Les fissurations** : qui peuvent avoir différentes manifestations tels que les lézardes, les fissures, les microfissures et le faïençage. Elles sont induites par plusieurs facteurs notamment des erreurs de fabrication ou de mise en œuvre, comme un séchage trop rapide de l'enduit. L'eau qui s'évapore trop vite, n'a pas le temps de participer à la carbonatation de l'enduit dans sa phase de prise aérienne. Les vibrations liées aux tremblements de terre, les incendies, le gel font aussi partie des causes de fissuration.

- **Altération biologiques** : La colonisation des mortiers et enduits par les algues, les mousses et les lichens se développe sous l'effet de l'humidité, de la chaleur et de la lumière. Les mousses se développent surtout sur les façades Nord, donc les plus exposées à l'humidité. Les lichens se nourrissent principalement de calcaire. Ils peuvent s'enfoncer de plusieurs mètres dans le support

- **Altérations chromatiques** : L'altération chromatique résulte de la modification fâcheuse d'un aspect physique de la maçonnerie. On y recense les salissures résultant souvent de la pollution, les encroûtements, les efflorescences, les spectres et les nuances de couleurs. Elles peuvent être d'origine chimique, biologique ou humaine. Elles sont liées principalement aux facteurs environnementaux et à l'action du temps ou à celle de l'homme.

## **5. Conclusion :**

L'état de connaissance, relatif aux matériaux de construction anciens, permet de constater que ces derniers ont été utilisés depuis les temps, les plus reculés. Les dimensions et les modes de travail et de fabrication n'ont cessé d'évoluer, depuis l'antiquité, jusqu'à la période contemporaine.

L'homme a commencé à creuser le sol avec des outils rudimentaires en bois, corne ou os pour les sols meubles, en silex pour les roches. Pour façonner les roches tendres, il a donc recours à des outils de roches dures. Mais, pour façonner les roches dures, il doit attendre l'avènement des métaux, des abrasifs puissants comme le diamant. Les premières exploitations se font naturellement par ramassage des pierres à la surface du sol. Des pierres prélevées à l'état brut sont utilisées dans la construction des murs en pierre sèche. Les cailloux arrondis des rivières sont un matériau de choix mais sont difficiles à mettre en œuvre sans mortier ; on les cimente donc au moyen de mortiers d'argile, cette dernière étant prélevée sur place quand cela est possible. La recherche de pierres de plus en plus en profondeur conduit à l'établissement des carrières à ciel ouvert ou souterraines.

Dans le monde antique, s'impose progressivement la nécessité de trouver les pierres les plus

aptes à une destination de construction. Le travail d'extraction et de débitage des pierres se fait en plusieurs étapes : après le travail de découverte des bancs de pierre propres à produire les pierres, dures ou tendres, compatibles avec leur destination.

Les Romains ne procèdent pas autrement. À la nécessité d'extraire les pierres pour les besoins du marché s'ajoutent un goût particulier pour l'exploit, qui s'exprime par l'extraction de pièces monumentales. Par exemple, les colonnes en granite en marbre en cipolin ect.... Quant à la brique le composant de base, pour sa fabrication est l'argile qui est généralement extraite des gisements, à proximité des villes et des chantiers de construction. La nature de ces argiles diffère d'un site d'extraction à l'autre.

Pour renforcer cette terre brute et augmenter sa plasticité, plusieurs rajouts à caractère feldspathique et calcaire ont été réalisés. A l'antiquité, les rajouts étaient du sable et dans certains cas de la poudre de marbre, alors qu'à la période médiévale, on procédait, plus à «un clivage», de la terre argileuse, lors du malaxage et le seul rajout, autorisé était le sable. Deux facteurs influent sur la qualité des briques, la nature de l'argile et la température et le pallier de cuisson ainsi que l'atmosphère du four. Ces différents facteurs ont une influence sur les caractéristiques physiques et mécaniques des briques.

Les dimensions et les formes des briques ont connu aussi des variations et une évolution à travers le temps selon leur usage dans la construction.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, on regroupe encore sous le nom de *mortier* toute espèce de mélange de terres crues ou cuites, ou d'autres matières obtenues par calcination, ou de chaux avec ou sans sable, et d'eau en suffisante quantité pour pouvoir le gâcher, le transporter et le mettre en œuvre convenablement à sa destination. Dans les campagnes, où les fours à chaux sont éloignés et la chaux rare et chère, on se contente alors souvent, pour faire du mortier de terre, de terre crue mais franche et un peu grasse, en la délayant avec de l'eau, et il s'en trouve qui a beaucoup de ténacité. Quelquefois, on y mélange de la paille ou du foin haché, du regain et même de la chaux quand on en dispose, pour lui donner plus de consistance ou le rendre plus maniable.

Cet état de connaissance ne diffère pas de celui qui prévaut dans l'Antiquité. Beaucoup d'édifices de la Rome antique qui a fait le succès de la construction romaine - sont toujours debout, du fait que l'appareillage était réalisé avec soin et avec une bonne chaux. On ne parle plus de la grande majorité des édifices qui ont disparu du fait de la médiocrité des maçonneries, souvent sommairement liées à l'argile ou à de la chaux de médiocre qualité,

La chaux s'obtient par calcination de pierre calcaire vers 1 000 °C, dans des fours à chaux, opération durant laquelle elle abandonne son gaz carbonique. Le produit restant, un oxyde de calcium, est appelé chaux vive et prend l'apparence de pierres pulvérulentes en surface que l'on

va hydrater ou éteindre par immersion dans l'eau. Cette immersion provoque la dislocation, un foisonnement, ainsi qu'une forte chaleur. L'extinction de la chaux se fait de préférence dans des fosses attenantes au chantier. Le résultat est une pâte qui prend le nom de *chaux éteinte*. Ce matériau plastique, mêlé à des agrégats, va constituer les mortiers. Une fois incorporé dans la maçonnerie, un phénomène de cristallisation, ou carbonatation, s'opère au contact de l'air : le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère fait retourner la chaux à l'état de calcaire.

La présence d'argile, comme d'autres corps, pouvant modifier la phase d'extinction, les Romains supposent, de manière erronée, que ces substances diminuent la qualité de la chaux. Les Romains utilisent donc la seule chaux aérienne. Cet usage perdure jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle.

La *chaux grasse*, entreposée et recouverte d'argile, peut se conserver fort longtemps à l'état de pâte, des années éventuellement. Cette caractéristique accompagne donc les chaux grasses obtenues à partir de calcaires très purs, les marbres par exemple. Elle est donc très prisée des Romains, car elle permet aux maçonneries de se tasser progressivement, au fur et à mesure de leur enlèvement, assurant au niveau du joint une répartition uniforme des efforts.

Vers le I<sup>er</sup> siècle, la Rome antique améliore la technique de la chaux par l'incorporation de sable volcanique de Pouzzoles, la pouzzolane, ou de tuileaux. Comme le dit Vitruve (Vitruve, Livre II. Chapitre VI), le mortier peut résister à l'eau et même faire prise en milieu très humide. Cette vertu est due comme on le sait aujourd'hui à la présence d'une grande quantité de silicate d'alumine. En ajoutant à la *chaux aérienne* de la pouzzolane ou des tuileaux, on la transforme artificiellement en chaux hydraulique. C'est en 1818 que Louis Vicat expliquera les principes de cette réaction, dans sa théorie de l'hydraulicité, ouvrant la voie à la découverte du ciment Portland.

## **Chapitre 02**

*Genèse des mosquées dans le monde musulman.*

## **1. Introduction :**

Le Coran emploie le terme de masjid pour des sanctuaires préislamiques et pour le prophète Qsssl, le masjid principal reste celui – préislamique – de La Mecque. Le musulman, en principe, n'a pas besoin de sanctuaire pour accomplir les rites de sa religion. Selon un hadith, la terre entière est le masjid d'Allāh (par opposition aux juifs et aux chrétiens qui auraient besoin de synagogues et d'églises), et un autre dit : « Là où t'atteint l'heure de la prière, tu dois l'exécuter et cela est un masjid. » D'ailleurs, la première communauté islamique à La Mecque n'avait pas d'endroit particulier pour accomplir la prière en commun. Il n'est donc pas étonnant que le Coran ne contienne aucune précision en ce qui concerne la forme que doivent avoir les masājid islamiques.

Toutefois, l'attachement du Prophète Qsssl aux traditions mecquoises, toutes centrées sur un sanctuaire, et la nécessité d'un espace pour le service religieux communautaire aboutissent à la création d'édifices spécifiques. L'Arabie préislamique avait connu, à côté de temples, de synagogues et d'églises, des espaces en plein air, entourés d'une enceinte, en général situés en dehors des villes, et qui servaient aux assemblées de croyants lors des fêtes religieuses. La tradition du musalla (de salāt, prière) est reprise par les premiers musulmans et fait partie des éléments qui déterminent la configuration des premières mosquées communautaires.

Dès le VII<sup>e</sup> siècle, une distinction s'établit entre le simple masjid – oratoire privé – et le masjid djāmi' (de djama'a, réunir, rassembler) – la mosquée qui réunit la communauté entière (ou tout du moins la partie masculine de celle-ci) pour le service religieux du vendredi midi, qui comprend un prône (khutba),

Dans ce chapitre nous avons étudié les mosquées, d'un point de vue architectural plan disposition et aménagement et quelques éléments architectoniques, pour les toutes premières mosquées construites à l'aube de l'islam en commençant par la mosquée du prophète Qsssl à Médine passant par les autres mosquées édifiées par les Kholafaa EL Rachidoune et les califes ummeyyade, abassides et les dynasties musulmanes dans le monde et en Algérie jusqu'à la période Ottomane.

Cette étude nous a permis de faire une conclusion sur les premières mosquées et leurs genèse dans le temps, la disposition des nefs, le type des arcades utilisées, l'orientation de la Qibla, la position du mihrab, ces éléments clés vont nous servir dans la lecture et dans la compréhension de l'architecture de la mosquée de Sidi Ghanem et de tirer des conclusions qui peuvent nous aider à déterminer la période de son édification.

## **2. La mosquée, éléments architecturaux et architectoniques :**

Le mot Masdjid (pleuriel . masadjid), mosquée, associe la racine sadjada " se prosterner" au préfixe de lieu m; il désigne donc avant tout le lieu où le fidèle se prosterne pendant les prières rituelles et ne suppose à première vue rien de plus qu'un espace rituellement pur. Au fil du temps, ce terme est cependant venu recouvrir une réalité d'une complexité grandissante, tant <sup>dans</sup> ses fonctions que dans son organisation et, surtout, dans ses formes architecturales.

La première communauté islamique à La Mecque n'avait pas d'endroit particulier pour accomplir la prière en commun. Il n'est donc pas étonnant que le Coran ne contient aucune précision en ce qui concerne la forme que doivent avoir les masâdjid islamiques<sup>114</sup>.

### **2.1 Principaux éléments de l'architecture des mosquées.**

#### **2.1.1. Le plan :**

Avant d'entreprendre l'étude des formes des mosquées, il est utile, nous semble-t-il, de dire quelques mots sur les deux premières mosquées édifiées par le Prophète « QSSSL», l'une à Qubâ' et l'autre à Médine. Emel Esin , nous donne du premier oratoire, la description suivante : « Ce fut un simple édifice carré du type traditionnel dans la région de Yathrib, aussi bien que dans les autres oasis du Hedjaz. Le prophète « QSSSL » en traça les contours avec la lance qu'il avait héritée de son père. Chaque côté avait soixante-dix aunes de long et les murs étaient construits en pierre prises dans les montagnes voisines».

Quant à la mosquée de Médine, les avis divergent sur sa forme. Selon Emel Esin, Creswell et Golvin, elle était carrée et mesurait 100 coudées (environ 50 m) de côté. Au contraire, d'après A. Fikry, elle était rectangulaire et mesurait 70 coudées de profondeur et 60 coudées de largeur. Puis elle fut agrandie, sept ans après l'hégire, et mesura 100 coudées de profondeur et 90 coudées de largeur <sup>115</sup>.

Nous pouvons classer le développement des mosquées en quatre périodes chronologiques :

- La première période (étape préclassique): Sous les Omeyyades, l'architecture religieuse et civile se développe avec la mise en place de nouveaux concepts et de nouveaux plans. Ainsi, le plan arabe, à cour et salle de prière hypostyle, devient véritablement un plan type à partir de la construction de la grande mosquée des omeyyades, qui servira de repère aux bâtisseurs pour la naissance du plan arabe.
- La deuxième période (étape classique) : apparaît au X<sup>e</sup> avec la Dynastie Seldjoukide le plan iranien ou persane caractérisé par l'emploi d'iwans et une salle de prière sous coupole

---

<sup>114</sup> Ben Azzouna Nourane, Cours histoire de l'art et archéologie de l'islam, l'architecture de la mosquée du VIII<sup>e</sup> au X<sup>e</sup> siècle, université de Strasbourg 2005, page 02.

<sup>115</sup> BOUROUIBA Rachid Apports de l'Algérie à l'architecture Religieuse Arabo-islamique, Office des Publications Universitaires, Alger, 1986, page 11.

- La troisième période (dernière étape classique) : caractérisé par l'utilisation du plan arabe.
- La quatrième période (étape postclassique) : En XVI<sup>e</sup> : apparait le plan Moghols en Inde influencé par le plan Iranien ,il apparait aussi le plan Ottoman qui est inspiré du plan de l'église Sainte-Sophie que les musulmans découvrent après la conquête de Costantipole en 1453 ap-jc.<sup>116</sup>

### 2.1.1.1 Le plan Arabe :

#### a) le plan hypostyle :

Le plan arabe ou plan Hypostyle ; se compose d'une cour à portiques et d'une salle de prière à colonnes, les nefes étant dirigées parallèlement ou perpendiculairement à la qibla.

Les mosquées de plan arabe ont été construites notamment sous le règne des Abbassides et Omeyyades ; nous les trouvons dans tout le monde islamique, depuis la Syrie jusqu'au Maghreb en Espagne et en Irak, exemple la mosquée d'El Kufa en Irak<sup>117</sup>, (Figure 2.1 et 2.2).

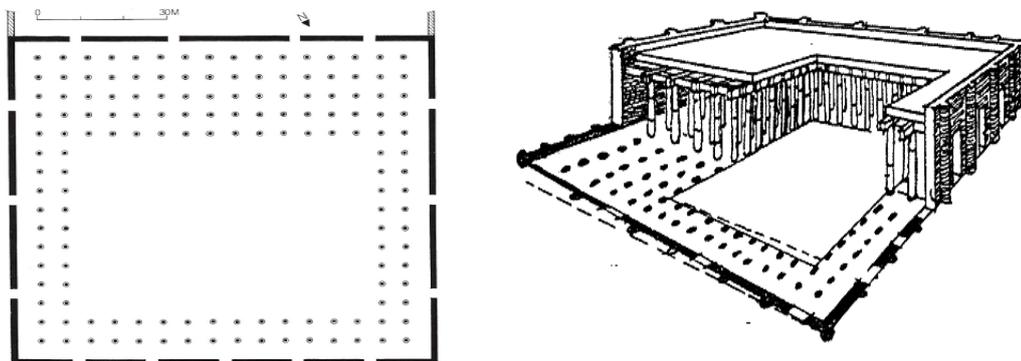
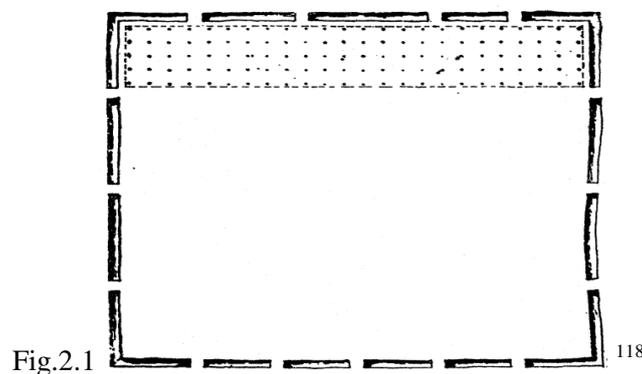


Fig.2.2. Mosquée d'el kufa après l'extension de ZIYAD en 670, plan et coupe<sup>119</sup>.

<sup>116</sup> حسين مؤنس، المساجد، الكويت، 1981، صفحة 84 - 89.

<sup>117</sup> Gabriel Leroux, les origines de l'édifice hypostyle ; institut français d'archéologie orientale du Caire 1913, page 26.

<sup>118</sup> عبد الله كامل موسى عبده، المسلمون وأثارهم حتى عصر الخلفاء الراشدين، المجلد 01. جامعة جنوب الوادي، مصر، ص 256

<sup>119</sup> ريتشارد أنتغهاوزن، الفن الاسلامي والعبارة (650 م 1250 م)، دار الكتاب الوطنية أبو ظبي 2012، ص 24

**b) le plan hypostyle basilicale à abside :**

La salle de prière présente des nefs parallèles au mur de *qibla*, le mur orienté vers la Mecque. Ces nefs sont interrompues par une nef transept, plus large, qui mène directement à un *mihrab*, niche aménagée dans le mur de *qibla* indiquant la direction de la prière. Ce plan reprend celui des basiliques byzantines tout en l'adaptant aux besoins des musulmans, il permet aux croyants, lors de la prière, de s'agenouiller en longues rangées parallèles au mur de *qibla* qui leur fait face<sup>120</sup>, (figure.2.3) et (figure.2.4).

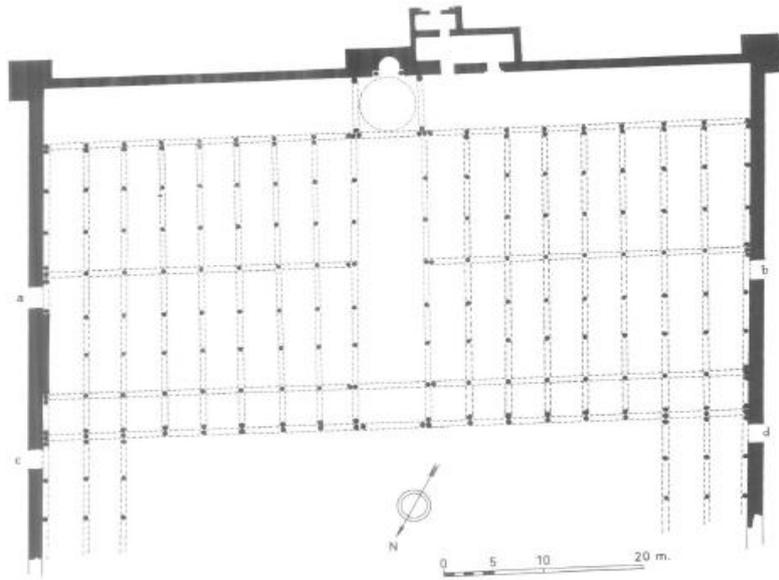


Fig 2.3. Plan de la mosquée d'El Kairouan en 836 ap.jc<sup>121</sup>.

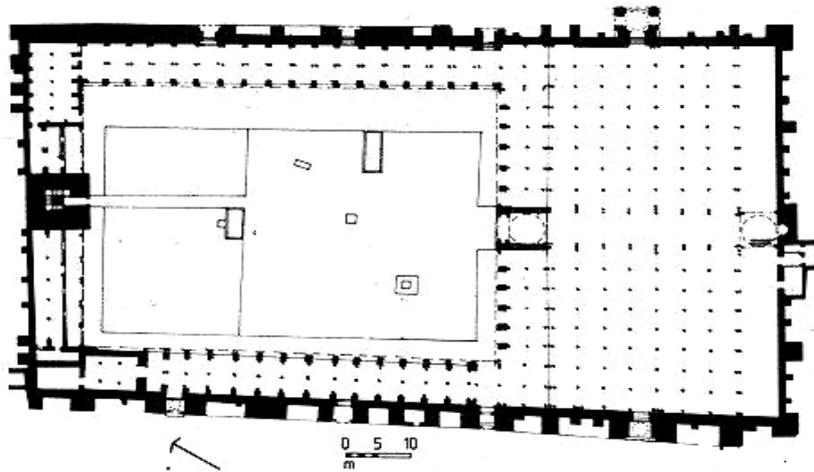


Fig.2.4. Plan actuel de la mosquée d'El Kairouane<sup>122</sup>.

<sup>120</sup> Gabriel Leroux, op cité, page 46.

<sup>121</sup> Lucien Golvin, Quelques réflexions sur la grande mosquée de Kairouan à la période des Aghlabides, Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée, N°5, 1968. Page 72.

<sup>122</sup> أحمد فكري، مساجد الإسلام مسجد القيروان، مطبعة المعارف، مصر 1936، ص 20

### 2.1.1.2. Le plan Iranien (persane) :

Apparaît en Iran au tournant des (XI-XIIe siècle). Son architecture reprend les éléments fondamentaux de la mosquée arabe (cour, salle, mur de qibla). Mais elle les intègre employant des formes d'origine iranienne et préislamique (iwān, salle à coupole). Cette mosquée est composée d'une cour rectangulaire à ciel ouvert entourée de salle de prière hypostyle, formées d'une succession de petites coupoles. Le milieu de chaque côté de la cour est occupé par un grand portail voûté plus ou moins profond : un iwān ou une salle à coupole précédée d'un iwān souvent flanquée de deux minarets. Elle contient aussi un mur de qibla orienté <sup>perpendiculairement</sup> vers la Mecque <sup>123</sup>, figure 2.5 et figure 2.6

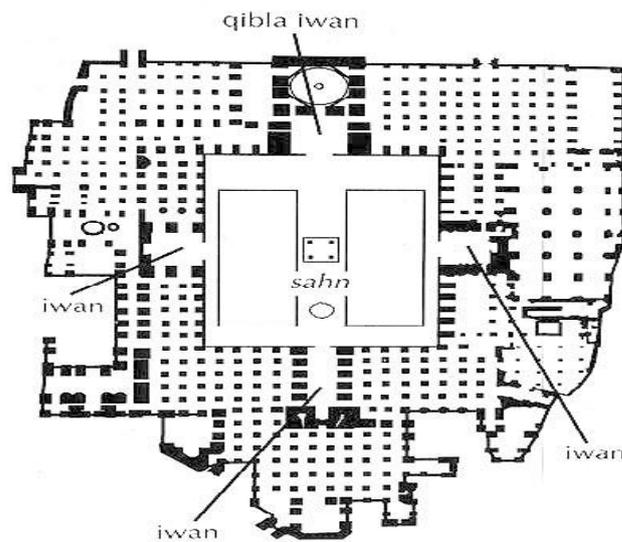


Fig.2.5. Plan de la mosquée d'Asfahane<sup>124</sup>.

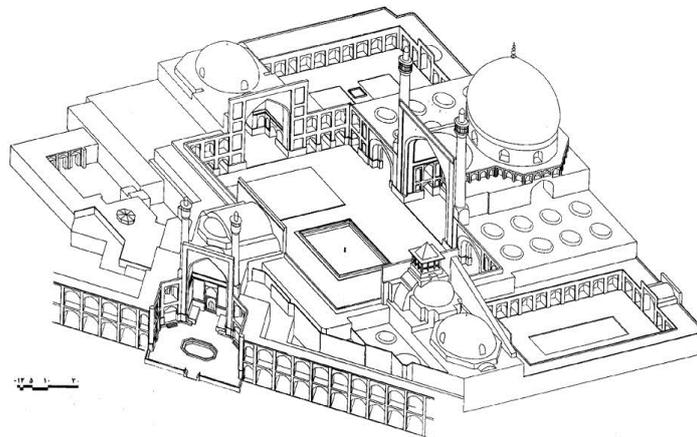


Fig.2.6. Vue axonométrique de la mosquée d'Asfahane<sup>125</sup>.

<sup>123</sup> حسين مؤنس، المساجد، الكويت، 1981، ص 122

<sup>124</sup> أحمد تاجة، موسوعة فن العمارة الإسلامية دار الحصاد للنشر والطباعة، دمشق، 2000، ص 115.

<sup>125</sup> Patrick Ringgenberg, L'univers symbolique des arts islamiques, Paris, L'Harmattan, 2009, p 29.

### 2.1.1.3. Le plan ottoman :

Développée en Asie mineure XIVe .elle connut un d'développement spectaculaire au XVIe avec l'architecte Sinan ; qui s'inspira de la basilique Sainte Sophie à Constantinople pour donner aux mosquées ottomanes une monumentalité et des volumes inédits. Les mosquées ottomanes se composent généralement d'une immense salle à coupole, bordée d'une cour à ciel ouvert entourée de galeries et flanquée, en ses angles de deux à quatre minarets, exemple la mosquée de Sultan Ahmed, (figure.2.7) ; Comme dans les salles des mosquées persanes , l'espace intérieur n'est pas coupé par des colonnes<sup>126</sup>.

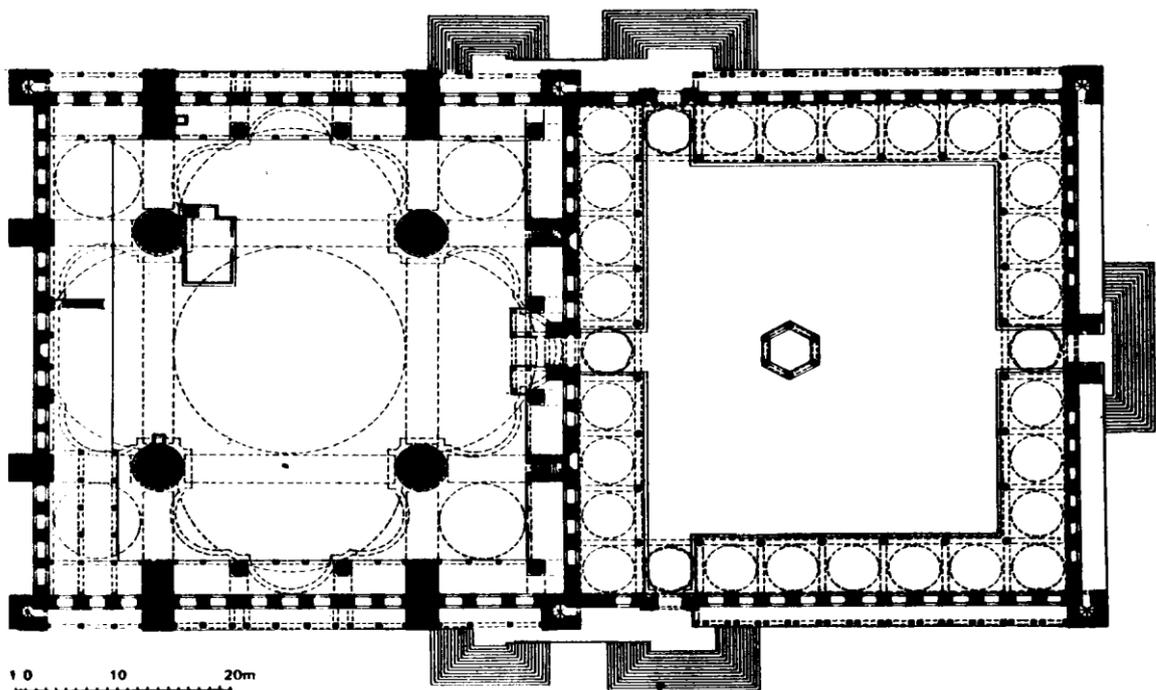


Fig.2.7.Plan de la mosquée de sultane Ahmed Istanbul<sup>127</sup>.

### 2.1.2. Les Arcs :

L'arc en ogive (Figure I.20. ; *Chapitre 01*), apparu dans l'Islam dès le VIIIe siècle, fut adopté partout comme un moyen efficace d'augmenter la hauteur des arcades

Dans l'Islam occidental les arcs en fer à cheval ou Arc plein cintre outrepassé, figure.2.8, continuèrent à être largement employés<sup>128</sup>.

<sup>126</sup> Patrick Ringgenberg, *L'univers symbolique des arts islamiques*, Paris, L'Harmattan, 2009, page 39

<sup>127</sup> العمارة العربية الإسلامية في عصورها المبكرة القرن 3-1 هجري، صفحة 134

<sup>128</sup> BOUROUIBA Rachid, op cit., page 123.

Dans de nombreuses aires islamiques, les arcs sont lobés,(figure.2.8), avec des intrados ou des bordures finement décorées pour donner de l'intérêt à la surface et au profil. Les arcades, qui peuvent être étendues indéfiniment, devinrent une caractéristique des mosquées à plan basilical, bien qu'elles exigent souvent des renforts artificiels tels que des tirants de bois qui peuvent eux aussi être abondamment décorés<sup>129</sup>.

Les arcades et les coupoles de l'architecture massive ont besoin de piliers de brique et de pierre. Toutefois, dans de nombreux édifices islamiques, les arcades sont des murs ajourés légers. Ceci, à quoi s'ajoute le goût de la décoration luxueuse, explique l'importance des colonnes (souvent faites de marbres romains ou byzantins réutilisés) ayant des socles et des chapiteaux décorés, Un grand nombre de ces derniers sont aussi réutilisés, ou sont des adaptations des chapiteaux corinthiens romains ; mais le revêtement de stalactites, en bois ou en pierre, est un thème décoratif original de l'art islamique<sup>130</sup>.

Ils constituent les arcades des nefs et des travées des salles de prières, et les arcades des galeries bordant les *sahn-s*. Leur emploi est également attesté dans l'ouverture des mihrabs, des portes d'entrée, des portes d'accès aux salles de l'imam et du minbar, et aux cabinets des latrines. Les arcs les plus fréquemment mis en œuvre dans les mosquées sont de deux types : l'arc en plein cintre outrepassé, (figure.2.8.4) et l'arc brisé (Figure.2.8.5). Les arcs d'ouverture des mihrabs sont généralement en plein cintre outrepassés : la courbure de l'arc est plus grande que le demi-cercle, et continue au-delà du diamètre horizontal. Les arcs des nefs, travées et portes sont, le plus souvent, brisés : la courbure de l'arc dépasse également le diamètre horizontal ; à ces deux types d'arcs s'ajoutent les arcs décoratifs, tels que l'arc festonné (figure 2.8.10) et l'arc à lambrequins (figure.2.8.11), qui se manifestent surtout dans les mihrabs, le registre central de la façade centrale du *sahn*, ainsi que dans les registres des minarets<sup>131</sup>.

Les origines de l'arc en plein cintre sont très difficiles à déterminer avec précision, mais on sait bien que celui-ci était déjà utilisé dans l'architecture romaine et byzantine. En Occident musulman, l'emploi de cet arc est attesté dès la deuxième moitié du 8<sup>ème</sup> siècle, dans la grande mosquée de Cordoue. Dans les premières grandes mosquées tunisiennes, à savoir celles de Kairouan et de Tunis (la Zaytûna), l'arc en plein cintre outrepassé reste l'élément de support le plus employé<sup>132</sup>.

---

<sup>129</sup> Lucien Golvin, l'architecture islamique au maghreb, pages 121.

<sup>130</sup> George Marcais, l'art musulman, page 222.

<sup>131</sup> N. Laaboudi et F. Lahsini Pour la technique d'obtention de l'arc en plein cintre, Techniques de réalisation, cf. (1986), pages . 137

<sup>132</sup> BOUROUIBA Rachid, l'apport de l'art musulman, page 97.

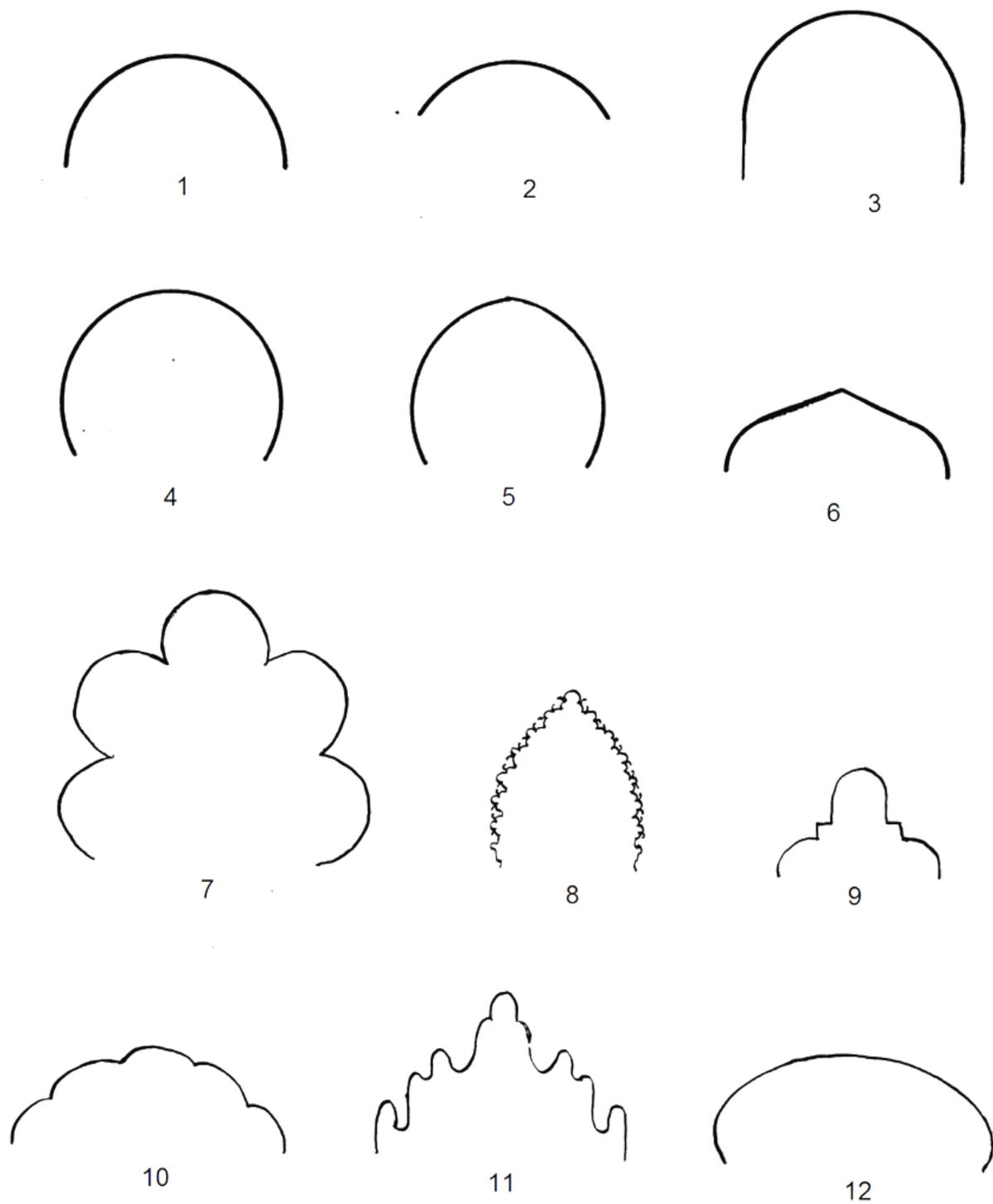


Fig.2.8. (1) Arc de plein cintre ; (2) Arc surbaissé ; (3) Arc surhaussé ;(4) Arc de plein cintre outrepassé ; ou fer à cheval (5) Arc brisé ; (6) Arc iranien ;(7) Arc lobé ;(8) Arc à lobes trèfles ;(9) Arc recticurviligne ;(10) Arc festonné ;(11) Arc à lambrequin ; (12) Arc en anse de panier<sup>133</sup>.

<sup>133</sup> Bourouiba rachid, op cit., page 30.

Les mosquées aghlabides de Sousse (Bu Fatâta et la grande mosquée) ne font pas usage d'autres types d'arcs et utilisent exclusivement l'arc en plein cintre outrepassé<sup>134</sup>. Celui-ci s'observe aussi dans la grande mosquée de Tlemcen et dans l'agrandissement almoravide de la mosquée de la Qarawiyyin à Fès<sup>135</sup>.

Les origines de l'arc brisé demeurent, comme celle de l'arc en plein cintre outrepassé, imprécises ; son emploi se trouve déjà dans le palais omeyyade d'Uhaydir<sup>136</sup>. En Occident musulman, il se manifeste dans l'art des Aghlabides d'Ifriqiya, notamment dans la grande mosquée de Kairouan. Il constitue, selon L. Golvin, l'arc de prédilection des architectes Ifriqiyens aux époques fatimide et ziride, et restera la forme la plus courante de tracé au Maghreb au cours des siècles postérieurs. Il est l'arc le plus fréquemment adopté dans les mosquées médiévales et post-médiévales du Magrib al-Aqsâ et du reste du territoire maghrébin. Dans ce sens, L. Golvin souligne : « En résumé, on croit pouvoir constater que cette forme d'arc (l'arc brisé outrepassé), peut-être apparue pour la première fois au Moyen Orient, est devenue typiquement maghrébine ; elle s'est ensuite tellement répandue dans le monde islamique qu'elle a pu être considérée comme spécifiquement musulmane. »<sup>137</sup>.

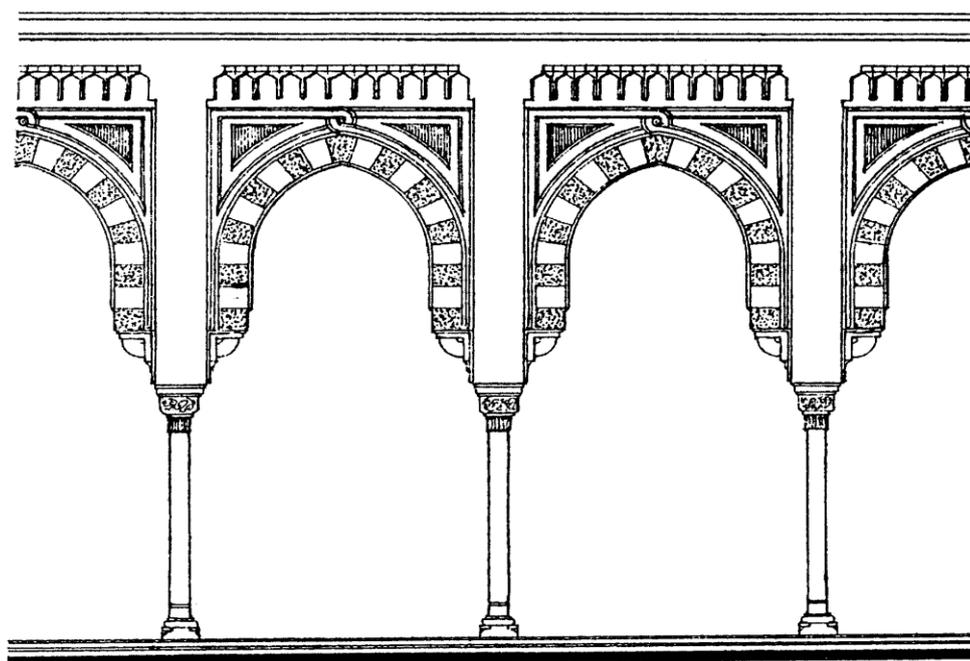


Fig.2.9.les arcades de la mosquée El Ahmadi CAIRE<sup>138</sup>

<sup>134</sup> L. Golvin op cit., page 85.

<sup>135</sup> L. Golvin op cit., page 93.

<sup>136</sup> L. Golvin op ,cit., page 92.

<sup>137</sup> L. Golvin op ,cité, page 93.

<sup>138</sup> أحمد تاجة، موسوعة فن العمارة الإسلامية دار الحصاد للنشر والطباعة، دمشق، 2000، ص 83.

### 2.1.3. Le Mihrab :

Le mihrab est un élément architectural forme d'une niche aveugle et marque sa forte présence dans l'architecture des édifices religieux musulmans (figure 2.10), creusé généralement dans le mur de la *qibla*, il est le point de repère indiquant l'orientation de la prière dans la direction de la Ka'ba ; c'est devant lui que l'imam se place pour diriger la prière. Pendant la *salât*, les fidèles se mettent derrière l'imam et s'alignent en plusieurs rangées, faisant face au mur de la *qibla*. Pourtant, cette niche n'existait pas dans la primitive mosquée de Médine, ni dans les autres anciennes mosquées de l'Islam comme celles de Kûfa, Basra, Wâsit, etc. Les textes anciens et les données archéologiques sont concordants et n'attestent pas l'existence du mihrab en creux dans ces lieux de culte <sup>139</sup>.

Dans la mosquée de Médine, le Prophète Muhammad (QSSL) désigna le mur marquant la direction de la Ka'ba par des troncs de palmier ou par des pierres superposées. Cette tradition prophétique avait servi de modèle pour les *sahâba* (compagnons du Prophète) lorsqu'ils construisaient les mosquées des autres régions <sup>140</sup>.

Ce fait historique explique donc pourquoi ces édifices de l'Islam primitif étaient dépourvus de mihrab ; G. Fehévâri pense que la *qibla* était indiquée soit par une pierre plate, soit par un trait de peinture <sup>141</sup>.

L'apparition du mihrab dans l'architecture religieuse musulmane ne remonte donc pas à l'époque du Prophète, mais date certainement de la période omeyyade. Le mihrab concave semble avoir été aménagé pour la première fois par le calife 'Umar Ibn 'Abd al- 'Aziz lorsqu'il rebâtit la mosquée médinoise du Prophète en 87-88 H./706-707 J.C. ; c'est à partir de cette date que les mihrabs semi-circulaires se répandirent dans le monde musulman <sup>142</sup>.

Le plus ancien mihrab connu au Maghreb est celui de la mosquée de Bu Fatata à Sousse en Tunisie dont la date de construction est située entre 223 H./838 J.C. et 226 H./841 J.C. ; il s'agit d'une niche en fer à cheval basse et simple avec un arc de même forme. En Orient musulman comme au Maghreb oriental, le mihrab affecte une forme semi-circulaire. Le mihrab à pans coupés semble caractériser les monuments religieux de l'Occident musulman. Dans la plupart des mosquées à nefs longitudinales, le mihrab se trouve dans le même axe que la nef médiane et la porte d'entrée à la salle de prière <sup>143</sup>.

---

<sup>139</sup> L. Golvin, « Le mihrab et son éventuelle signification », *Le mihrab dans l'architecture et la religion musulmane*, Actes du colloque international tenu à Paris en Mai 1980, page 53.

<sup>140</sup> A. Wafi (1988), « Les mihrabs et leurs ornements décoratifs », *Le mihrab dans l'architecture et la religion musulmane*, Actes du colloque international tenu à Paris en Mai 1980, page 70.

<sup>141</sup> G. Fehévâri, op cité, pages. 8-9.

<sup>142</sup> Ibid.,

<sup>143</sup> Ibid.,

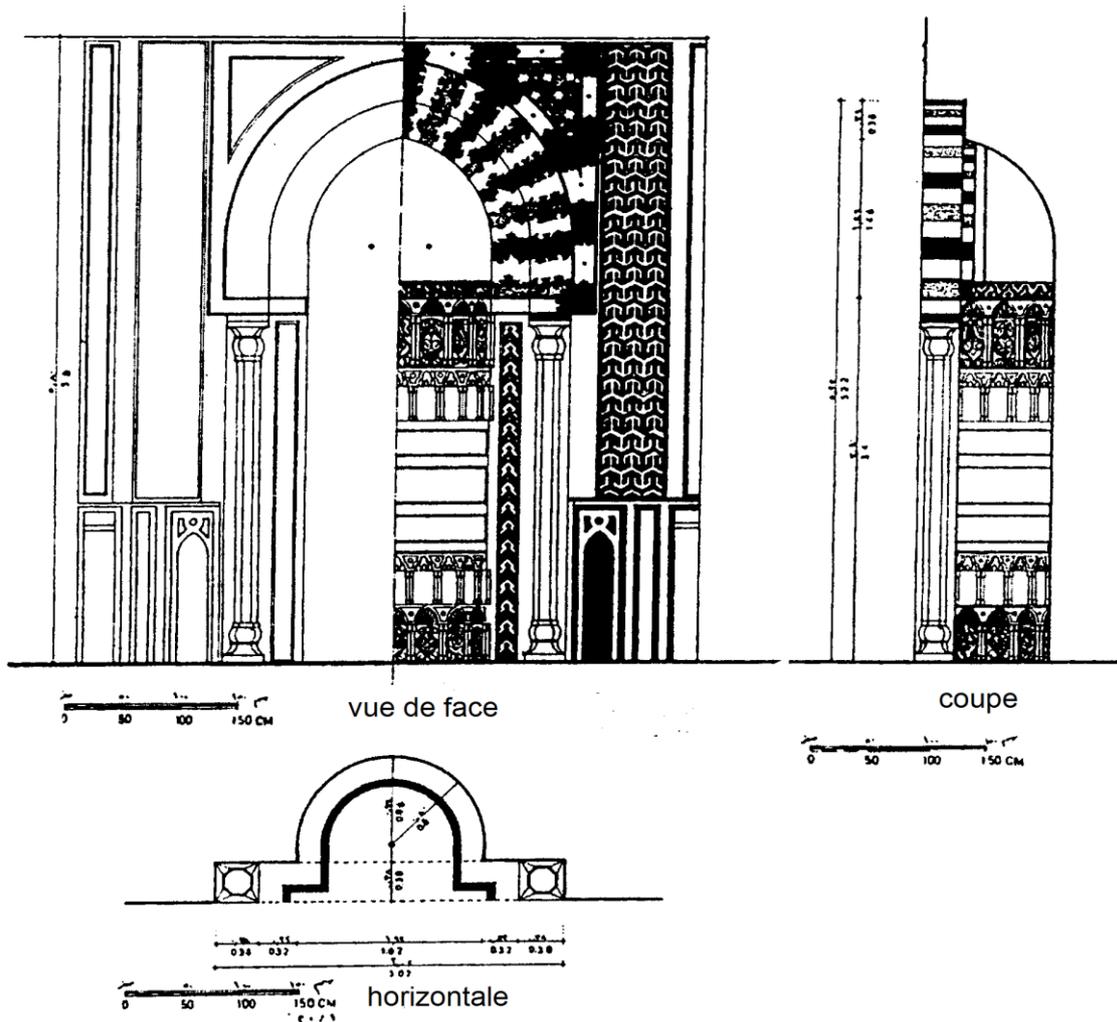


Fig.2.10. Mihrab de la mosquée d'EL Nasir Mohammed Egypte<sup>144</sup>.

### 2.1.3.1. L'orientation des mihrabs dans les mosquées :

Les études en Algérie sur l'orientation des édifices religieux restent rares et fragmentaires, et ne permettent pas de se faire une idée claire et globale. Pour cela nous allons essayer de faire une comparaison avec les mosquées marocaines et espagnoles. M. Bonine a entrepris, une recherche sur la *qibla* de quelques monuments à caractère religieux de villes marocaines et espagnoles ; il a tiré les conclusions suivants sur l'orientation de la Qibla dans différentes mosquées :

#### a).La tendance Est :

Elle concerne les édifices qui sont relativement assez bien orientés ou ont une légère déviation vers le Sud ; elle est incluse dans l'arc de cercle reliant le point 95° au point 135°.

<sup>144</sup> احمد تاجة، موسوعة فن العمارة الإسلامية دار الحصاد للنشر والطباعة، دمشق، 2000، ص 89.

Plusieurs mosquées appartiennent à cette tendance d'orientation et ne dépassent pas 40° de déviation. Il s'agit de la mosquée almoravide d'al-Naggârîn (131°), et des autres édifices, construits ou reconstruits à l'époque alaouite : *mosquée-zâwiya* de Sîdî Qaddûr al-Alamî (95°), mosquée al-Anwâr<sup>145</sup>.

**b).tendance Sud-Est :**

Les édifices religieux dont l'orientation est supérieure à 135° et inférieure à 150°. Cette tendance est représentée par cinq bâtiments. Il s'agit des mosquées médiévales de Sadrâta (144°), d'al-Haddârîn (149°) et d'al-Gannân (149°), et des mosquées alaouites d'al-Zaytûna (144°) et de Stîniya (149°). L'orientation de ces mosquées ne va pas sans présenter des analogies avec celle de quelques bâtiments religieux médiévaux et post-médiévaux du Magrib al-Aqsâ (Fès, Marrakech, Rabat, al- Qsar al-Sgîr)<sup>146</sup>.

La tendance Sud-Est est attestée également dans un bon nombre d'édifices religieux d'al-Andalus (Cordoue, Séville, Malaga, Grenade, Jaén, Malaga, Tolède, Saragosse, Cadix, Alicante)<sup>147</sup>.

**c). La tendance cordouane :**

Comme pourrait l'indiquer son nom, la tendance cordouane concerne les édifices dont l'orientation est analogue à celle de la grande mosquée de Cordoue. A l'image de ce *garnî'* andalou, les édifices en question ne visent pas la direction de la Mekke, mais s'orientent plutôt vers le lever de l'étoile de canope comme c'est le cas de la Kaaba. Ces édifices sont dirigés comme la Kaaba, et non pas vers ce temple mekkois<sup>148</sup>.

**d). La tendance Sud :**

Elle concerne les mosquées dont l'orientation se situe plus vers le sud, et se place dans l'arc de cercle, allant de 165° au point exact du Sud (180°). Peu d'édifices religieux sont orientés vers la direction du ganûb. Il s'agit de la madrasa mérinide d'al-'Udûl (171°) et des mosquées médiévales de Sîdî al-Yâbûrî (167°) et de Barrâka (176°).

En revanche, une bonne partie de mosquées sont orientées selon la direction du Sud. Celles-ci se dressent dans plusieurs d'Espagne (à Tudèle, Séville, Almería, Tolède, Mâlaga et Grenade ; L'orientation des édifices religieux médiévaux est, comme on l'a dit, défectueuse et ne vise pas la bonne direction de la Kaaba. Les erreurs d'orientation sont provoquées par des causes.

---

<sup>145</sup> M. Bonine , The sacred direction and city structure: a preliminary analysis of thé islamic cities of Morocco, Muqarnas, (1990), page 7.

<sup>146</sup> M. Bonine, op cite, pages 50-72.

<sup>147</sup> Jiminez , La qibla extraviada, Cuadernos de Madinat al-Zahra, 3,1991,pages 189-209.

<sup>148</sup> Jiminez ,op cit., p.195.

variées, relatives à la topographie du terrain, le tracé urbain, l'application des méthodes

traditionnelles, l'utilisation très limitée de l'astronomie mathématique et les conflits idéologiques.

Dans un autre ordre d'idées, certains édifices religieux Magribin et d'al- Andalus sont érigés sur l'emplacement d'anciennes églises et présentent, donc, une orientation incorrecte, conditionnée par la direction des niches chrétiennes, et par l'axe directeur des trames urbaines préexistantes<sup>149</sup>.

En règle générale, la direction du mihrab se trouve donc influencée par l'architecture de l'église : celui-ci se creuse généralement dans le mur de l'épître. Les Musulmans avaient l'habitude d'utiliser les églises dans le sens transversal afin de se conformer à la direction de la *qibla*. Une telle réutilisation de lieux de culte antiques induit les marges d'erreurs et augmente automatiquement le degré de déviation par rapport à la bonne direction de la Kaaba<sup>150</sup>.

Dans le territoire andalou, les cas relatifs à la conversion d'églises en mosquées sont beaucoup plus nombreux que ceux Magrébines. Plusieurs édifices de culte musulman ont été construits sur les décombres d'églises romaines paléochrétiennes et wisigothes. Bâtie sur l'église de San Vicente, la grande mosquée de Cordoue n'est pas dirigée vers la bonne direction de la *qibla* : le mihrab est aménagé dans le mur perpendiculaire à celui de l'abside chrétienne<sup>151</sup>.

#### **2.1.4. Façades, entrées, cours et iwân :**

Quelques-uns des plus célèbres édifices de l'Islam ont une entrée qui ne donne aucune idée de leur ampleur. Mais au Xe siècle, on a commencé à construire des entrées imposantes, décorées ou sobres. Les premières sont sans doute inspirées par l'architecture des palais, où il fallait impressionner les visiteurs dès le premier abord. Les entrées sont généralement des constructions massives qui dominent la façade et forment souvent un bloc indépendant. Les portes sont fréquemment en retrait, dans un cadre décoratif et surmontées d'un dais à stalactites très élaboré. Quand le plan le permet, elles sont dans l'axe du bâtiment. Sur de nombreuses façades, la grande entrée peut ne pas suffire. Elle est parfois flanquée de balcons ouverts et, à partir du XIVe siècle, de minarets placés dans les angles, à la fois comme contreforts et pour donner un accent architectural. En conséquence, à la façade extérieure répond souvent celle des arcades de la salle de prière ou de la *qibla*<sup>152</sup>.

---

<sup>149</sup> Abu 'Ubayd al-Bakrî, Description..., (texte arabe), page 103

<sup>150</sup> d'Ibn 'Asakir, La description de Damas Institut Français de Damas, pages 27-38.

<sup>151</sup> Lévi-Provençal, Histoire de l'Espagne musulmane, t1, pages. 386-387.

<sup>152</sup> Hittotiogtalla arabe de la Mezquid, pages 6.

#### **2.1.4.1. La cour :**

Le plan des mosquées comporte presque toujours une cour, sans doute pour pallier la rareté des espaces ouverts au centre des villes islamiques. Les cours servaient de lieux de réunion, d'étude et d'échanges à l'instar du forum des anciennes cités romaines, et les portiques qui les entouraient donnaient de l'ombre.

Dans certaines aires islamiques, la cour contient la fontaine destinée aux ablutions rituelles.

Il était de coutume dans les premiers palais et mosquées de marquer l'axe de la salle de prière par une grande triple entrée, parfois surmontée d'une coupole décorative et comportant un passage surélevé menant au mihrab.

#### **2.1.4.2 Iwans :**

Des porches ouverts (iwans) étaient également utilisés, non seulement comme entrées, mais aussi pour marquer l'axe du bâtiment, et des considérations de symétrie architecturale conduisaient à construire des îwân sur l'axe transversal, ce qui a donné le plan à quatre îwân. Ces îwân s'ouvrent généralement sur des salles à coupole et leur encadrement décoratif, qui domine les salles de prière, est étayé, de l'extérieur et à l'arrière, par des contreforts finement élaborés<sup>153</sup>.

#### **2.1.4.3. Revêtements :**

A l'origine, dans le monde islamique comme dans les provinces de l'empire romain à sa fin, les surfaces étaient décorées de stuc sculpté et peint, technique peu coûteuse. Dans certaines régions du monde islamique riches en pierre, la primauté de la sculpture sur pierre ne fut jamais contestée, mais dans de nombreuses autres régions où le seul matériau de construction disponible était la brique (cuite ou crue), les matériaux de revêtement acquirent une importance ornementale prépondérante, d'abord sous forme de briques disposées en plates-bandes décoratives, puis de carreaux de terre cuite non émaillés, et enfin de carreaux émaillés. Au début, remaillage était limité à des bandeaux épigraphiques de couleur turquoise dans le mihrab, les frises et les arcs d'encadrement, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur<sup>154</sup>.

#### **2.1.5. Coupole :**

L'Islam, comme les autres grandes civilisations, a été conscient de l'effet majestueux des espaces surmontés de coupoles, tant de l'extérieur, pour que le bâtiment soit visible de loin, que de l'intérieur, pour impressionner le visiteur. Les premières coupoles étaient construites avec précaution, au-dessus de travées à section carrée, et puis il s'est révélé plus simple de rehausser la base rectangulaire de la coupole que d'accroître sa portée. Les premières grandes coupoles étaient en bois. Ensuite, la technique de brique cuite de la Mésopotamie abbaside se répandit dans tout l'Islam, (figure.2.11).

---

<sup>153</sup> El khummar, op cit., page 367.

<sup>154</sup> Golvin, op cit., page 125.

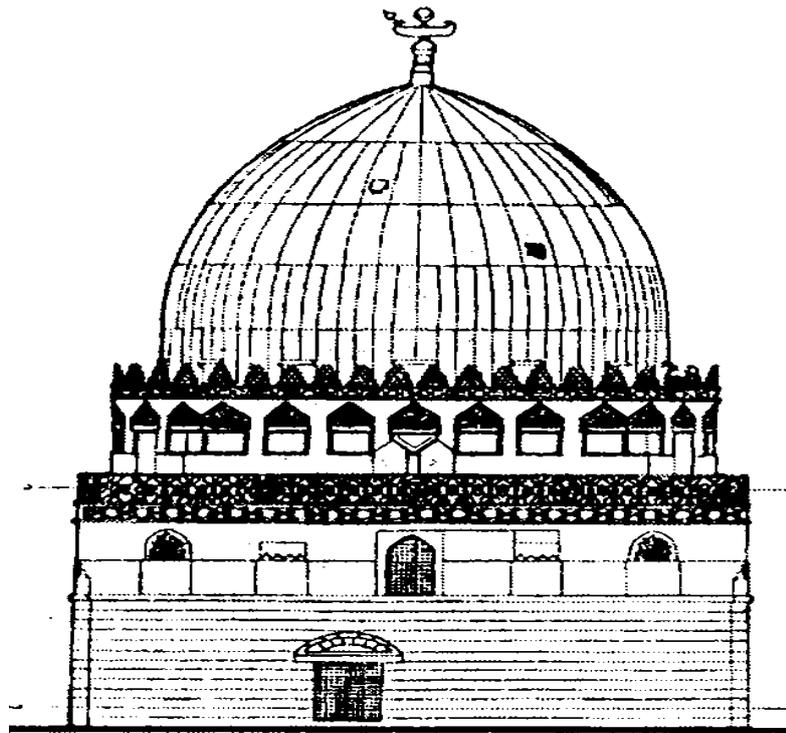


Fig.2.11.coupole de la mosquée d'el Imam El Chafii <sup>155</sup>.

### 2.1.6. Le Minaret :

Le minaret est postérieur à l'islam. Il n'a pas été préconisé par le prophète (QSSL) et les premiers sont apparus dans le premier siècle de l'Hégire

Les minarets ont des formes très variées (en général ronds, carrés, en spirale ou octogonaux) en fonction du génie de chaque architecture). Le nombre de minarets par mosquée n'était pas figé : à l'origine, il n'était édifié qu'un seul minaret par édifice, puis le constructeur en érigea plusieurs. Les raisons tiennent de l'esthétique, de la symétrie, de la volonté de ponctuer un élément fort, ainsi que d'assurer la stabilité de l'ouvrage.

Longtemps, la *mosquée sacrée* de La Mecque fut la seule à avoir six minarets. Cependant, lorsque les Ottomans entreprirent la construction de la mosquée Bleue à Istanbul, ils la dotèrent également de six minarets. Il a fallu en construire un septième à La Mecque, afin que la mosquée sainte ne soit pas surpassée. Mais, l'appel à la prière n'est fait que depuis un seul minaret<sup>156</sup>.

<sup>155</sup> احمد تاجة، موسوعة فن العمارة الإسلامية دار الحصاد للنشر والطباعة، دمشق، 2000، ص 73.

<sup>156</sup> Cyril Glassé et Huston Smith, The new encyclopedia of Islam, éd. Rowman Altamira, 2003, P 309.

Au Maghreb, le plus ancien minaret est celui de la Grande Mosquée de Kairouan en Tunisie. Il est également le plus ancien minaret encore debout de tout le monde musulman et par conséquent le plus ancien au monde qui soit parvenu jusqu'à nous (figure.2.12). La construction du minaret de la Grande Mosquée de Kairouan, probablement commencée dès le début du VIIIe siècle, date dans son état actuel de la première moitié du IXe siècle (vers 836) d'après l'opinion de la plupart des archéologues. Constitué de trois niveaux de largeurs décroissantes et se distinguant par un aspect à la fois massif et majestueux, il est considéré comme le prototype des minarets de l'Occident musulman<sup>157</sup>.

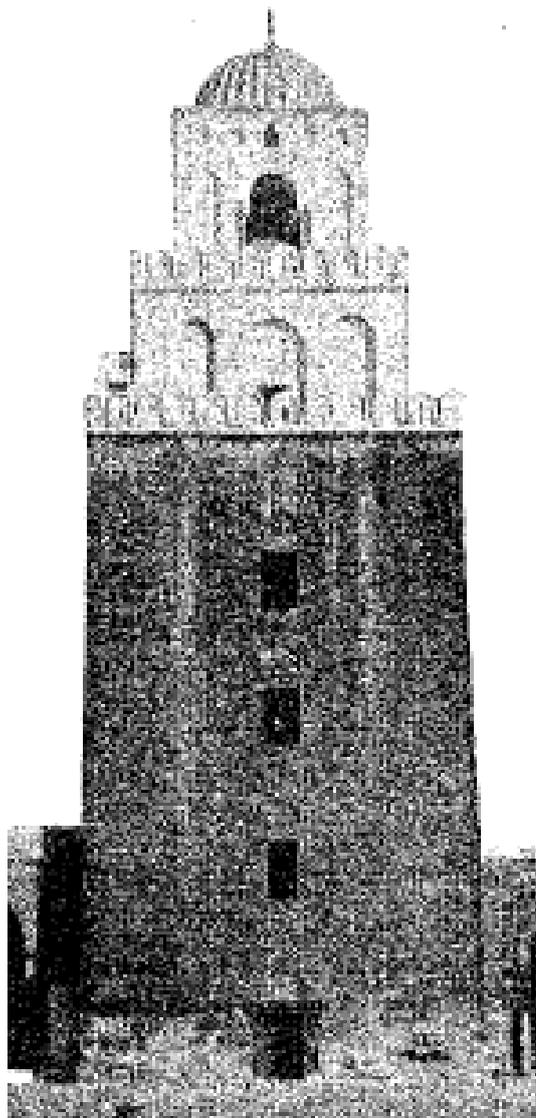
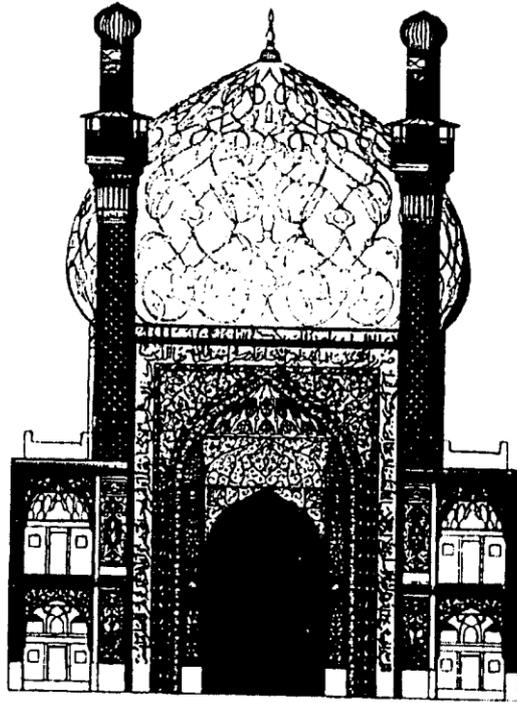


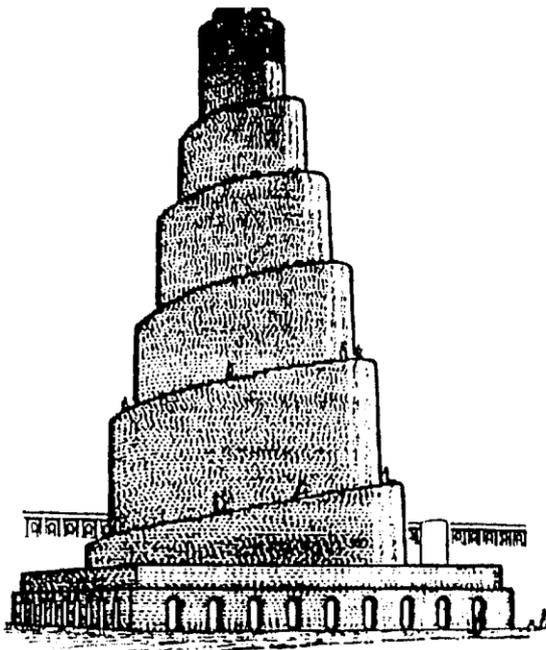
Fig.2.12.Minaret d'el kairouan<sup>158</sup>.

<sup>157</sup> Linda Kay Davidson et David Martin Gitlitz, *Pilgrimage: from the Ganges to Graceland: an encyclopedia*, Volume 1, éd. ABC-CLIO, 2002, page 302.

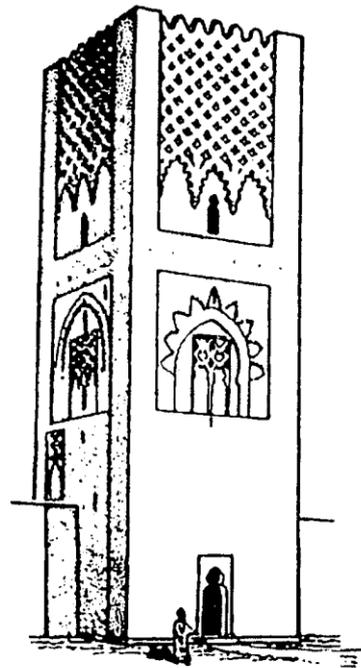
158-فكري، مساجد الإسلام مسجد القيروان، مطبعة المعارف، مصر 1936، ص 65



Minaret de la mosquée EL SHAH à Asfahane



Minaret de la mosquée de Samaraa



Minaret mosquée d'El Rabat

Fig.2.13. Différentes formes de minarets dans le monde musulman <sup>159</sup>.

<sup>159</sup> احمد تاجه، موسوعة فن العمارة الإسلامية دار الحصاد للنشر والطباعة، دمشق، 2000، ص 103

### **3. Les mosquées millénaires dans le monde musulman :**

La plus ancienne mosquée fouillée : la mosquée de Wasit (centre - est de l'Irak), datée de 703 ap-JC (fondation umayyade).

Les mosquées plus anciennes (donc les toutes premières mosquées, du VIIe siècle, de la période du Prophète et des califes Rashidun (Bien Guidés, ne nous sont connues que par des tentatives de reconstitution à partir de descriptions textuelles tardives (surtout à partir du IXe siècle) et qui présentent des divergences.

#### **3.1 La mosquée du Prophète à Médine (1 H / 622- 623 ap-JC) :**

Deux reconstitutions différentes : Creswell, et Mahmoud Akkouch, (deux reconstitutions contemporaines) :

La différence essentielle entre Creswell et Akkouch confirmé par Jeremy Johns<sup>147</sup>, concerne l'interprétation de la fonction de cette mosquée : pour Creswell, la mosquée du Prophète est d'abord une maison qui est utilisée comme lieu de rassemblement et de prière collective par les musulmans et qui se transforme donc progressivement en mosquée : il soutient la thèse d'une origine domestique de l'architecture religieuse islamique ; tandis qu'Akkouch attire l'attention sur le fait que les sources historiques islamiques, y compris celles utilisées par Creswell, sont unanimes sur le fait que Muhammad construit d'emblée une mosquée.

Autres différences : les dimensions, les étapes de construction et la distribution des appartements privés des épouses et des proches du Prophète autour de la mosquée.

- **Description de la mosquée**

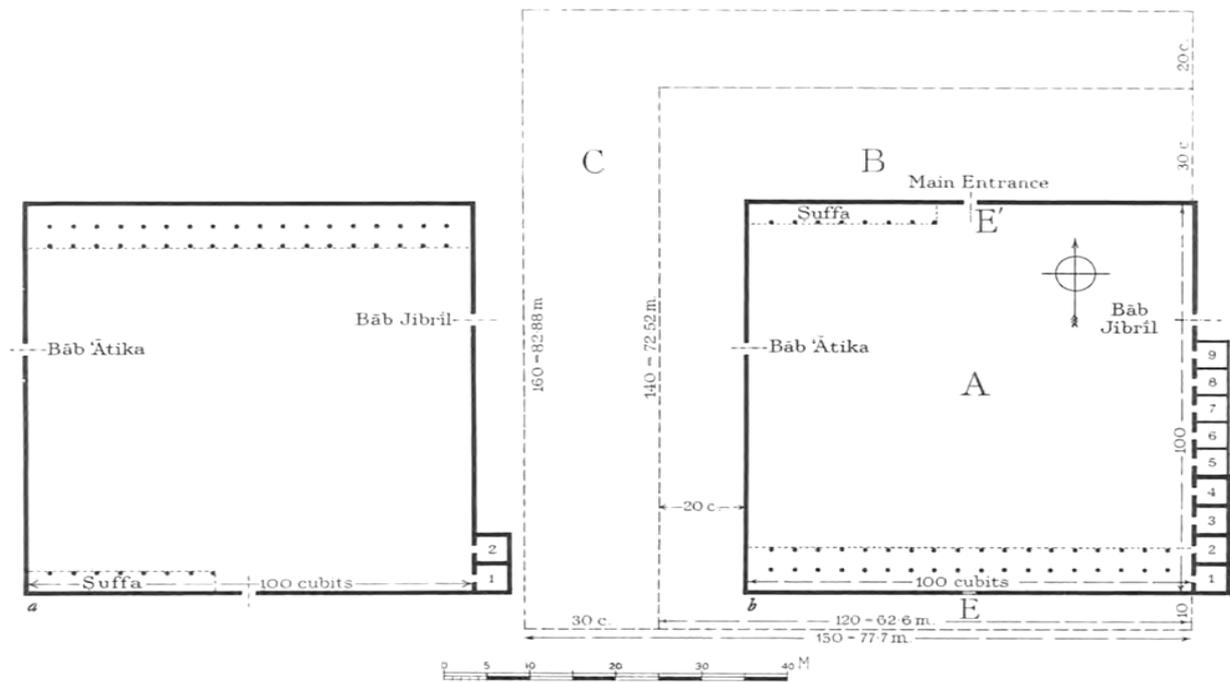
Clôture quadrangulaire (Creswell : carrée, environ 50 m de côté ; Akkouch : environ 35 m / 30, puis agrandissement du vivant du Prophète à 50 m / 50).

Clôture de brique crue (séchée au soleil) (de 2.5 ou 3.5 m de hauteur) percée de trois entrées : une au sud, une à l'est et une à l'ouest.

Au début, l'espace délimité par cette clôture est vide mais les fidèles se plaignent de la chaleur du soleil au moment de la prière, un portique est ajouté contre le mur nord (le mur de la qibla qui, jusqu'en 624, est Jérusalem) : portique construit de troncs de palmiers qui soutiennent un toit de branches de palmiers tressées (appelé zulla) ; et un deuxième portique plus petit est construit dans le coin sud-ouest pour abriter les compagnons pauvres et sans abri du Prophète (appelé suffa).

Après le changement de la qibla vers le sud (La Mecque) en 624, (figure.2.14), (figure.2.15) et (figure.2.16). L'extension du Calife Othmane Benou Affane (figure,2.17) et figure 2.18, L'orientation de la mosquée est inversée : le grand portique pour la prière (Zulla) est transféré du mur nord au mur sud ; tandis que le petit portique pour les sans-abri (Suffa) est transféré du

coin sud-ouest au coin nord-ouest ; la porte sud est murée et une nouvelle porte est percée dans le mur nord.



au bâtiment (probablement aussi la position des jaietes pour l'exercice de la prière collective : en rangées parallèles au mur de qibla). Une cour ouverte qui est une avant-cour puisqu'elle précède la salle de prière et qu'il faut la traverser pour accéder à la salle de prière : tous les accès publics sont ouverts non pas dans la salle de prière mais dans la cour ; la seule porte ouverte dans la salle de prière est celle, privée, qui permet au Prophète d'accéder directement à la salle de prière depuis la chambre de son épouse Aïsha<sup>161</sup>.

<sup>160</sup> Creswell; Medina: Muhammad's House/Mosque, New York: Hacker Art Books, 1979, p 29

<sup>161</sup> Nourane Ben Azzouna, Histoire de l'art et archéologie de l'islam, L'architecture de la mosquée du VIIe au Xe siècle, p12

Tous les accès publics sont ouverts non pas dans la salle de prière mais dans la cour ; la seule

porte ouverte dans la salle de prière est celle, privée, qui permet au Prophète d'accéder directement à la salle de prière depuis la chambre de son épouse Aïcha.

Adaptation progressive de l'espace primitif, qui est un simple enclos ouvert, aux besoins de la communauté, comme le besoin de se protéger du soleil qui conduit à l'installation de la zulla.

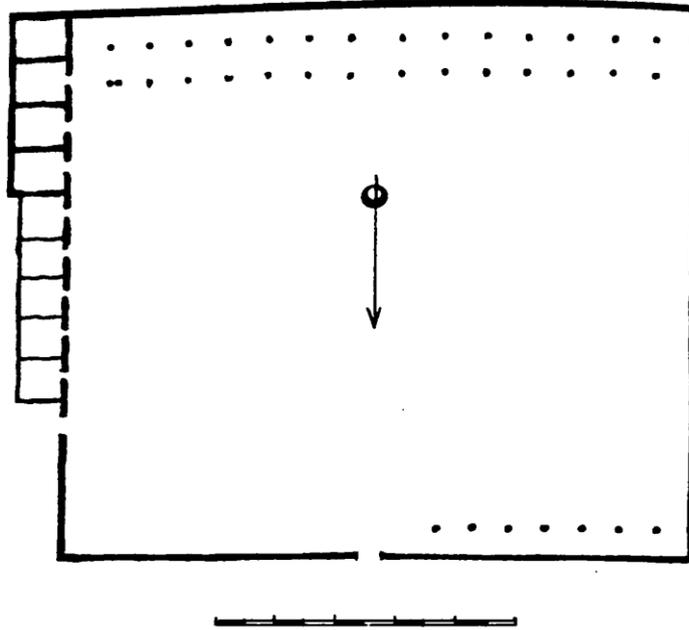


Fig. 2.15. Plan de la mosquée de médina au temps du prophète<sup>162</sup>.

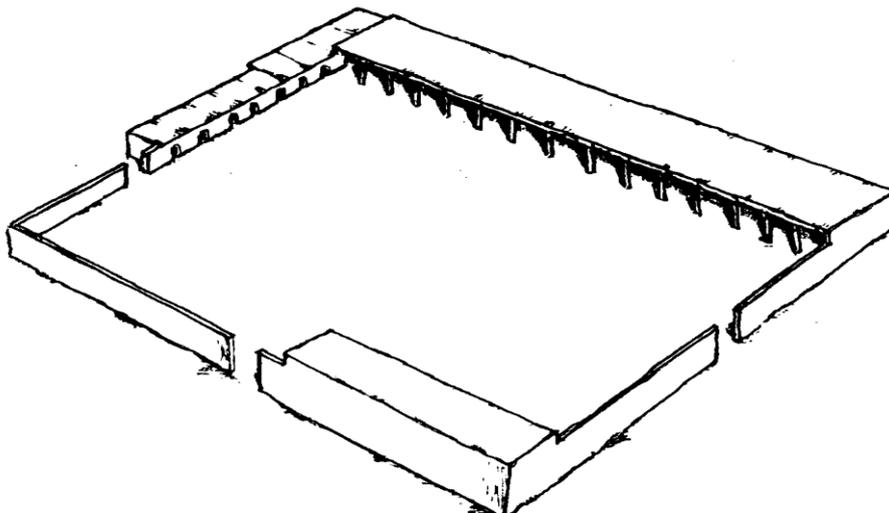


Fig.2.16. Représentation de la mosquée du Prophète à Médine avant et après le changement d'el Qibla<sup>163</sup>.

<sup>162</sup> فريد شافعي، العارة العربية في مصر الإسلامية عصر الولاية، الهيئة العامة المصرية للكتاب، المجلد الاول 1994، ص 54.

<sup>163</sup> فريد شافعي، العارة العربية في مصر الإسلامية عصر الولاية، الهيئة العامة المصرية للكتاب، المجلد الاول 1994، ص 66.

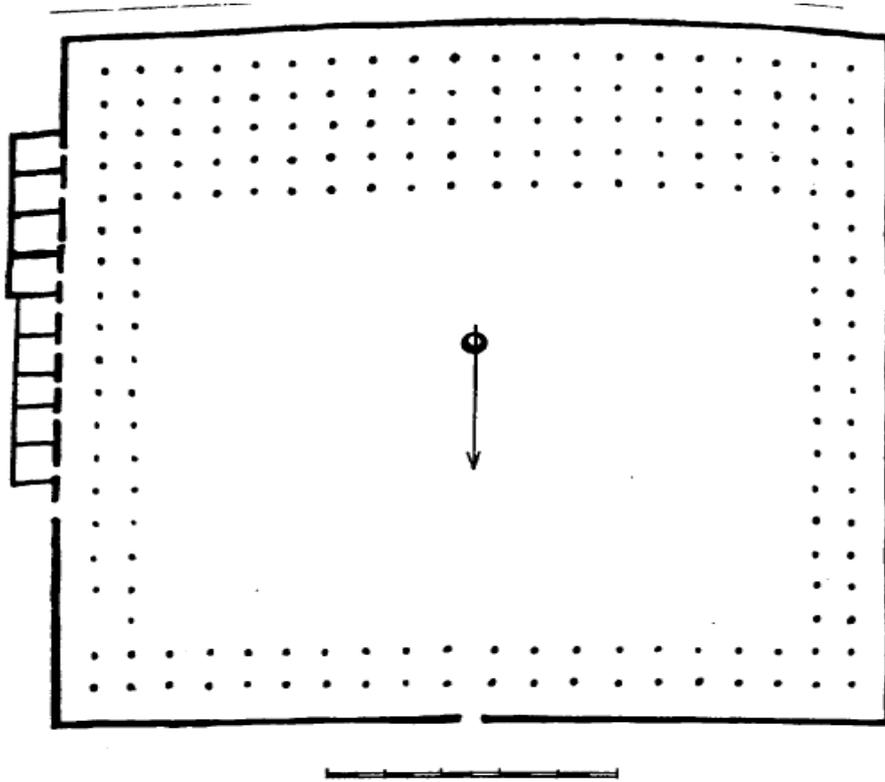


Fig.2.17. Plan de la mosquée du Prophète à Médine au temps du Califa Othmane Benou Affane<sup>164</sup>.

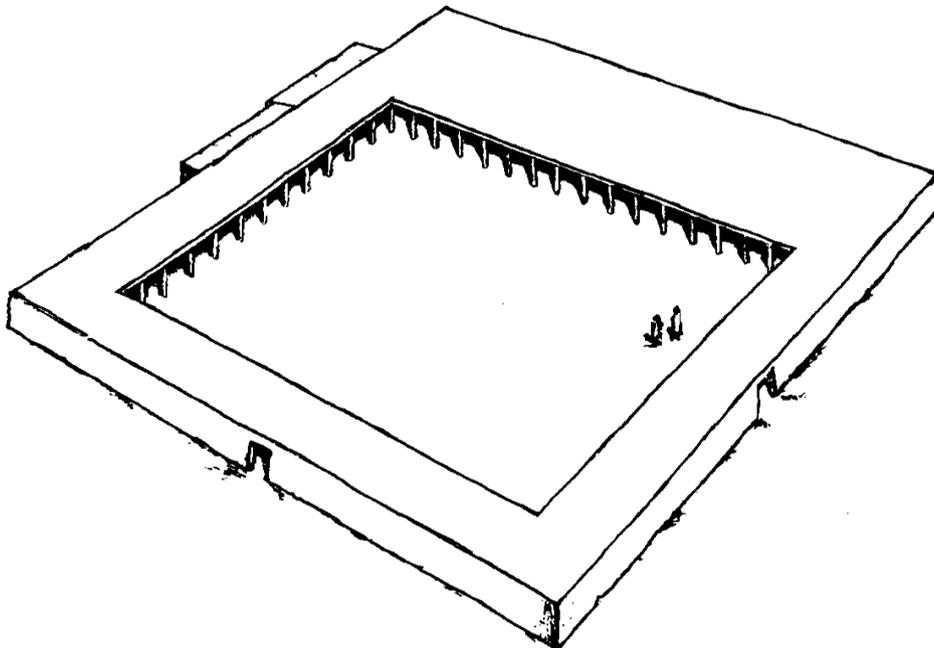


Fig.2.18. Représentation de la mosquée du Prophète à Médine au temps du Califa Othmane Benou Affane<sup>165</sup>

ريد شافعي، العارة العربية في مصر الإسلامية عصر الولاة، الهيئة العامة المصرية للكتاب، المجلد الاول 1994، ص 67.  
 165 ريد شافعي، العارة العربية في مصر الإسلامية عصر الولاة، الهيئة العامة المصرية للكتاب، المجلد الاول 1994، ص 68.

Les premières mosquées fondées hors des frontières de l'Arabie mais dans un contexte essentiellement arabe : les villes garnisons (*misr*, pluriel *amsar*) sont d'abord des campements, des bases militaires pour la poursuite des conquêtes et de l'expansion de l'islam, aussi bien vers l'est que vers l'ouest, mais elles deviennent rapidement des sortes de campements permanents, avec des constructions en roseaux, puis des villes à part entière, construites non plus en roseaux mais en brique, crue et cuite, et d'importants centres politiques, économiques et culturels : ces villes jouent le rôle de centres administratifs, gestionnaires des territoires conquis et de points d'occupation et d'arabisation des territoires conquis (les arabes restent longtemps minoritaires dans les régions conquises : une élite gouvernante) ; NB que ces villes garnisons sont fondées dans des zones climatiquement proches de l'Arabie, loin des côtes, et ce sera le cas de presque toutes les fondations et capitales islamiques jusqu'au début du Xe siècle <sup>167</sup>.

Les premières villes garnisons sont fondées pendant le règne de 'Umar, le deuxième Calife (634-644) (phase I) et reconstruites pendant celui de Mu'awiya , le premier calife et le fondateur de la dynastie umayyade (661-680) (phase II) : 1-Basra (Bassora, sud de l'Irak, 635), 2-Kufa (centre de l'Irak, 638), 3-Fustat (nord de l'Egypte, 642) ; plan type : place centrale qui est un centre public, religieux et politique, avec la mosquée et la résidence officielle du gouverneur (*dar al-imara*), et autour de ce centre se développent les quartiers d'habitation qui sont répartis entre les tribus.

Comme à Médine, mosquées essentiellement connues grâce à des descriptions textuelles tardives mais beaucoup moins détaillée l'histoire entourée de nombreuses incertitudes, les seuls points assurés sont les suivants :

Evolution rapide parallèlement à la transformation des camps militaires en villes : de structures extrêmement simples, à peine construites, avec des matériaux de fortune extrêmement éphémères (roseaux) (phase I), en constructions permanentes, voire grandioses (brique crue et cuite et éléments de pierre), surtout au début de l'époque umayyade (phase II)

L'exemple de Médine n'est pas suivi de manière systématique dès le début, même si on retrouve généralement l'ensemble salle de prière hypostyle couverte le long du mur de Qibla avant-cour ouverte (sauf dans la première mosquée de Fustat, 642, qui est dépourvue de cour) plus l'association mosquée et palais (mais systématiquement du côté du mur de Qibla seulement depuis le début de la dynastie umayyade)<sup>168</sup>.

<sup>167</sup>- احمد فكري، مساجد الإسلام مسجد القروان، مطبعة المعارف، مصر 1936 ، ص 102

<sup>168</sup> Ben Azzouna Nourane, op cit., page 13.

La mosquée de Kufa est la mieux connue grâce aux fouilles (inachevées) du palais (mur commun entre la mosquée et le palais), plus (sondages dans la mosquée) : la phase umayyade fournit le plan type de la mosquée dite arabe (par opposition aux deux autres grands types, plus tardifs, dits iranien et turc) : salle de prière hypostyle couverte et cour ouverte entourée de portiques sur trois côtés <sup>169</sup>.

### **3.2 La mosquée d'El Basra 635 ap-JC:**

La fondation de la ville et de la première mosquée remonte à 635ap-jc figure 2.19, un espace tracé au sol ou puis simplement délimité par des roseaux. En 636-637 : un agrandissement et une reconstruction en brique crue (séchée au soleil) avec une salle de prière couverte de roseaux et une cour ouverte plus un palais à l'est de la mosquée.

En 665 : un deuxième agrandissement et reconstruction en brique cuite avec une salle de prière couverte d'un plafond en bois et une cour. Le palais est déplacé contre le mur de Qibla où une porte est percée pour permettre l'accès direct du gouverneur à la mosquée <sup>170</sup>.

### **3.3. La mosquée d'El Kufa 639 ap-JC:**

Quelques mois après la première installation du camp, un plan de la ville est tracé sur le sol avec un espace central carré, d'environ un demi kilomètre de côté, entouré d'un fossé, et au centre de cet espace, une mosquée et un palais, mais comme à Basra, la mosquée est reconstruite à plusieurs reprises ; en quelques années (avant 644) : la toute première mosquée est rasée et reconstruite plus au sud, plus près du palais ; carré d'environ 100 m de côté (deux fois plus grand que la mosquée du Prophète à Médine), délimité dans ses dimensions mais peut-être pas clôturé ou clôturé par une simple palissade en roseaux ou / puis une murette en brique crue, avec une salle de prière hypostyle couverte le long du côté de Qibla (sud), elle-même ouverte ou clôturée simplement (en roseaux ou en brique crue) une exacte reproduction du plan de la mosquée de Médine<sup>171</sup>.

En 670 : reconstruction par des architectes perses sur un plan approximativement carré (les sondages archéologiques des fondations donnent 100 m. pour le mur de la Qibla, 109 m pour le mur nord, et 116 m. pour les côtés est et ouest) ; fortifiée avec une muraille en brique cuite avec des tours semi-circulaires, percée par au moins quatre portes : une au nord, une au sud ou à l'ouest, une autre porte au sud joignant la salle de prière au palais (mise en évidence par les fouilles du palais), et une quatrième porte à l'est ;

---

<sup>169</sup>Hicham DJAIT, Kufa. La Fondation de la ville islamique, Paris, 1986, page 22.

170 حسين مؤنس، المساجد، الكويت، 1981، ص 45

<sup>171</sup> Hicham DJAIT, op cit., page 38.

la salle de prière est reconstruite avec cinq rangées de hautes (environ 15 m) ,(figure.2.20).colonnes de pierre (faites de plusieurs cylindres superposés reliés par une tige métallique qui passe par un trou au milieu de chaque cylindre) ; colonnes coiffées de chapiteaux corinthiens de remploi (deux déterrés par les fouilles) ; portant directement, sans arcs, un plafond plat de bois ; probablement aussi maqsura : espace clôturé réservé au calife ou au gouverneur ; cour entouré d'un double portique (deux galeries) sur chacun des trois côtés (les galeries est et ouest dans le prolongement des nefs de la salle de prière)<sup>172</sup>.

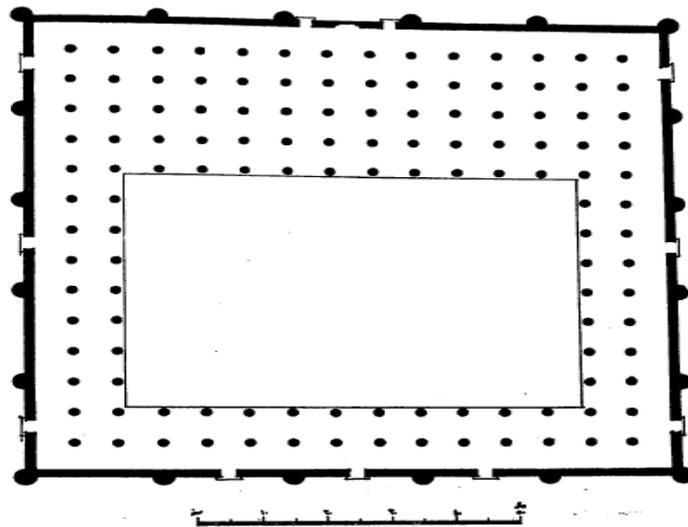


Fig.2.19. Mosquée el BASRA sur selon le plan du prophète l'an 50 Hégire<sup>173</sup>.

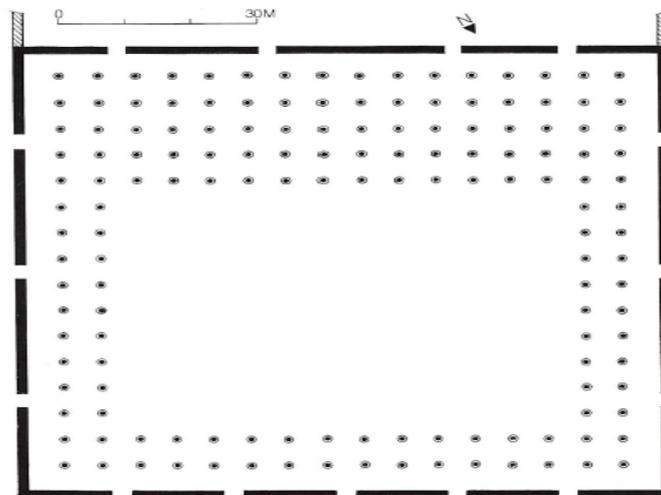


Fig.2.20.Mosquée el Kufa<sup>174</sup>

<sup>172</sup> حسين مؤنس، المساجد، الكويت، 1981، ص 75

<sup>173</sup> ريد شافعي، العمارة العربية في مصر الإسلامية عصر الولاة، الهيئة العامة المصرية للكتاب، المجلد الاول 1994، ص 232.

<sup>174</sup> ريتشارد اتنغهاوزن، الفن الاسلامي والعمارة (650 م 1250 م)، دار الكتاب الوطنية أبو ظبي 2012، ص 33

### 3.5.1 Le Dôme du Rocher :

S'élève en plus au-dessus d'une plateforme centrale trapézoïdale surélevée par rapport au reste de l'esplanade, accessible par huit volées d'escaliers : deux au sud, deux au nord, trois à l'ouest et une à l'est, chaque volée étant couronnée par une arcature.

Construction annulaire centrée autour du sommet du mont Moriah : un rocher : un grand bloc irrégulier en saillie de 1,5 m au-dessus du niveau de l'édifice, entouré d'une basse clôture en bois de construction contemporaine mais sur le modèle d'une clôture du XIIIe siècle.

Immédiatement autour du rocher : une arcature circulaire de 20,44 m de diamètre, soutenue par quatre piliers de maçonnerie de pierre, trapézoïdaux, et douze colonnes de porphyre, cylindriques sur bases carrées, avec une alternance de 1 pilier par 3 colonnes.

Cette arcade circulaire centrale est entourée par un double déambulatoire octogonal, un déambulatoire intérieur et un déambulatoire extérieur, séparés par une arcade octogonale portée par huit piliers pentagonaux concaves et seize colonnes cylindriques sur bases carrées, avec une alternance de 1 pilier sur 2 colonnes.

Les deux arcades, circulaire centrale et octogonale périphérique sont désaxées de sorte que les piliers et les colonnes ne se cachent pas les uns les autres, ce qui permet une vision dégagée du centre de l'édifice.

Le contour extérieur de l'édifice, un mince mur de pierre, est octogonal (figure.2.21) et (figure 2.22); chaque côté mesure environ 20,6 m ; le diamètre total est d'environ 48 m.

La bâtisse est d'excellente pierre de taille dans la tradition syrienne ; mais elle a été partout recouverte ; à l'extérieur des lambris de marbre occupaient le bas des murs ; au-dessus toutes les maçonneries étaient revêtues de mosaïques d'émail<sup>175</sup>.

Les colonnes et les chapiteaux, de marbre et de porphyre rouge et gris, sont de remploi. Ils ne proviennent pas des mêmes édifices, ils n'ont donc pas la même hauteur, d'où un jeu sur la hauteur des bases pour harmoniser l'ensemble.

La majorité des chapiteaux de remploi sont des chapiteaux byzantins de type corinthien = des chapiteaux comportant une corbeille entourée d'une ou deux couronnes de feuilles, en particulier d'acanthé, superposées, au-dessus desquelles s'élèvent des crosses (des tiges végétales s'enroulant en volutes à leur extrémité) qui elles-mêmes portent l'abaque (la partie sommitale plate du chapiteau).

---

<sup>175</sup>ريتشارد انتغهاوزن، الفن الاسلامي والعمارة (650 م 1250 م)، دار الكتاب الوطنية أبو ظبي 2012، ص 11.

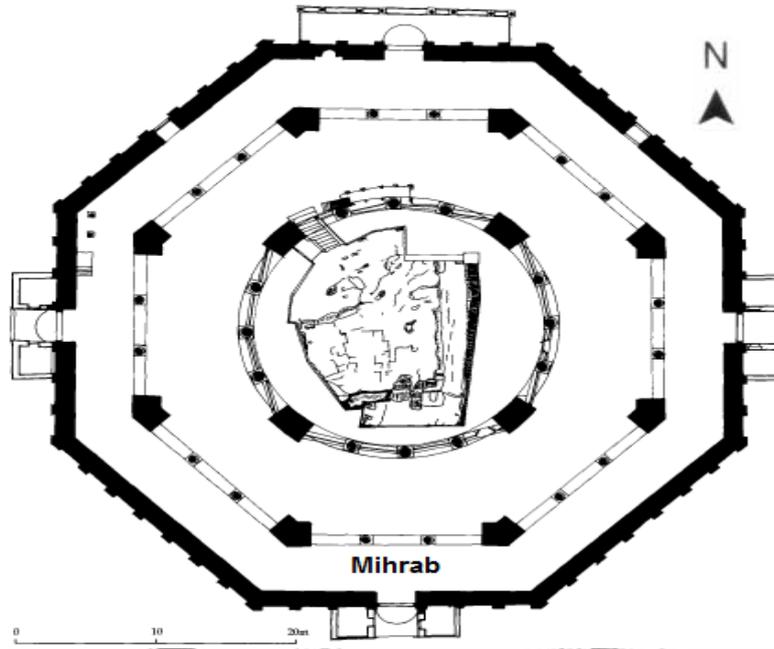


Fig.2.21. Plan de la mosquée Dôme du rocher <sup>176</sup>.

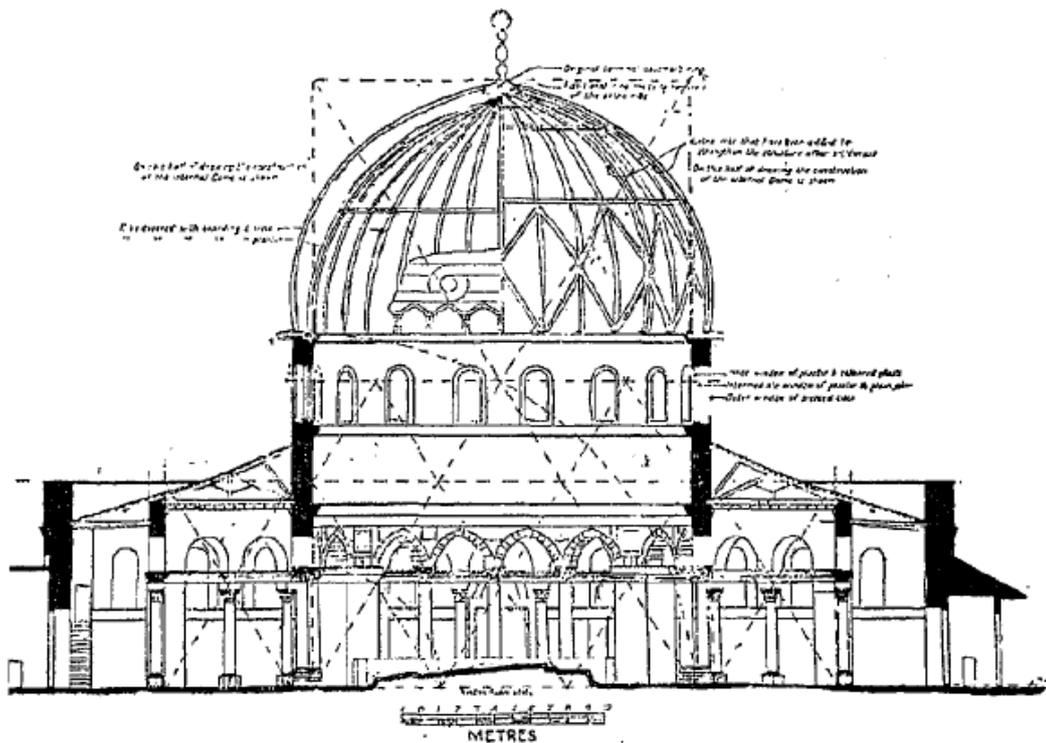


Fig 2.22. Coupe de la mosquée Dôme du rocher <sup>177</sup>.

<sup>176</sup> Andrew Petersen, Dictionary of Islamic Architecture, 1st Edition, Routledge, June 1999, page 70.

<sup>177</sup> خالد عزب، شياء الساج، الحرم القدسي الشريف، دار الكتاب العربي، بيروت، 2010، ص 40

Dans l'arcade circulaire, les piliers et les colonnes sont reliés par de simples tirants non décorés. Ils portent des arcs en plein cintre à claveaux de marbre coloré, avec une alternance d'un claveau noir et de deux claveaux blancs, avec un jeu supplémentaire sur les veinures des claveaux blancs disposés de manière à créer des schémas symétriques.

Dans l'arcade octogonale, les piliers et les colonnes portent, au-dessus d'un tailloir de marbre blanc, une architrave continue qui porte les arcs en plein cintre.

L'arcature circulaire centrale porte un haut tambour cylindrique qui est soutenu, à l'extérieur, par quatre contreforts placés dans la continuité des piliers, donc selon un plan en croix désaxé par rapport à celui des entrées.

Ce tambour est percé, dans la moitié supérieure, de seize fenêtres en plein cintre.

Il porte une grande coupole à double coque en bois, légèrement convexe, s'élevant à environ 30 m au-dessus du rocher.

Le double déambulatoire est couvert d'un plafond de bois plat mais qui, à l'extérieur, monte légèrement de 11 m au niveau du mur extérieur à 13 m à l'endroit où il rejoint le tambour de la coupole, juste au-dessous des fenêtres, ce qui accentue l'effet d'élancement du tambour et du dôme.

L'élévation extérieure : chaque côté de l'octogone est divisé par huit pilastres en sept niches étroites, en plein cintre, à fond plat, dont cinq sont percées de baies en plein cintre.

### **3.5.2 La mosquée Al-Aqsa :**

Nom qui apparaît dans le Qur'an (XVII-1-2 = la mosquée la plus éloignée, ultime) : l'une des mosquées les plus sacrées de l'islam (avec celles de La Mecque et Médine).

Problèmes méthodologiques proches de ceux qui se posent pour les premières mosquées de Médine et des villes garnisons : plusieurs phases de construction (zone sismique) attestées par des descriptions textuelles tardives divergentes ; pas de fouilles systématiques mais plutôt observations superficielles et tentatives de reconstitution à partir de photos anciennes ; programmes de rénovation radicale en particulier dans les années 1938-1942 : de nombreux éléments de la mosquée ancienne sont déposés au musée et remplacés par de nouvelles structures<sup>178</sup>.

Chronologie proche de celle des mosquées des villes garnisons :

- Une première mosquée construite par 'Umar au moment de la conquête de Jérusalem en 638 dans la partie sud de l'esplanade du temple.

---

178 Ben Azzouna Nourane, op cit., page 26.

- Très probablement reconstruite au début du règne de Mu'awiya en 661 ; description par un pèlerin chrétien qui visite Jérusalem v. 670 comme « une maison de prière rectangulaire ; construite sur des ruines des colonnes [avec] des planches dressées et de grandes poutres.
- Pour la construction de ces deux premières mosquées, on sait aussi que les musulmans emploient une main d'œuvre sans doute majoritairement chrétienne : d'abord locale, palestinienne, puis très probablement aussi égyptienne.
- Une deuxième reconstruction umayyade contemporaine de la construction du Dôme du Rocher, très probablement commencée par 'Abd al-Malik (685-705) et poursuivie par al-Walid (705-715) mais peu de vestiges :

Le Plan rectangulaire ; planté directement sur le mur sud de la clôture du temple, (figure.2.23) ; environ 50.8 m de profondeur (nord – sud) ; largeur inconnue ; arcades perpendiculaires au mur sud, de qibla (et non plus toit posé directement sur les supports comme dans les mosquées étudiées jusqu'ici) ; avec une nef centrale plus large et des vaisseaux latéraux plus étroits portés, comme dans le Dôme du Rocher, par des quinze rangées de colonnes de marbre monolithes coiffées de chapiteaux byzantins de remploi dans un état proche de l'état umayyade) ; ces colonnes sont placées à intervalles réduits.

La nef centrale plus large est couronnée par un dôme, une travée avant le mihrab : le mihrab est une niche concave creusée dans (ou placée en saillie sur) le mur de Qibla pour marquer la direction de la prière ; d'après les sources, ce mihrab est le deuxième après celui ajouté à la mosquée du Prophète à Médine lors de sa reconstruction par al-Walid I entre 707 et 709.

Le dôme est contrebuté à l'est et à l'ouest par des arcades transversales portées par la première et la quatrième rangées de colonnes qui forment une sorte de transept figure 2.24, ce qui confère à l'édifice un axe en croix qui évoque les églises, ce qui est encore plus frappant dans la mosquée actuelle qui est moins large et plus allongée que cette phase Umayyade.

Dans la croisée (la travée qui forme l'intersection de la nef et du transept), sous la coupole, est construite une maqsura<sup>179</sup>.

---

<sup>179</sup> خالد عزب، شجاء الساج، الحرم القدسي الشريف، دار الكتاب العربي، بيروت، 2010، ص58

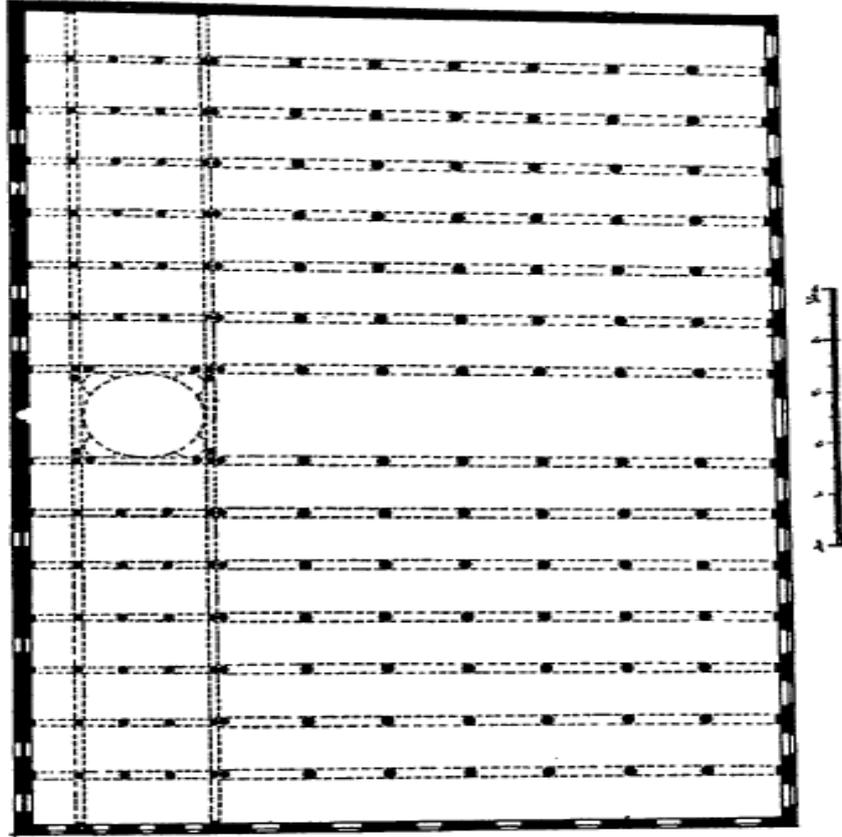


Fig.2.23. Plan de la Mosquée EL Aqsa<sup>180</sup>.

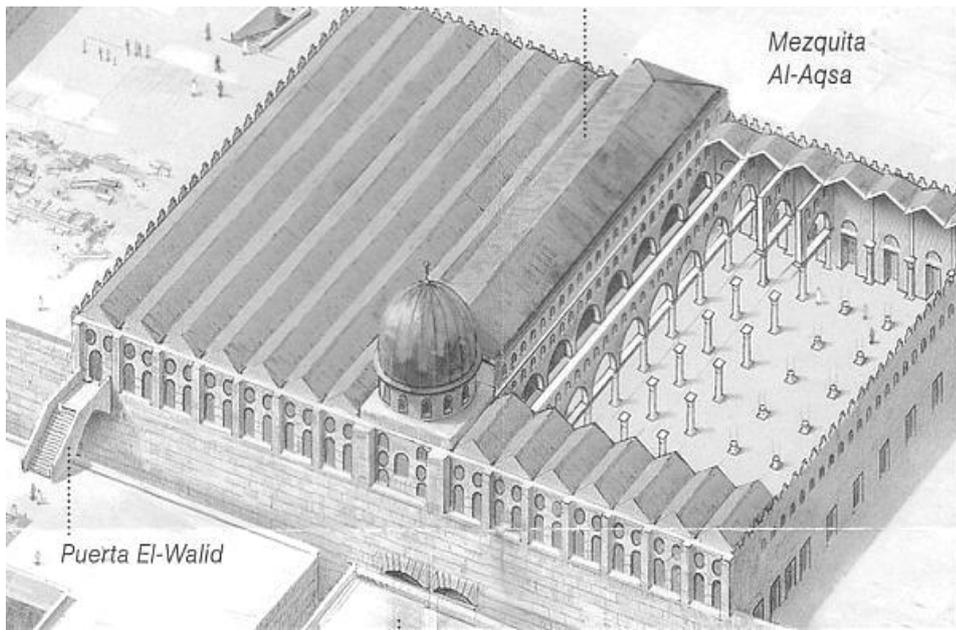


Fig.2.24. Plan axonométrique de la mosquée El Aqsa<sup>181</sup>.

<sup>180</sup> ريد شافعي، العمارة العربية في مصر الإسلامية عصر الولاة، الهيئة العامة المصرية للكتاب، المجلد الاول 1994، ص 242.

<sup>181</sup> باسيليو بايون مالونادو، عمارة المساجد في الاندلس، هيئة ابوظبي للثقافة والتراث للطبعة الاولى، 2011، ص 24.

### **3.6. La grande mosquée de Damas :**

La dynastie des Omeyyades fut fondée par Moawiya Ibn Abi Soufiane après le conflit qui l'a opposé à Ali Ibn Abi Taleb au sujet de la succession à Othman Ibn Affane. Suite au conflit armé qui éclata à Siffin sur l'Euphrate et, après une trêve acceptée par les deux belligérants, Moawiya contrôla la Syrie qu'il gouverna jusqu'à l'assassinat d'Ali où il s'empara de la Califat (succession) de 661 à 680 et fit de Damas la capitale. Cette dynastie régna à Damas de 661 à 750 et à Cordoue, en Andalousie, de 756 à 1031

La Mosquée des Omeyyades aurait été fondée en 87/706 par le calife omeyyade al-Walīd b. Abd al-Malik<sup>182</sup>.

L'architecte utilisa avec une grande habileté un cadre préexistant : le temenos d'un sanctuaire antique,. Il disposait ainsi d'une vaste enceinte de pierre de taille de grand appareil, bordée à l'intérieur de portiques servant de bazars, qui comprenait quatre entrées plus ou moins monumentales et quatre bastions d'angle implantés à l'intérieur de l'enceinte, (figure.2.25) et (figure 2.26). L'ensemble formait un enclos légèrement trapézoïdal de 385 m d'Est en Ouest et de 305 m du Nord au Sud.

Afin de disposer pour sa mosquée d'un espace au contour régulier, l'architecte a ménagé, sur les petits côtés du temenos, de longues salles annexes qui rachetaient la saillie interne des bastions d'angle. La triple entrée du Sud qui perçait le mur de la Qibla fut bouché. L'entrée Est une triple baie sous un grand portique saillant fut conservée ainsi que celle de l'Ouest, elle aussi d'ordonnance tripartite, mais plus modeste.

Dans ce rectangle légèrement barlong et désormais d'un contour régulier, furent aménagés au Nord une cour carrée de 122 m de côté bordée d'un portique et au Sud une vaste salle de prières de 136 m de largeur sur 37 m de profondeur dont les trois vastes nefes étaient parallèles au mur de la Qibla.

Elles étaient séparées par des arcades retombant sur de hautes colonnes et supportant des toits de charpente ; au-dessus de ces grands arcs des baies allégeaient les murs et permettaient de porter plus haut les toitures suivant un procédé habituel dans les basiliques chrétiennes<sup>183</sup>.

---

<sup>182</sup> Creswell, op cit., pages 100-146.

<sup>183</sup> Henri Terrasse, op cit, page 164.

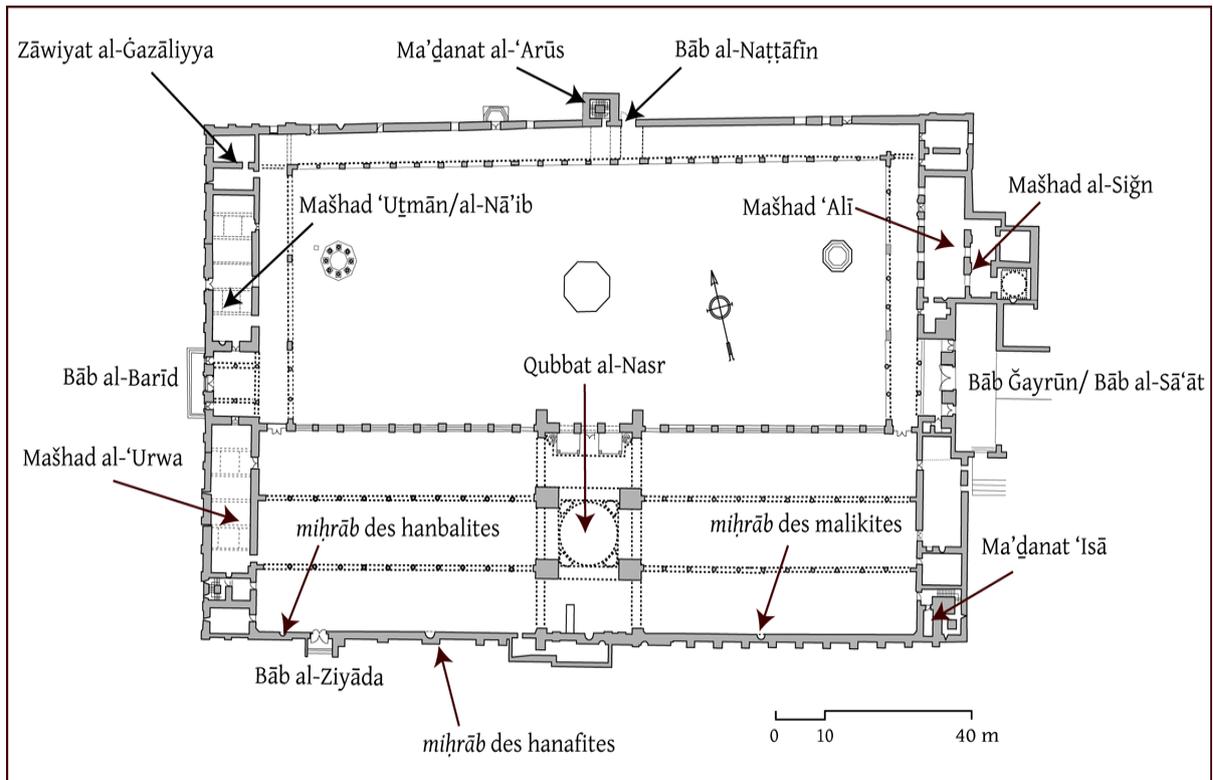


Fig.2.25. Le plan de la grande mosquée de Damas<sup>184</sup>.

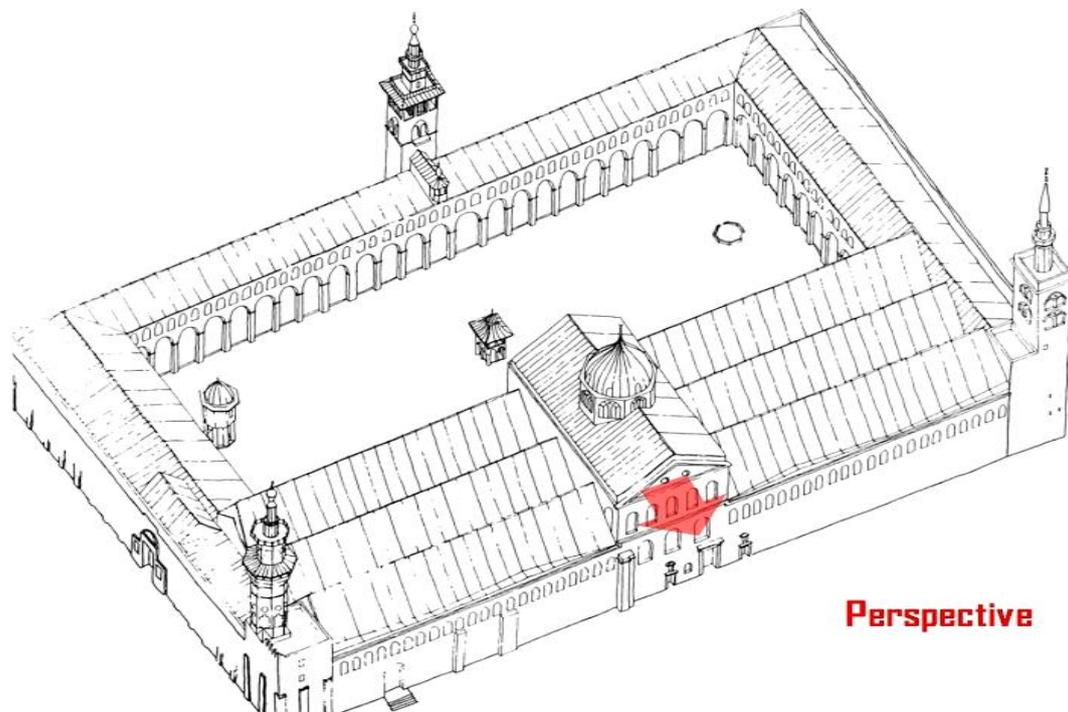


Fig.2.26. Vue de la mosquée de Damas<sup>185</sup>.

<sup>184</sup> Élodie Vigouroux, « La Mosquée des Omeyyades de Damas après Tamerlan », Bulletin d'études orientales, Tome LXI décembre 2012, page 150.

<sup>185</sup> ريتشارد اتنغهاوزن، الفن الاسلامي والعمارة (650 م 1250 م)، دار الكتاب الوطنية أبو ظبي 2012، ص 37.

leur milieu, dans l'axe du mihrab, ces trois travées étaient coupées par une haute nef qui leur était perpendiculaire. Au niveau de la travée médiane cette nef comportait un dôme, lui aussi fait de bois comme celui de la Qubbat as-Sakhra. Les grandes arcades de la salle de prière étaient légèrement outrepassées. Les arcs du portique entourant la cour se posaient sur des piliers et des colonnes suivant une disposition tripartite fréquente dans l'architecture byzantine.

- **Le mihrab:**

A partir de Abd al-Malik les mosquées omeyyades eurent toutes, pour mieux indiquer la direction de la prière, une niche creusée dans le mur du fond de l'oratoire : le mihrab, devant lequel se plaçait l'imam qui dirigeait la prière. C'était alors une petite absidiole de plan semi-circulaire.

- **Le minaret :**

Les premiers minarets ne furent sans doute que des plates-formes un peu surélevées aux angles de certaines mosquées : ainsi les quatre bastions antiques de la grande mosquée de Damas servirent sans doute pour l'appel à la prière. Le plus ancien de ceux qui nous ont été conservés est celui de Bosra élevé en 102 H. — 721 ap-JC <sup>186</sup>.

### **3.7. La mosquée El Kairouan :**

Fondée en même temps que la ville, en l'an 50 de l'Hégire/670 de l'ère chrétienne, la Grande Mosquée de Kairouan (al-jamaa al-kabîr) dite également « Mosquée 'Uqba », du nom du célèbre conquérant, est le plus ancien lieu de culte de l'Occident musulman. Par sa monumentalité architecturale et par son prestige religieux, la Grande Mosquée de Kairouan occupe une place de choix dans l'espace urbain et dans l'imaginaire des Kairouanais et des Maghrébins. Un tel rang symbolique fut, pour longtemps, assuré grâce au concours des dirigeants politiques et des dignitaires religieux qui ont façonné l'histoire et la mémoire de la « ville sainte » de l'Islam nord-africain. Les dynasties aghlabide, fatimide, ziride, hafside, mouradite et husseïnite qui ont gouverné l'ancienne Ifriqiya musulmane ont toutes contribué au maintien et à la sauvegarde de ce monument historique <sup>187</sup>.

Le bâtiment est construit en pierre taillée selon le module de la brique. Ce choix dénote probablement une influence des traditions architecturales de l'Orient musulman, où la brique constitue le matériau principal de construction. La mosquée apparaît comme une forteresse percée de huit portes, hérissée de tours et de bastions, (figure.2.27)et (figure.2.28).

---

<sup>186</sup> Golvin, op cite, p 243.

<sup>187</sup> Mohamed Kerrou, *La Grande Mosquée de Kairouan* L'imam, la ville et le pouvoir, revue des mondes musulmans et de la méditerranée, juillet 2009, page 32

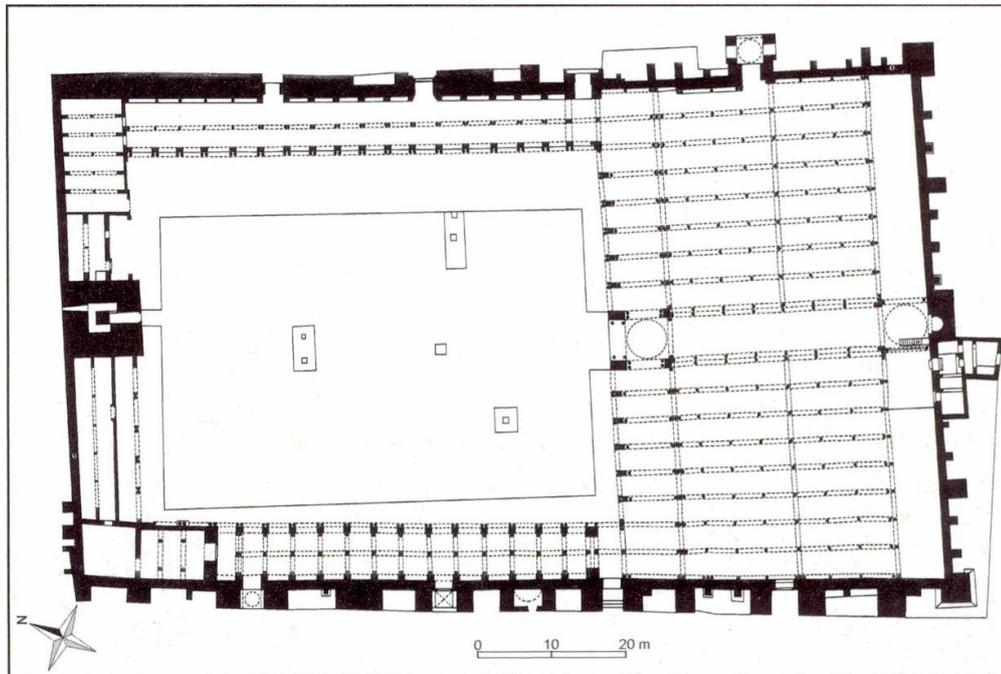


Fig.2.27. Plan actuel de la mosquée D'El Kairouan<sup>188</sup>.

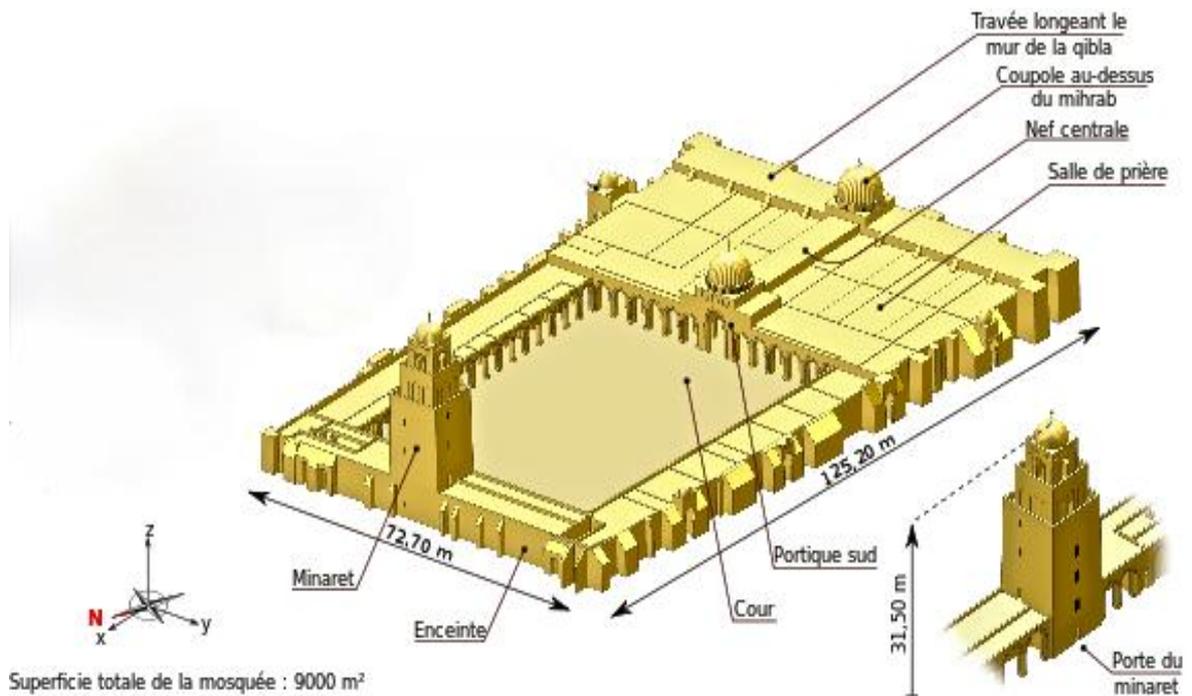


Fig.2.28. Vue perspective de la mosquée d'El Kairouan<sup>189</sup>.

188 صالح لمعي مصطفى، العمارة الإسلامية دار النهضة العربية، بيروت، 1987، ص 1

<sup>189</sup> <https://fr.wikipedia.org/wiki>.

La cour centrale dallée de marbre est encadrée de portiques rythmés par des arcs en plein-cintre outrepassés reposant sur des colonnes antiques, faisant de cette mosquée le plus grand musée de chapiteaux romains et byzantins jamais réunis dans un monument islamique..

Les portiques à doubles arcatures évoquant le modèle abbasside reposent sur des colonnes doubles. Le milieu du portique côté salle de prière, correspondant à l'axe du mihrâb, est mis en valeur par une haute et large arcature flanquée de deux plus étroites, créant ainsi une disposition tripartite rappelant les arcs de triomphe romains et la Grande Mosquée de Damas (705-715). La nef située à l'arrière de ce portique est enrichie, toujours dans l'axe du mihrâb, par une coupole édifiée sous le règne d'Ibrahim II (875-902). Le portique nord est occupé par le minaret<sup>190</sup>.

La salle de prière hypostyle de tradition omeyyade est composée de dix-sept nefs perpendiculaires à la Qibla et de huit travées. Une travée plus large longeant le mur Qibla et la large nef axiale soulignée par des doubles colonnes se rencontrent formant un T , (figure 2.26) et (figure 2.27), que l'on retrouvera dans l'architecture fâtimide dès le Xe siècle . La rencontre de ces deux éléments détermine une zone carrée à l'avant du mihrâb au-dessus de laquelle fut érigée une coupole nervée sur trompes dont les formes et motifs (coquilles, arcs polylobés, rosaces) s'inspirent du répertoire omeyyade tout en véhiculant certains décors abbassides (carrés posés sur la pointe,...). Une maqsura et un minbar complètent l'aménagement de la salle de prière <sup>191</sup>.

Le plan, sans doute inspiré de ceux des mosquées al-Aqsa à Jérusalem (709-715) et de Damas (706), fait montre d'une évolution notable : en privilégiant la travée du mihrâb, le plan en T voit le jour. Il sert d'exemple à la plupart des mosquées ifrîqiennes jusqu'à l'époque ottomane et se propagea au Maghreb central, au Maroc, en Sicile, en Espagne, en Libye et en Égypte fâtimide<sup>192</sup>.

La coupole sur trompes à l'avant du mihrâb se distingue par sa zone médiane, composée de colonnettes et d'arcs outrepassés, et par un décor de coquilles très élaboré dénotant une grande maîtrise technique laissant penser que la construction des coupoles constitue une tradition ancrée dans la région.

---

<sup>190</sup> Lézine, A., *Architecture de l'Ifriqiya, Recherches sur les monuments aghlabides*, Paris, 1966, Klincksieck, pages : 11-52.

<sup>191</sup> Maoudoud, K., *Kairouan*, Tunis, 1991, ANEP, pages : 20-31.

<sup>192</sup> Marçais, G., *Manuel d'art musulman*, 2 vol., Paris, 1926-1927, Picard, pages 15- 32.

Il n'est pas exclu qu'elle constitue un héritage byzantin, mais on ne peut pas écarter la possibilité d'une influence des coupoles sur trompes mésopotamiennes, probablement héritées de l'architecture sassanide, qui se répandirent largement dans le monde islamique à l'époque abbasside. Ce type de coupole se propagea en Ifrîqiya, et apparut également en Sicile , au Maroc et en Égypte 193.

### 3.8. La mosquée de Cordoue : ( 9 au 26 el massajid wa el kessour fi el andlouse)

Pour la plupart des historiens, la mosquée construite par I "Abd al-Rah'mân I était de modestes dimensions en 785.

La forme générale du bâtiment était carrée, tradition qui semble davantage empruntée aux monuments de l'Irak ou à ceux des Umayyades de Syrie.

Les murs nord et ouest ne sont pas parallèles à leur vis-à-vis, ils sont en biais, la façade orientale comptant environ 1,10 m de plus que celle de l'ouest tandis que le mur de la Qibla se trouvait très régulièrement tracé perpendiculairement au mur Oriental.

Cette mosquée, n'avait pas de minaret ni, probablement, de galeries latérales la cour comptait 73,42 m de largeur et 37 m en moyenne de profondeur. Elle était de bonne tradition syrienne.

L'orientation de la Qibla en plein sud est naturellement une erreur qui ne peut s'expliquer que par une transposition pure et simple de la tradition syrienne, très logique géographiquement au Proche-Orient<sup>194</sup>, (figure.2.29).

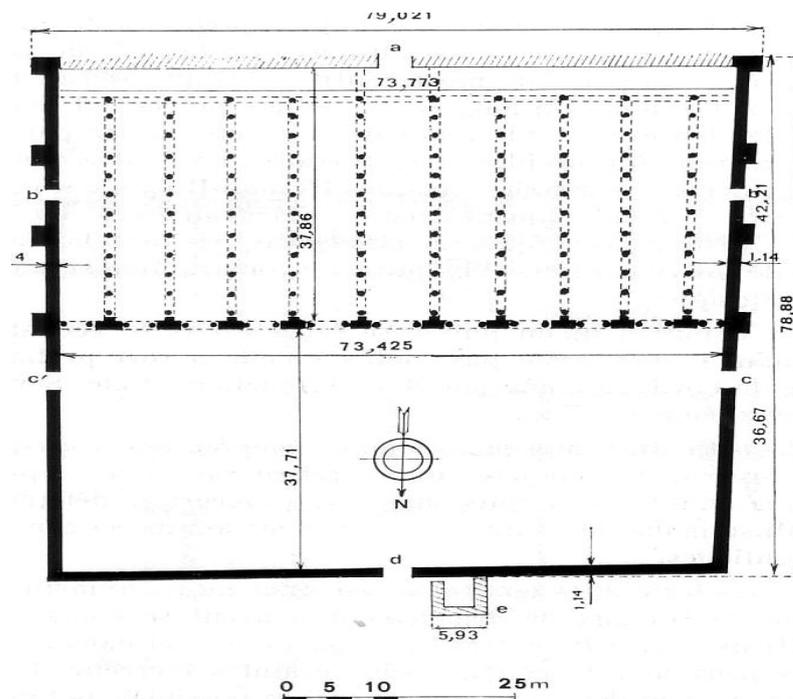


Fig.2.29. Plan de la mosquée de Cordoue <sup>195</sup>.

<sup>193</sup> Creswell, K.A.C., *Early Muslim Architecture*, tome.II, New York, Hacker Art Books, 1979, pages 208-226

<sup>194</sup> Golvin, op cit., pages :36-38.

<sup>195</sup> Golvin, op cit., page 44.

#### **4. Caractéristiques architecturales des différentes dynasties passées par l'Algérie :**

Dans le domaine de l'architecture religieuse, les apports de l'Algérie à la civilisation arabo-islamique ont été considérables et se sont traduits par l'édification de nombreux édifices.

Le plus ancien monument religieux semble avoir été la mosquée bâtie au-dessus du tombeau du célèbre conquérant arabe, Uqba b. Nafî qui trouva le martyr en 63/683, à 5 km à l'Ouest de Tahûdha près de Biskra.

Puis il faut attendre l'année 144/761-762, date à laquelle l'Imâm 'Abd al-Rahmân b. Rustum édifia sa capitale Tahert, à proximité de l'actuelle Tiaret, et la dota d'une mosquée qui n'a pas encore été mise au jour.

Un peu plus tard, en 174/790, l'émir de Fès, Idris I, après avoir conquis Agadir, l'ancienne Tlemcen, y bâtit une mosquée, reconstruite, quelque vingt-cinq ans plus tard, par son fils Idris II, et dont le plan, a été établi grâce aux fouilles entreprises depuis quelques années par la Direction des Antiquités.

En 296/909, l'Imâm Rostémide Y'aqub b. Aflah, chassé de Tahert par les Fatimides, fonda la ville de Sédrata, à 14 km au Sud-Ouest de Ouargla, où une mosquée fut découverte par H. Tarry en 1881.

Vingt-quatre ans plus tard, Zîrî b. Manâd, qui était au service des Fatimides, édifia la ville d'Achir, où une mosquée attend d'être exhumée.

A la même période fut construite la mosquée du Vieux-Ténès, le plus ancien monument religieux musulman qui nous soit parvenu intact.

Sous le règne (Fal-Mrizz b. Bâdîs (401-454/1016-1062), le plus célèbre des souverains zirides, fut bâtie la mosquée de Sayyidî Abî Marwân et on embellit le tombeau de Sayyidî 'Uqba.

A l'époque des Hammâdides (408-552/1018-1152), de nombreuses mosquées furent fondées à la Qala'a des Banî Hammâd, Bidjâya et Constantine. De la première capitale h'ammâdide, il nous reste les vestiges de la Grande Mosquée et l'oratoire que nous avons découvert en septembre 1968. Il ne subsiste rien des édifices religieux h'ammâdides de Bidjâya, par contre, Constantine a conservé sa Grande Mosquée qui date de 530/ 1135-1136.

Tandis que les H'ammâdides régnaient sur la partie orientale de notre pays, les Almoravides, venus du Maghrib Extrême, faisaient de Tlemcen une des capitales de leur empire et dotaient l'Algérie des trois grandes Mosquées d'Alger, de Nédroma et de Tlemcen. La première fut construite en 490/1097, la seconde, à une date non déterminée mais probablement sous le règne de Yûsuf b. Tâchufin (465-500/1073-1106), et la troisième, en 530/1135-1136, la même année que la Grande Mosquée de Constantine.

Les Almohades ont sans doute travaillé à la Grande Mosquée de Tlemcen. Les Zayyânides qui gouvernèrent le royaume de Tlemcen de 633/1236 à 957/1550, édifièrent, entre autres, les Mosquées de Sayyidî Abil-I'asan, wlâd al-Imâm, du Méchouar et de Sayyidî Ibrahim. La première fut bâtie en 696/1296, les deux suivantes sous le règne a"Abu Hammû I (707-717/1307-1317), et la dernière, à l'époque d'Abu Hammû II (760-791)

Nous leur devons également l'érection du minaret d'Agadir et des minarets des Grandes Mosquées d'Alger, Nédroma et Tlemcen.

Les Mérinides qui occupèrent temporairement Tlemcen l'ont dotée des mosquées de Mançûra, Sayyidî Abi Madyan et Sayyidî I-Halwi, construites respectivement en 702/1302, 739/1338 et 754/1354.

En 920/1514, le Turc Aroudj conquiert Djidjel .Deux ans plus tard, appelé par les habitants d'Alger, menacés par les canons que les Espagnols avaient installés au Penon, s'établit dans la ville et en fit sa capitale. Aroudj et ses successeurs qui gouvernèrent notre pays durant plus de trois siècles, y construisirent un grand nombre de mosquées. La seule ville d'Alger possédait, selon Haëdo, près de cent oratoires. Parmi ceux qui existent encore de nos jours, citons Djâma Çafar (941/1535), la Mosquée de Sidî Ramdan dont nous ignorons la date de construction exacte, la Mosquée de Sayyidî Muh'ammad al-Charif (vers 948/1542), la Mosquée Ali Bitchnin (1032/1622), Djâmî Djadid (1070/1661-1662), la Mosquée de Sayyidî Abdal-Rah'man (1108/1696), la Mosquée de Sayyidî Mhammed (1206/1791), la Mosquée Ketchaoua (1209/1794), la Mosquée Extérieure de la Kasba ou al-Djâmî al-Barrânî (1233/1817-1818) et la Mosquée Intérieure de la Kasba, actuellement Mosquée Ali Khodja (1234/1818-1819).

Les Turcs ont élevé des monuments religieux dans d'autres villes d'Algérie. Constantine leur doit les Mosquées de Sûq al-Ghazal (1153- 1740) et plusieurs d'autres dans le pays <sup>196</sup>.

---

<sup>196</sup> BOUROUIBA Rachid, Apports De L'Algérie A L'architecture Religieuse Arabo Islamique, pages 4-8

#### 4.1. Architecture zirides:

- **Mosquée de Sidi Okba Biskra 67-416 H / 686-1025 ap-JC:** Le sanctuaire et la mosquée étaient d'une grande simplicité, l'ensemble des éléments architectoniques étaient recouverts de mortier de chaux ; aucun matériau riche ou matière précieuse n'entrait dans la construction. Le plan de la mosquée n'est pas très éloigné de celui des plus anciennes mosquées, (figure.2.30), et notamment de la toute première, celle construite par le Prophète lui-même, comme en témoigne la disposition des travées parallèles au mur de la Qibla. Au sol, les bases des colonnes étaient reliées par un rehaussement d'une dizaine de centimètres, délimitant ainsi l'espace nécessaire à la prosternation en alignements de fidèles. Coiffant des colonnes, dont certaines sont des troncs de palmiers recouverts de mortier de chaux, des chapiteaux moulés au mortier de chaux supportent les arcs, dépourvus de toute décoration. Souligné par un arc celui-ci orné de stucs aux motifs géométrique<sup>197</sup>.

Le mihrab : est coiffé d'une demi-coupole à cannelures rayonnantes. Les chapiteaux eux aussi sont cannelés, suggérant ainsi des palmiers très stylisés. De la terrasse qui couvre la salle de prières émergent deux coupoles, l'une surmontant le tombeau, l'autre au-devant du mihrab.

La célèbre porte à deux battants en cèdre sculpté qui commandait l'accès à la salle de prières à partir d'une des trois entrées de la courette latérale a été déplacée sur la façade opposée lors de travaux d'aménagement de la mosquée autour des années 1969-1970. Des travaux de rénovation et "d'intégration" du sanctuaire et de la mosquée dans un grand complexe culturel ont été entrepris ces dernières années<sup>198</sup>.

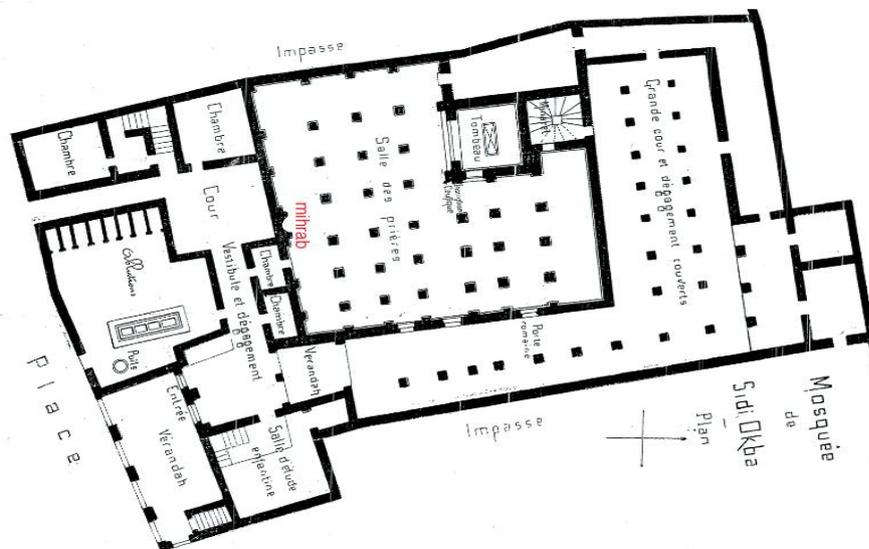


Fig.2.30. Plan de la mosquée Sidi Okba .

<sup>197</sup> Marçais, architecture musulmane, op cit., page 307.

<sup>198</sup> Bourouiba, R., Apports de l'Algérie à l'architecture arabo-islamique, Alger, 1986, page 124.

<sup>199</sup> Plan Mosquée de Sidi-Okba ; Revue africaine (Plan) n° 272-273, 1909.

- **La mosquée de Sedrata :**

Le plan est incomplet, en particulier pour la partie nord-est de la salle de prière. La mosquée comptait trente-six voûtes. Le mur sud-est (probablement celui de la Qibla) une longueur de 17 m, l'arc du milieu, qui abrite le mihrab, est plus large que les autres.

Trois petites niches aveugles et cintrées s'ouvrent dans le mur du fond, à 2,38 m d hauteur. Des troncs de palmiers renforcent la maçonnerie. On remarquera sur le plan l'indication d'un fut de colonne ronde à l'entrée de la niche. Cette entrée était probablement surmontée d'un arc soutenu par deux colonnettes engagées, tel que se trouve plusieurs exemples dans les demeures privées de Sedrata.

Les arcs aveugles des murs sont en plein cintre. Pour les arcatures définissant les nefs, on peut penser qu'il en était de même nature, mais il s'agit d'une simple conjecture.

A l'extrémité Nord-Est de l'édifice se trouvent les restes du minaret 200,(figure.2.31).

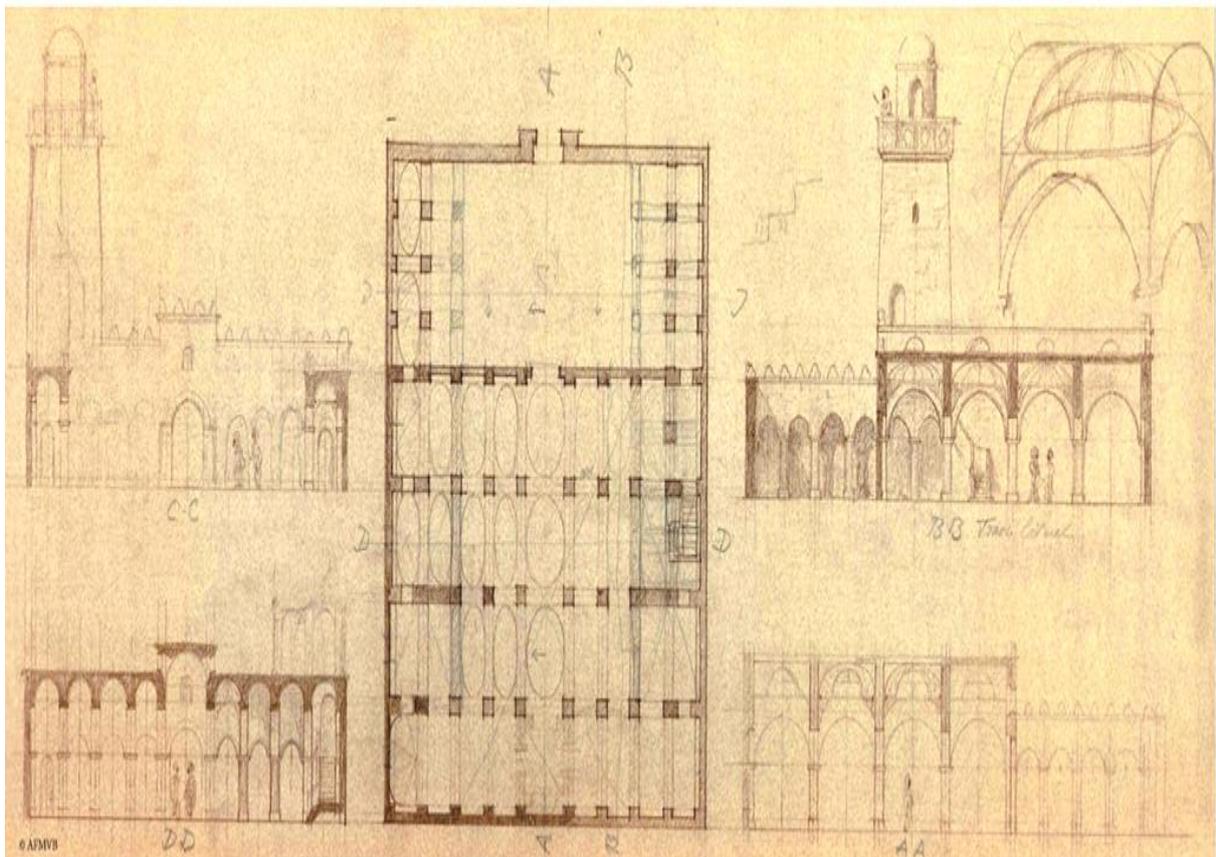


Fig.2.31. Plan et coupe de la mosquée de Sedrata<sup>201</sup>.

<sup>200</sup> Patrice Cressier, Sophie Gilotte, Sedrata: Histoire et archéologie d'un carrefour du Sahara médiéval à la lumière des archives inédites de Marguerite Van Berchem. Madrid 2017. Pages 226-230

<sup>201</sup> Patrice Cressier, op cit, page 236.

- **Mosquée du vieux Ténès :**

La mosquée couvre un rectangle assez régulier, (figure.2.32), qui mesure, dans ses plus grandes dimensions, 18 m. 60 sur 34 m. 50. La porte (A), qui donne entrée directement dans la salle de prières, s'ouvre sur la face orientale. Cette porte est placée à 50 cm. du sol de la rue. On y accède par un perron double établi sur un massif en maçonnerie, à l'angle Nord-Ouest de la salle, s'élève un minaret carré très simple, de 15 m. de haut, et dont la base forme empâtement. Une cour étroite, et peu profonde longe la face Nord de la salle de prières. On trouve dans la cour un puits (J) et un tombeau (K) couvert d'une coupole octogonale sur trompes.

Les nefs sont au nombre de cinq ; mais, contrairement à l'ordonnance presque invariable en Berbérie, elles sont parallèles au mur de la Qibla, le mur Sud, où se creuse le mihrâb et non perpendiculaires à ce mur. Quatre rangées de dix colonnes chacune portent les arcs dirigés Est-Ouest, qui séparent les nefs entre elles, soit quarante colonnes, dont les fûts et les chapiteaux proviennent d'édifices romains ou chrétiens. Des arcs enjambant les nefs isolent, les deux dernières travées de l'Est et les deux dernières de l'Ouest. Deux arcades règnent également dans la partie centrale de la travée voisine de celle où se trouve le mihrâb. La niche de ce mihrâb (È) est sans caractère; l'arc, que circonscrit une voussure, est écrasé et surmonté de trois arcatures frustes, en plein cintre. Les arcades sont des arcs à fers-à-cheval légèrement brisés ou déformés au sommet.

Une preuve de d'ancienneté peut être tirée de la présence des colonnes et des chapiteaux réemployés. Durant les premiers siècles de l'occupation musulmane, les architectes de mosquées, continuateurs des architectes de basiliques, eurent volontiers recours aux édifices chrétiens du pays pour leur emprunter les supports tout taillés qu'ils y trouvaient. Par la suite, ces carrières de matériaux étant épuisées, ils prirent le parti d'élever leurs nefs sur des piliers de maçonnerie.

L'anatomie des arcs et de leurs supports va nous aider à préciser cette hypothèse. Nous avons dit que les arcs, qui longent les nefs et les enjambent, sont des arcs outrepassés, dont le sommet est quelquefois brisé et dessine un angle à peine indiqué, plus souvent déformé : les deux grands arcs de cercle qui les composent se raccordant par un arc de cercle très petit. Ce tracé est d'un usage habituel dans l'Ifriqiya du IX<sup>e</sup> et du X<sup>e</sup> siècle. On le rencontre notamment à la Grande Mosquée de Kairouan et au Ribât de Sousse, construits au IX<sup>e</sup> siècle par les émirs aghlabides, à la Mosquée de Mahdiyya, oeuvre des Khalifes fâtimides (X<sup>e</sup> siècle), et à la mosquée de Sfax, dans une partie que l'on peut dater au plus tard de 370 de l'hégire (981 ap-JC)<sup>202</sup>.

---

<sup>202</sup> Dessus Lamare, A.; Marçais, Georges, Recherches d'archéologie musulmane. La mosquée du Vieux-Ténès. Revue Africaine, Bulletin De La Société Historique Algérienne, pages530- 540.

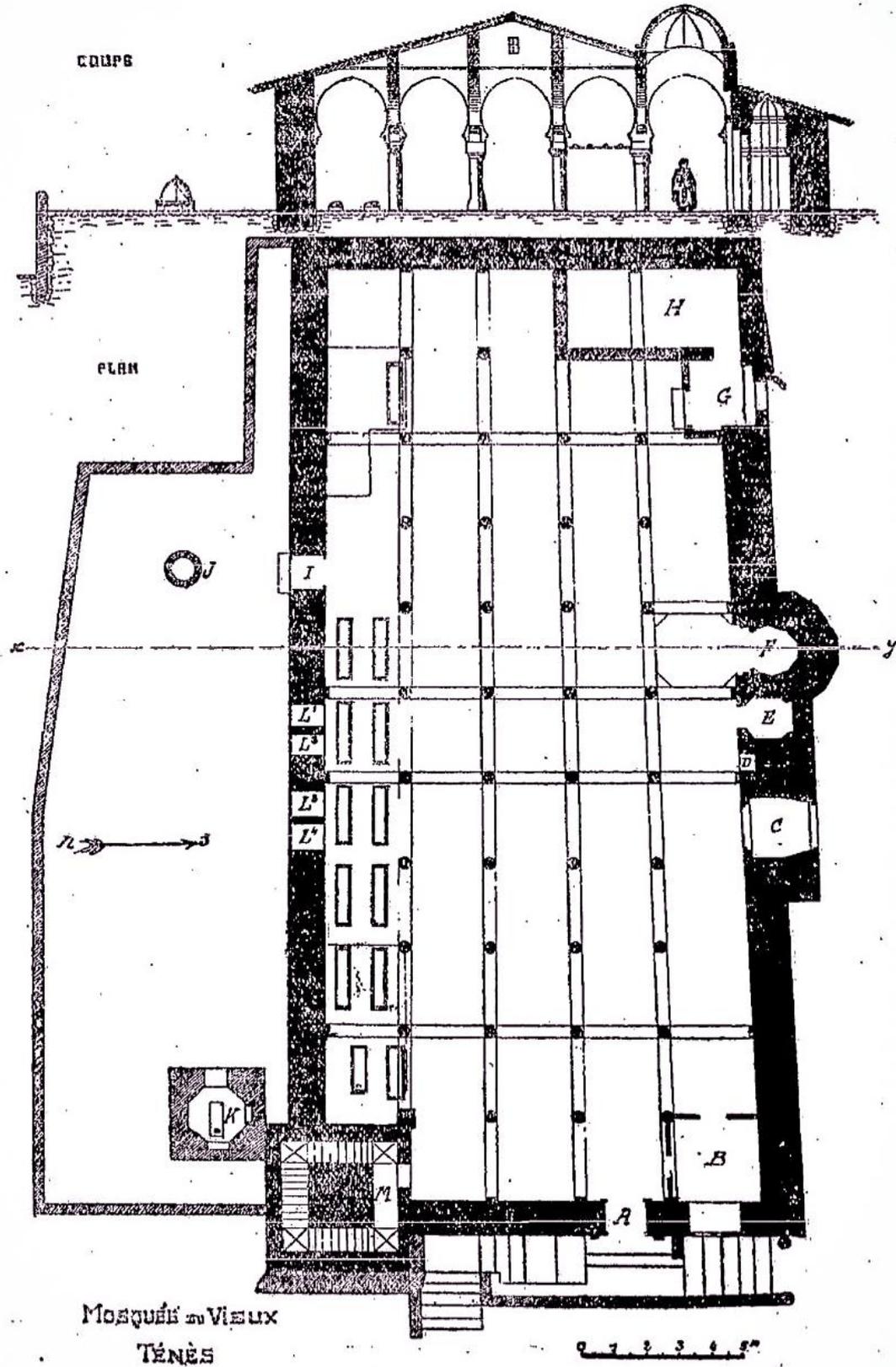


Fig.2.32.Plan et coupe de la mosquée du vieux Ténès<sup>203</sup>.

<sup>203</sup> Revue Africaine, Iconographie, Mosquée au Vieux Ténès, N°320, 1925.

#### 4. 2. Architecture Hammadites :

- **Mosquée de la Kalaa Banu hammad :**

La mosquée se compose d'un minaret encore debout et d'un grand bâtiment rectangulaire de 66 sur 54 mètres à contreforts extérieurs, dont il ne reste que des fondations.

L'entrée se trouvant sur le côté, on rencontrait d'abord une cour à portique avec citerne (figure.2.33); Les colonnes du portique étaient cylindriques et en marbre blanc. Elles reposaient sur des dés en maçonnerie noyés dans le sol. Elles ne sont plus entières. Les cinq colonnes de l'Est manquent totalement.

Un mur AB avec des ouvertures séparait les cours à portiques de la grande salle de la mosquée proprement dite. Les colonnes de cette salle ont disparu. Il n'en reste que les fondations.

Une maksourah entourée d'un mur en maçonnerie qui supportait probablement une balustrade précédait le mirhab .

Plusieurs portes communiquaient avec l'extérieur et donnaient accès dans une série de salles, de chambres ou d'habitations qui couvrent le plateau et avaient probablement une affectation analogue à celle de la Mosquée de Kalaoun au Caire.

Le minaret en pierres. Il est à base carrée comme les minarets syriens à 6m. 50 de côté; sa hauteur est de 25 mètres. Le sommet a perdu la petite coupole qui le surmontait<sup>204</sup>.

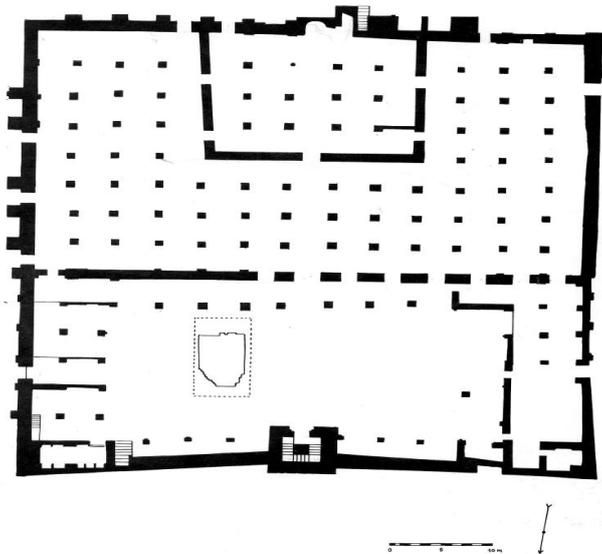


Fig.2.33.Plan de la Kalaa de Banu Hammad<sup>205</sup>.

<sup>204</sup> L. de Beylié, *La Kalaa des Beni-Hammad : une capitale berbère de l'Afrique du nord au XIe siècle*, 1909, p 32.

<sup>205</sup> L. de Beylié, op cit., page 34

### 4.3. Architecture almoravide :

A Nédroma comme à Tlemcen, l'art andalou exerce une grande influence. Cette empreinte de l'art hispano mauresque est retrouvée, surtout, au Maroc, et dans certaines villes d'Algérie, telle Oran, Ténès, Cherchell et Alger.

Pour la Grande Mosquée de Tlemcen, Yoûsof b. Tachfin voulait un édifice simple. Le dépouillement architectural et l'austérité Saharienne font contraste avec l'abondance décorative de la nef centrale, plus tardive, avec ses plafonds aux poutres sculptées, le mihrab creusé dans le mur du fond et la coupole qui le précède, elle fut exécutée en 1136 selon une inscription sur la corniche <sup>206</sup>.

« Parlant de l'art almoravide H. Terrasse<sup>1</sup>, fit remarquer qu'Ali dépassa, de loin, l'oeuvre monumentale de son père Youssef, fondateur de villes et grand bâtisseur. Les palais et les sanctuaires qu'il édifia à Marrakech ont été détruits par les Almohades, à l'exception d'une coupole, mais il reste la mosquée de Tlemcen, et la plus grande partie de la Qaraouyéne où apparaît l'art andalou importé sans changement, tel qu'il était au XI ème siècle avec ses ornements. »<sup>207</sup>.

La morphologie des mosquées de cette époque se reconnaît à la structure. Elles sont composées de travées parallèles, chacune recouverte d'une toiture, d'une cour et d'un minaret à l'exemple de la grande mosquée de Tlemcen. Certaines mosquées plus anciennes sont recouvertes de terrasses avec la subsistance du même type de travées. Ces travées ont des hauteurs et des longueurs différentes selon la taille de la mosquée, mais elles ont la même largeur correspondant au franchissement d'une solive. Les solives sont distantes de 30 à 50 cm et forment le plafond, supportent le toit. Leurs deux extrémités reposent sur des murs évidés en arcatures, en portiques. Lorsqu'il s'agit de toiture au lieu de terrasse, la disposition des pièces de bois soutenant les tuiles devient angulaire au lieu d'être horizontale (solives), sont des fermettes qui reposent elles aussi sur des portiques. Le système de solives sous terrasse et des toits avec fermettes donne le même écartement entre portiques puisqu'il est basé sur la résistance au poids d'une même longueur de pièce de bois <sup>208</sup>.

Deux types de plans de mosquées sont discernables en Algérie à cette époque ; celles apparentées à l' « Orient » dont les nefs sont parallèles au mur de Qibla (direction de la prière) ; telle la mosquée de Ténès ou de Sidi Ukba, et telle était la mosquée de Médine. Cette disposition est connue et employée en Syrie, Arabie et en Egypte.

---

<sup>206</sup> Lucien Golvin, op cit., page 218.

<sup>207</sup> Henri Terrasse, op cit., page 122.

<sup>208</sup> Bourouiba, op cit., page 130.

Le deuxième type de plans de mosquées, dit « Andalou », présente des nefs perpendiculaires à la Qibla, comme la grande mosquée de Cordoue.

Les minarets sont à parement de céramique colorée, ornements soulignant les lignes de force, d'appui ou de soutien, ou les encadrement de portes, de fenêtres, de mihrabs, stucs et boiserie de cèdres sculptées ont souvent été décrites par les voyageurs concernant ces mosquées <sup>209</sup>.

- **La grande mosquée de Tlemcen :**

Le plan de la Grande Mosquée est simple et classique. La cour (çahn) est un carré d'à peu près 20 mètres de côté ; (figure,2.34) , flanqué à l'Est et à l'Ouest de portiques couverts ii trois et quatre nefs. Au Nord, un portique transversal à quatre travées enveloppe le minaret. Nous avons peine à croire que cette disposition soit originelle, et que les deux galeries qui flanquent la tour du côté de la façade principale aient fait partie de l'ancien plan. La proportion ordinaire des mosquées, observée dans la mosquée de Cordoue, qui fait de la première arcade de la salle de prière le milieu de l'ensemble, suivant l'axe, l'habitude de placer le minaret en bordure ou même saillant sur la tare principale, la présence d'un mur isolant les deux galeries indiquent Suffisamment où s'arrêtait primitivement la Grande Mosquée.

La salle de prière est formée de treize nefs perpendiculaires au mur du mihrâb et portées par six rangs de piliers, la plupart soutenant des arcs plein cintre en fer à cheval; quelques-uns, dans la partie orientale portent des arcs brisés. Les nefs ont toutes 3m ,20 de largeur; seule la nef médiane à 4m ,60. L'intérieur de la salle, qui forme un rectangle assez exactement deux fois plus large que profond, présente un total de 60 pieds droits et de deux colonnes.

Deux coupoles situées dans le grand axe, l'une précédant le mihrâb, la seconde au centre de la salle, derrière le Sedda, ont nécessité l'emploi d'arcades transversales établissant un tambour inférieur.

Les coupoles et le mihrâb. La coupole centrale est creusée de larges cannelures rayonnantes. Celle qui précède le mihrâb est polygonale. Le point de départ des pans qui la forment est une suite d'arcades trilobées et celles des angles formant trompes sont décorées de stalactites embryonnaires). Des cintres étroits, se croisant plusieurs fois au sommet, séparent les pans entièrement ajourés. Le tambour carré sur lequel elle est établie a pour corniche un large cavet soit court eu caractères andalous l'inscription dédicatoire dont nous avons plus haut donné la traduction <sup>210</sup>.

---

<sup>209</sup> Bourouiba op cit., page 40.

<sup>210</sup>William Marçais, Georges Marçais, les monuments arabes de Tlemcen, A. Fontemoing, 1903, pages 142.

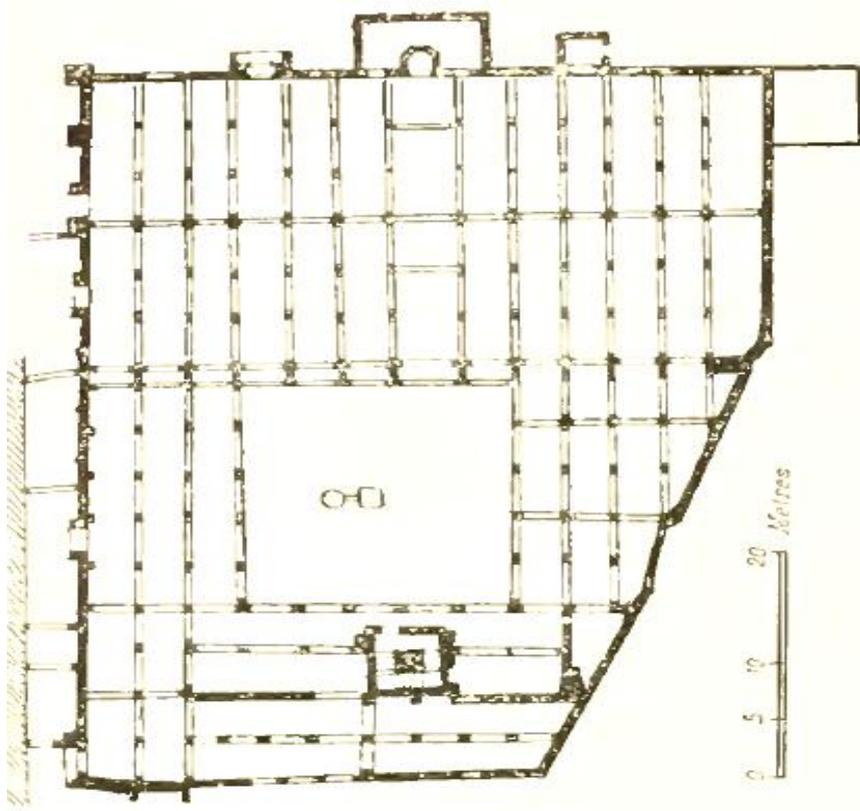


Fig.2.34. Plan de la mosquée de Tlemcen <sup>211</sup>.

#### 4.4. Architecture Almohade:

La mosquée reproduit le style de la mosquée almoravide mais elle est plus haute et plus élancée. L'articulation du plan avec l'élévation y est plus systématique et plus précise grâce aux pavillons recouverts en charpentes en bois.

Le plan arabe persiste encore, avec des nefs perpendiculaires à la qibla, parfois en T. La cour demeure de forme rectangulaire et parallèle sur sa longueur au mur de la Qibla.

-Les grands minarets sont des tours carrées couronnées sur la partie supérieure par des merlons à dents et surmontés d'un lanterneau.

-Le recours aux piliers maçonnés composant l'essentiel des supports verticaux.

-L'emploi très fréquent des arcs brisés outrepassés appareillés en brique, ainsi que les arcs polylobés.

-L'usage usuel de la brique et du béton de terre coulé.

Le minaret sur plan carré, orné de simple motifs géométriques, en réseau losangé formant un panneau décoratif principal <sup>212</sup>.

<sup>211</sup> William Marçais, op cité, page 45.

<sup>212</sup> Bourouiba, op cit., page 52.

#### 4.5. Architecture Zianide :

On donne le nom de 'Abd al-Wâdide ou de Zayyânide à la dynastie fondée en 633/1235 par Yaghmurâsan b. Zayyân chef de la tribu des Banû 'Abd al Wâd qui devait gouverner royaume de Tlemcen jusqu'au XVIe siècle.

Les seuls monuments religieux 'abd al-wâdides qui nous sont parvenus sans avoir subi de modifications profondes dans leur plan, sont les mosquées de Sayyidî Abû-l-H'asan, Awlâd al-Imâm et Sayyidî Ibrahim.

La première mosquée est presque carrée et les deux autres plus larges que profondes (figure.2.35).

Les trois mosquées d'abd al-wadides ont des nefes perpendiculaires au mur de la Qibla, au nombre de trois à Sayyidi Abu-l-H'asan et Awlad al-Imam ; de cinq, à Sayyidi Ibrahim.

Dans ce dernier édifice, la nef centrale à une profondeur de quatre travées. Elle est la seule à se prolonger jusqu'au mur du mihrab. Les autres ne comptent que trois travées.

On remarque l'absence des arcs lobés si nombreux à l'époque précédente et des arcs à lambrequins des monuments almohades.

Nous assistons donc, sous les Zayyânides à un retour à la simplicité des monuments maghribins pré-almoravides.

Nous trouvons des arcs de plein cintre outrepassés à Awlâd al-Imâm, des arcs brisés à Sayyidî 'Abu-l-H'asan et à Sayyidî Ibrâhîm.

Les mihrâbs 'abd al-wâdides ont une orientation sud, sud-est. Deux d'entre eux, ceux de Sayyidî Abû-l-H'asan et d'Awlâd al-Imâm n'ont pas subi de profonds remaniements<sup>213</sup>.

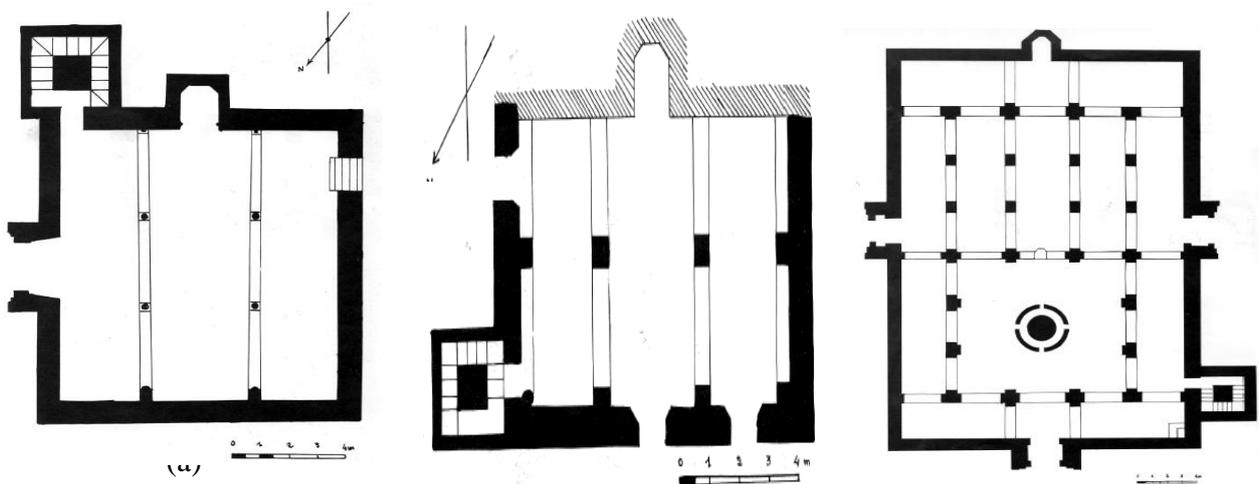


Fig.2.35. (a) mosquée Sayyidî Abû-l-H'asan ;(b) mosquée Awlâd al-Imâm;(c): mosquée Sayyidî Ibrâhîm<sup>214</sup>.

<sup>213</sup> Bourouiba Rachid , op cit., pages 110- 114

<sup>214</sup> Bourouiba Rachid, op cité, planches LXIX- LXXI.

#### 4.6 Architecture mérinide :

Les Mérinides ont édifié en Algérie les mosquées de Mançûra, de Sayyidî Abu Madyan et de Sayyidî-l-H'alwî.

La Mosquée de Mançûra mesure 60 m de largeur et 85 m de profondeur. C'est la plus grande mosquée d'Algérie. Les Mosquées de Sayyidî Abu Madyan et de Sayyidî-l-H'alwî ont pour dimensions respectives : 18,90 m sur 28,45 m et 17,40 m sur 27,50 m.

Ils sont d'une absolue symétrie et se présentent à nous sous la forme d'un rectangle plus profond que large, (figure.2.36).

Ils ont une cour carrée ou presque carrée, alors que les cours almoravides et almohades étaient rectangulaires et que les édifices 'abd al-wâdides, qui leur sont antérieurs, en étaient dépourvu.

La salle de prière de Mançûra comptait treize nefs perpendiculaires au mur du mihrâb. Mais, fait caractéristique, toutes les rangées de supports, s'arrêtent à trois travées de la qibla, à l'exception de deux d'entre elles, qui déterminent un carré de trois travées de côté en avant du mihrâb et deux rectangles. Le carré devait supporter soit une coupole soit un toit pyramidal.

Quant aux rectangles, ils étaient divisés en trois nefs transversales par deux rangées de piliers.

Les salles de prière de Sayyidî Abu Madyan et de Sayyidî-l-H'alwî ne comptent que cinq nefs perpendiculaires au mihrâb. Seule la nef centrale se prolonge jusqu'au mur de la qibla. Les autres s'arrêtent à une travée avant .

Le plan de la salle de prière de Mançûras'inspire de celui de la Mosquée de H'assân à Rabat, où on trouvait déjà les trois nefs transversales en avant du mihrâb.

Les salles de prière de Sayyidî Abu Madyan et Sayyidî-l-H'alwî imitent, au contraire, celles de Tinmâl où certaines nefs s'arrêtent à une travée du mihrâb.

Les arcs de la Mosquée de Mançûra. A Sayyidî Abu Madyan et à Sayyidî-l-H'alwî, ils sont outrepassés brisés.

Nous n'avons pas en Algérie les arcs à lambrequins, hérités des Almohades, qui font la parure des monuments mérinides du Maroc : Grande Mosquée et Mosquée al-H'amra de Fès et Grande Mosquée de Taza.

Nous ne possédons pas non plus d'arcs en accolade et lobés tels que ceux qui encadrent le mihrâb de la Grande Mosquée de Fès.

Le mihrâb de Mançûra a une orientation sudalors que ceux de Sayyidî abu Madyan et de Sayyidî-l-H'alwî sont dirigés vers le sud-sud/est <sup>215</sup>.

---

<sup>215</sup> Bourouiba rachid, op cité., page 155.

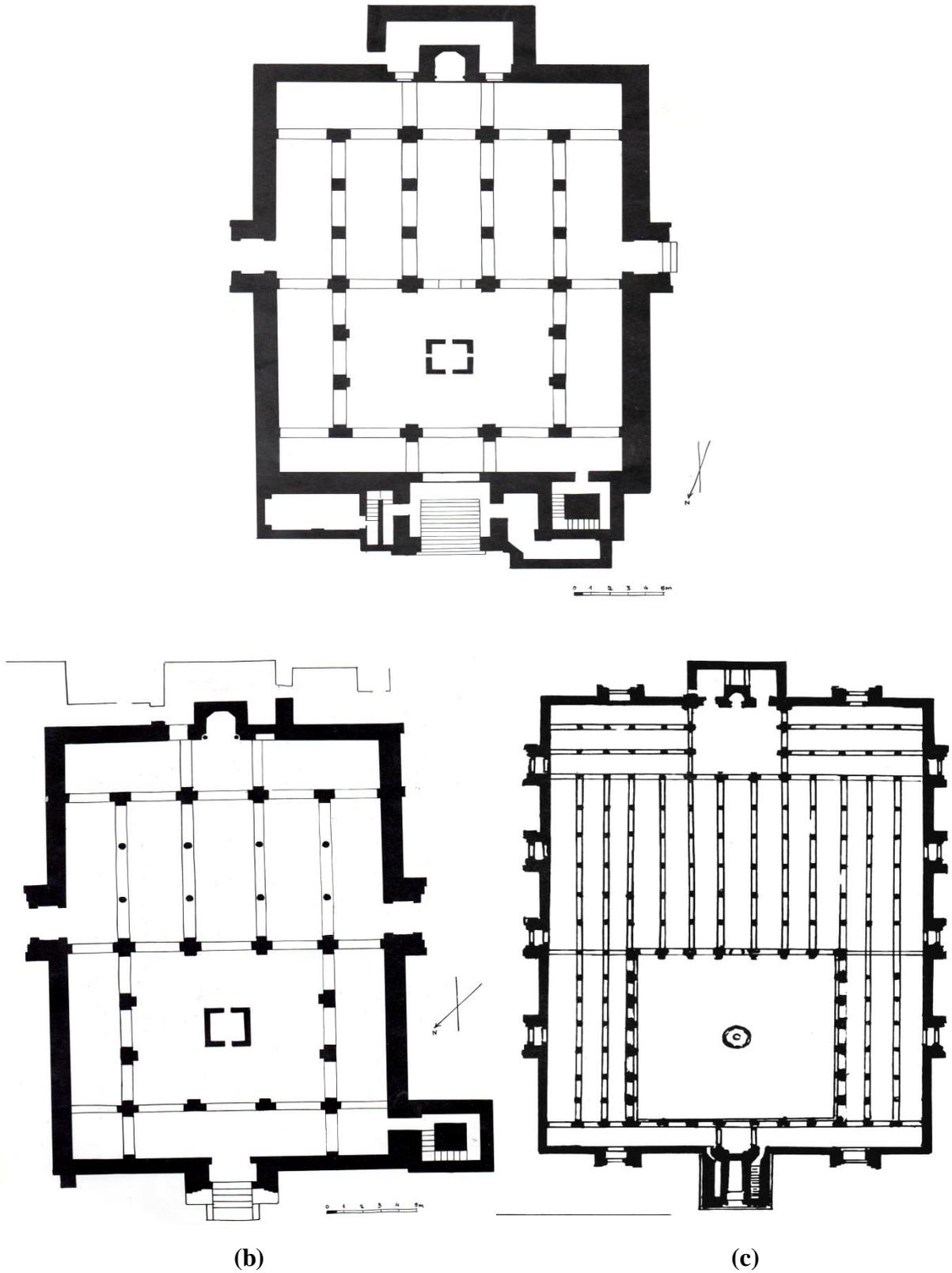


Fig.2.36 :(a) mosquée de Sayyidî Abu Madyan ;(b) mosquée de Sayyidî-l-H'alwî ;(c). mosquée de Mançûra<sup>216</sup>.

<sup>216</sup> Bourouiba, op cit., planches XCIII-XCV.

#### 4.7. Architecture Ottomanes :

- **mosquée de la Pêcherie à Alger** : 1070 H./ 1660 ap-JC

Cette mosquée hanafite, fut construite sur l'emplacement de la medersa Bou Anan. Son plan est basilical, ses trois nefs perpendiculaires au mur de la qibla sont coupées par cinq travées.

La nef centrale et l'avant dernière travée sont surélevés formant au niveau du toit une croix latine, (figure.2.37), dont le croisement des bras est surplombé d'une coupole, tandis que les nefs latérales sont couvertes de coupolettes et de terrasses plates surmontant des arcs de cloître, allégés à leur base de défoncements en arc brisé.

Aux quatre angles, au-delà de l'espace couvert par la coupole centrale, quatre espaces carrés sont coiffés de quatre coupoles octogonales. Entre ces espaces carrés, trois des espaces ainsi délimités sont couverts, chacun, d'une voûte en berceau. Le quatrième espace, celui qui fait face au mur de la Qibla, est couvert d'une quatrième voûte sur trois travées ; la niche du mihrâb est octogonale, coiffée d'un cul-de-four. La partie inférieure est ornée de Zellidj encadrés par deux plinthes de marbre. Le minaret carré à lanternon de silhouette maghrébine, couronnées d'une frise de céramique<sup>217</sup>.

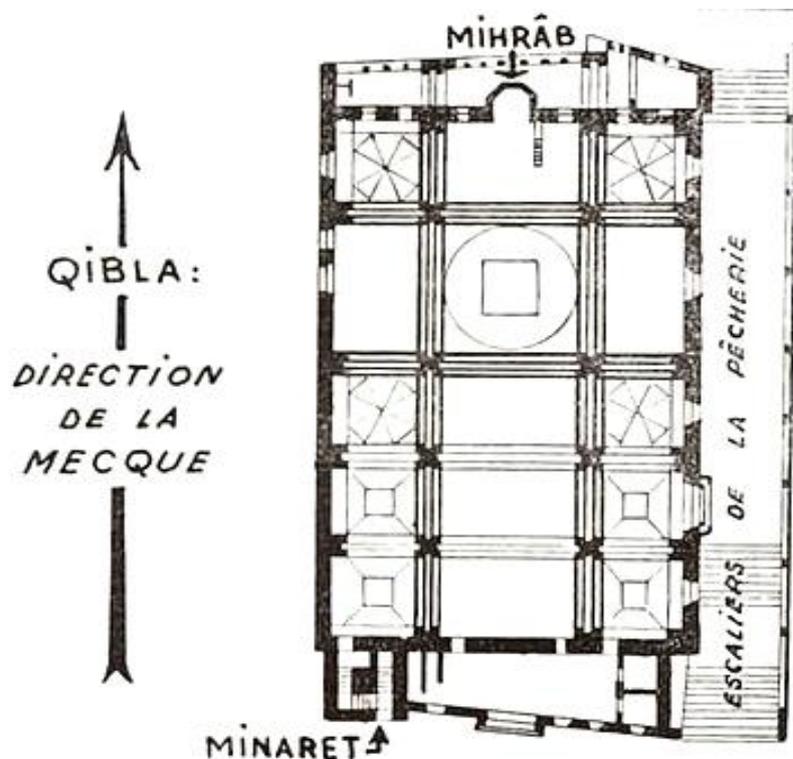


Fig.2.37. Plan de la mosquée de la pêcheurie<sup>218</sup>.

<sup>217</sup> Henri Klein, Feuilles d'El-Djezaïr , les mosquées ,(volume récapitulatif), 1937, pages 153- 154.

<sup>218</sup> <https://www.wikiwand.com/fr>.

## 5. Conclusion:

Après cette étude historique sur la naissance et le développement des mosquées dans le temps et à travers le monde musulmans et l'Algérie nous pouvons tirer quelques conclusions sur les caractéristiques des mosquées de la période médiévale. Ces derniers sont caractérisés par :

- Utilisation du plan arabe à cour et salle de prière type hypostyle comme la mosquée du prophète QSSL à Médine, le plan arabe hypostyle à abside comme celui de la grande mosquée omeyyade à Damas. Souvent plus large que profond.
- Les colonnes et les chapiteaux, sont de remploi d'édifices romains byzantins ou chrétiens. Ils ne proviennent pas des mêmes édifices, ils n'ont donc pas la même hauteur, d'où un jeu sur la hauteur des bases pour harmoniser l'ensemble comme à la mosquée de Damas, au dôme de rocher et celui du vieux Ténès.
- La salle de prière présente des nefs généralement parallèles au mur de la *Qibla mosquée du prophète, Damas, Cordoue*.
- Les arcades des nefs des salles de prières sont plein cintre outrepassé (fer à cheval) ou brisé, dont les origines sont forte probable romaine et byzantine. En Occident musulman, l'emploi de cet arc est attesté dès la deuxième moitié du 8<sup>ème</sup> siècle, dans la grande mosquée de Cordoue. Dans les premières grandes mosquées tunisiennes, à savoir celles de Kairouan et de Tunis (la Zaytûna),
- Le Mihrab : Creusé au milieu du mur de la Qibla, il est le point de repère indiquant l'orientation de la prière dans la direction de la Kaaba. cette niche n'existait pas dans la primitive mosquée de Médine, ni dans les autres anciennes mosquées de l'Islam comme celles d'El Kûfa, El Basra, El Wâsit, etc. Les textes anciens et les données archéologiques sont concordants et n'attestent pas l'existence du mihrab en creux dans ces lieux de culte. L'apparition du mihrab dans l'architecture religieuse musulmane ne remonte donc pas à l'époque du Prophète Qsssl, mais date certainement de la période omeyyade. Le mihrab concave semble avoir été aménagé pour la première fois par le calife 'Umar Ibn 'Abd al- 'Azîz lorsqu'il rebâtit la mosquée médinoise du Prophète Qsssl en 87-88 H./706-707 J.C. ; c'est à partir de cette date que les mihrabs semi-circulaires se répandirent dans le monde musulman. Le plus ancien mihrab connu au Maghreb est celui de la mosquée de Bu Fatata à Sousse en Tunisie dont la date de construction est située entre 223 H./838 J.C. et 226 H./841 J.C.
- L'orientation de la Qibla : l'orientation de la Qibla dans les mosquées médiévales

- sont diverses nous pouvons citer :

La tendance Sud-Est : Cette tendance est représentée plusieurs mosquées. Il s'agit des mosquées médiévales de Sadrâta, et des mosquées alaouites d'al-Zaytûna. Elle est attestée également dans un bon nombre d'édifices religieux d'al-Andalus (Cordoue, Séville, Malaga, Grenade, Jaén, Malaga, Tolède, Saragosse, Cadix, Alicante<sup>132</sup>).

La tendance Cordouane : Comme pourrait l'indiquer son nom, la tendance cordouane concerne les édifices dont l'orientation est analogue à celle de la grande mosquée de Cordoue.

La tendance Sud : une bonne partie de mosquées sont orientées selon la direction du Sud. Celles-ci se dressent dans plusieurs d'Espagne (à Tudèle, Séville, Almería, Tolède, Málaga et Grenade ;

L'orientation des édifices religieux médiévaux est, souvent, défectueuse et ne vise pas la bonne direction de la Kaaba. Les erreurs d'orientation sont provoquées par des causes

Variées, relatives à la topographie du terrain, le tracé urbain, l'application des méthodes traditionnelles, l'utilisation très limitée de l'astronomie mathématique et les conflits idéologiques.

Dans un autre ordre d'idées, certains édifices religieux Magribin et d'al- Andalus sont érigés sur l'emplacement d'anciennes églises et présentent, donc, une orientation incorrecte, conditionnée par la direction des niches chrétiennes, et par l'axe directeur des trames urbaines préexistantes.

En règle générale, la direction du mihrab se trouve donc influencée par l'architecture de l'église : celui-ci se creuse généralement dans le mur de l'épître. Les Musulmans avaient l'habitude d'utiliser les églises dans le sens transversal afin de se conformer à la direction de la Qibla. Une telle réutilisation de lieux de culte antiques induit les marges d'erreurs et augmente automatiquement le degré de déviation par rapport à la bonne direction de la Kaaba.

Dans le territoire andalou, les cas relatifs à la conversion d'églises en mosquées sont beaucoup plus nombreux que ceux Magrébines. Plusieurs édifices de culte musulman ont été construits sur les décombres d'églises romaines paléochrétiennes et wisigothes. Bâtie sur l'église de San Vicente, la grande mosquée de Cordoue n'est pas dirigée vers la bonne direction de la *qibla* : le mihrab est aménagé dans le mur perpendiculaire à celui de l'abside chrétienne.

Le minaret est postérieur à l'islam. Il n'a pas été préconisé par le prophète (QSSL) et les premiers sont apparus dans le premier siècle de l'Hégire. Au Maghreb, le plus ancien minaret est celui de la Grande Mosquée de Kairouan en Tunisie. Il est également le plus ancien minaret encore debout de tout le monde musulman et par conséquent le plus ancien au monde qui soit parvenu jusqu'à nous. La construction du minaret de la Grande Mosquée de Kairouan,

probablement commencée dès le début du VIIIe siècle, date dans son état actuel de la première moitié du IXe siècle (vers 836).

## **Chapitre 03**

### *Histoire et archéologie de la ville et de la mosquée de Mila*

## 1. Introduction :

L'utilisation conjointe des sources écrites et archéologiques s'avère souvent un bon moyen de restituer d'une manière détaillée les édifices et les villes anciens . On peut, par exemple, à l'aide d'un compte de construction, compléter les parties inconnues d'un édifice (parties hautes incomplètes, pans entiers disparus) ou préciser certains détails (présence de vitres et volets aux fenêtres, enduits peints...). L'étude des matériaux (pierre, bois, terre) renseigne sur l'économie du chantier. Dans cette partie de ce chapitre nous avons étudié toutes les sources historiques écrites disponibles et archéologiques possibles (vestiges, édifice, murs et fouilles) à l'intérieur de la vieille ville et à l'intérieur de la mosquée afin de comprendre la mosquée et sa relation historique et archéologique avec la vieille ville de Milev.

### - Situation géographique :

La wilaya de Mila se situe au Nord Est de l'Algérie et occupe une superficie totale de 3480, 45 km<sup>2</sup> soit 0,14 % de la superficie du pays. Le chef-lieu de wilaya est distant de 50 km de Constantine, de 100 km de Jijel et de 450 km de capital Alger, (figure.3.1).

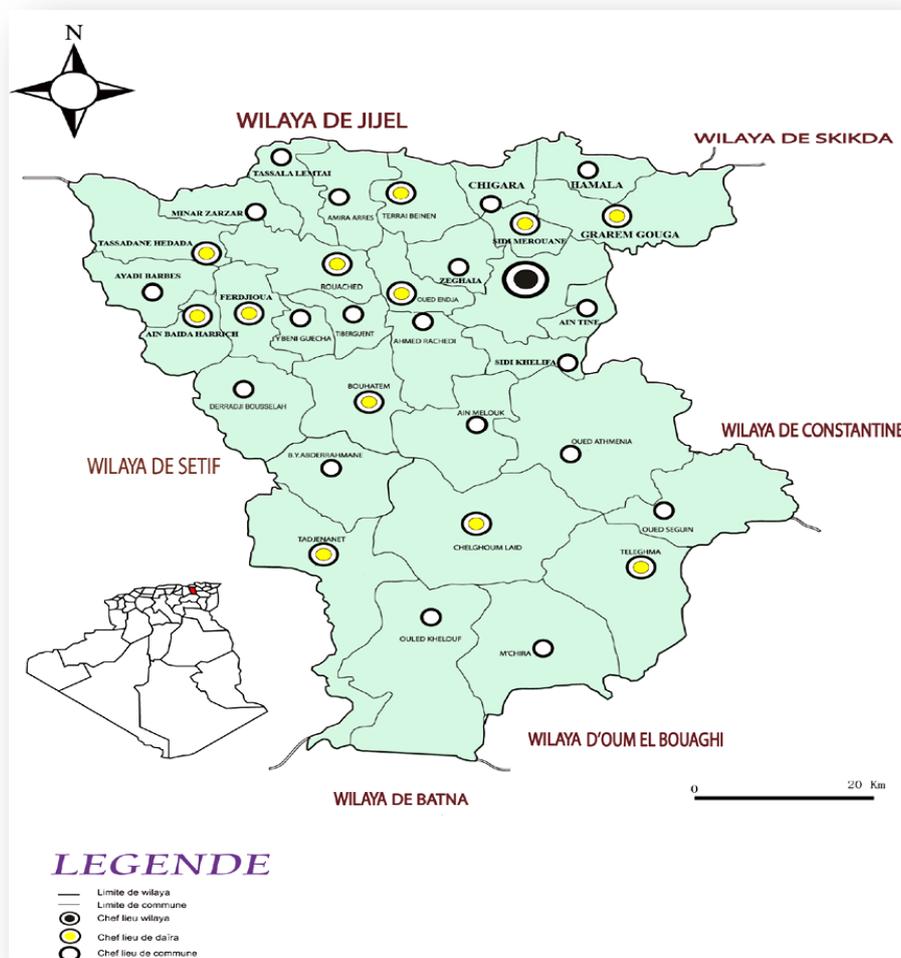


Fig. 3.1 : Carte de situation de la wilaya de Mila.

## 2. Histoire de la ville de Mila :

### 2.1- Origines Des Noms :

*Mila fut une ville importante dans l'antiquité, elle a pris plusieurs noms dans sa longue histoire. La mémoire écrite lui en retient entre autres ceux de :*

- **MILEV** : En langue phénicienne **Mil**, signifie pardon et **Ev** eau, soit le pardon par l'eau ou l'eau du pardon. Ce nom aurait été donné par la fontaine qui existe encore et qui alimente l'ancienne ville de Mila <sup>219</sup>, connue aujourd'hui sous le nom d'Ain El Bled.
- **MILEOU** : nom berbère probablement la **μῆρῶ** de Ptolémée <sup>220</sup>, ou le nom d'une ancienne reine romaine <sup>221</sup>.
- **COLONIA SARN-MILEV** : *Colonia Sarnensis milevitana* le nom complet de Mila à l'époque romaine selon une inscription trouvée à Tiddis épithète *Sarnensis* souvenir du *Sarnus*, un des fleuves qui arrosaient la campagne, s'explique par l'origine même de la colonie qui avait peuplé Mila; fondée par *Publius Sittius* originaire de Nucérie une des villes qu'arrose le Sarnus <sup>222</sup>. Il a formé de Cirta (Constantine), Chullu (Collo), Rusicade (Skikda) et Milev (Mila) ; la confédération des quatre colonies cirtésiennes (*Quattuor coloniae Cirtenses*) <sup>223</sup>.
- **MILEVUM** : paru dans les écritures de saint-optât évêque de Milev, dans ces fameuses lettres contre les donatistes.
- **MILAH** : arabisation du non Milev, non attribué à Mila par les premiers conquérants arabe, qui signifie (*une pomme*) selon le géographe arabe Hassan El Wazzan (Léon africain) <sup>224</sup> ou le (*très beau lieu*) selon Moubarak El Mili <sup>225</sup>.

---

<sup>219</sup> Thépenier, (E), Le Département de Constantine, archéologique et touristique, 1927 page 36.

<sup>220</sup> Tissot, ( Ch.), Exploration scientifique de la Tunisie : Géographie comparée de la province romaine d'Afrique .T02, 1888. Page 406.

<sup>221</sup> احمد توفيق ألمدني كتاب الجزائر مكتبة النهضة المصرية ، القاهرة ، 1982 ص 1 24

<sup>222</sup> Tissot, op cit ,page 407.

<sup>223</sup> Pergolat, les fouilles de Milev R.S.A.C, LVIII, 1927, p64

<sup>224</sup> Toulotte, (A), Géographie de l'Afrique chrétienne R.S.A.C, 1894 P 222

<sup>225</sup> مبارك بن محمد الميلي ، تاريخ الجزائر في القديم والحديث ، ج 1 ، المؤسسة الوطنية للكتاب الجزائر 1983 ، ص <sup>284</sup>

## 2.2 Période Préhistorique :

La stabilisation de l'être humaine dans la région de Mila remonte dans les anciens temps, des objets en Silex taillés trouvés Sur le plateau qui s'étend au nord-ouest de la vieille ville de Mila, qui remonte à la civilisation capétienne <sup>226</sup>.

## 2.3. Période punique et romaine :

L'étude historique de la ville dans la période punique est difficile à cause de l'absence de sources écrites, ainsi que la rareté des preuves archéologiques dans la ville ; les inscriptions sont considérées comme les ressources les plus importantes pour étudier cette période historique <sup>227</sup>.

La découverte plus de 49 inscription Libyque et Punique dans la ville confirme que Mila était une grande ville de la Numidie <sup>228</sup>.

L'histoire nous apprend qu'avant l'année 46 Av J-C, *Manassès*, allié de *Juba* et père d'*Arabion*, régnait sur les territoires de Cirta et de Sitifis; qu'en cette même année, César prit les meilleures terres de ce monarque et les donna en récompense de ses services, à *P. Siltius Nucerinus*, qui les distribua à ses soldats. C'est ainsi que Cirta(Constantine), Chullu (Collo), Rusicade (Skikda) et Milev (Mila, formèrent les quatre colonies Cirtéennes <sup>229</sup>, (figure.3.2).

Le nom de Milev n'apparaît pour la première fois dans l'histoire qu'en 256 dans les écritures des chrétiens, au concile que tint *saint Cyprien* à Carthage, le 1er septembre, et auquel assista *Polianus* évêque de Milev <sup>230</sup>.

En 370 *Saint-Optât* un des pères les plus vénérés de l'église en Afrique, écrivit de Milev ses fameuses lettres contre le Donatisme. En 396 *Sévère*, à son tour occupait le siège épiscopal. Enfin un premier concile fut tenu à Milev même en 402; et un deuxième en 416. Après au moins 30 ans d'épiscopal, au commencement de l'année 426, *Sévère* mourut; le 24 septembre 426 la date ou le *saint Augustin* désigne *Héraclius* pour son successeur. Le nom du nouvel évêque de Milev ne nous est pas connu, et il se trouve une longue lacune jusqu'en 484 ou *Benenatus Milevitanus* est nommé le 114e des évêques de Numidie

---

<sup>226</sup> Vire (C), Notice sur quelques silex taillés trouvés à Mila, R.S.A.C,1893, p 33

<sup>227</sup> محمد صغير غانم معالم التواجد الفنيقي البوني في الجزائر دار الهدى للنشر والتوزيع ، ص. 49-34

<sup>228</sup> Jacquot, L. Monographie archéologique de la région de Mila. Oran 1894. P 6-19

<sup>229</sup> Reboud. (Dr. v.) et Goyt. (A), Excursions archéologiques dans le Environs de Milah et de Constantine, (1878-1879), R.S.A.C, 20,1879-1880. p. 31

<sup>230</sup> Pergolat, op cit, p 64.

Enfin, on voit assister au concile de Constantinople, en 553, et, depuis lors, pour plusieurs siècles, Milev disparaît de la scène <sup>231</sup>.

Bien avant 553, de graves événements s'étaient passés à Milev; la ville avait été détruite sans doute par les mêmes tribus qui, en 259-260, dévastèrent ses campagnes et furent ensuite battues par le légat, *C. Macrinus Decimus* <sup>232</sup>.



Fig.3.2. Table de Peutinger précisant l'emplacement de la colonie de Milev <sup>233</sup>.

#### 2.4 Période vandale :

Après le déclin et la division de l'Empire romain, les vandales traînaient sur le Maghreb et ils ont resté dans la région de l'Est environ un siècle, après que le commandant *Boniface* avoir été incapable de les arrêter et probablement Milev a été soumis par le commandant Vandale *Genséric* Qui a fait de Cirta un centre chargé de surveiller le reste des villes de la région <sup>234</sup>.

<sup>234</sup> Reboud. (Dr. v.) et Goyt. (A),P , op cit., page 32 ;

<sup>232</sup> Jacquot, op cit., page 22.

<sup>233</sup> Gallica, BNF, bibliothèque nationale française.

<sup>234</sup> Thépenier, op cit., page 430.

## 2.5 Période byzantine :

A cause de son importance religieuse et sa position géographique stratégique, en 539 *Solomon*, général de l'empereur *Justinien* chargé pour la seconde fois, de la direction des affaires utilisa les débris de la ville pour la construction d'une forteresse et d'un mur d'enceinte soutenu par quatorze tours de contrôle, (figure.3.3), capable de résister aux attaques des tribus. Cette enceinte renferme les plus importants édifices de la ville romaine <sup>235</sup>.

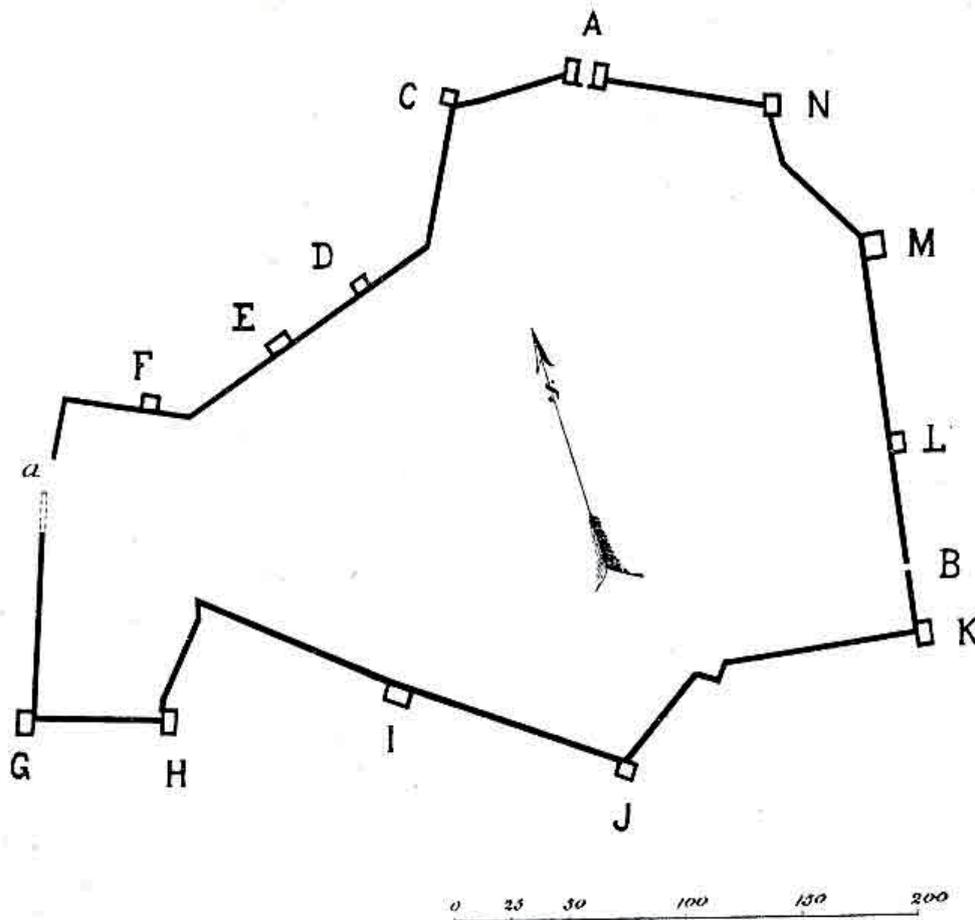


Fig.3.3.La place forte de Mila<sup>236</sup>.

## 2.6 Période musulmane

Les fouteuhates de l'Afrique du Nord était devenue inéluctable et stratégique pour protéger l'empire musulman naissant et surtout répandre l'islam ainsi, après « SHAM » et de la « PERSE » ce fut le tour de l'Egypte puis la Tunisie ou fut établie la ville de Kairouan point de départ des fouteuhates.

<sup>235</sup> Gsell , op cit., page 367.

<sup>236</sup> Gsell, op cit., page 368.

Mila était la première ville d'Algérie conquise par les musulmans par « ABOU MOUHADJER DINAR » en an 55 de l'hégire correspondant à l'année 674, Et a construit la mosquée SIDI GHANEM sur les décombres d'une église. Et s'y installa pendant deux ans en menant les conquêtes à travers les autres territoires<sup>237</sup>.

Vers l'an 902, l'apôtre Chîte, Abou-Abdallah, lieutenant du Mehdi, vint s'établir au milieu des montagnes des Ketama, dans un lieu appelé Ikgen, non loin de Sétif. Après avoir répandu les nouvelles doctrines, il entra en campagne et, à la tête de nombreux berbères réunis à Tazerout, il vint attaquer Milah. La ville fut prise par la trahison, d'un de ses habitants et le gouverneur Moussa ben- Aïesch mis à mort<sup>238</sup>.

Plus tard, pendant la seconde révolte des Ketama, suscitée par Abou-l'Fhem, agent politique des Fatimites, El- Mansour, fils de Bologuine, entra dans leur pays et saccagea Milah et tous les villages Ketamiens qu'il trouva sur son passage<sup>239</sup>.

Milah finit par se relever. Elle est citée par Ibn- Haoukal au X<sup>e</sup> siècle. En 1064, El-Bekri la décrit telle qu'elle existait de son temps. Elle est entourée, dit-il, d'une muraille de pierres autour de laquelle existe un faubourg; elle renferme une mosquée, des bains, des marchés, et tout son territoire est arrosé d'eaux vives. Elle a pour habitants des Arabes, des hommes de la milice et des gens de races mélangées. Elle a une porte appelée Bab-el-Rous, qui regarde l'Orient et tout près de laquelle est la mosquée Djami, où est la maison du gouverneur<sup>240</sup>.

La porte du nord porte le nom de bab el blad. Tout auprès, dans l'intérieur de In ville, est une fontaine appelée Abou-l'Siba, qui est amenée par un canal souterrain de la montagne des Benou-Seroul, le faubourg de Milah renferme plusieurs {bains, etc., etc.

Edrisi, en 1154, après avoir avancé que cette ville n'est éloignée de Constantine que de 18 milles, ajoute qu'elle était autrefois soumise au pouvoir du prince de Bougie, Yahia-ben-EI-Azis (dernier des Hammadides, dépossédé par. Abd-el-Moumen).

A partir du XI<sup>e</sup> siècle, on trouve une nouvelle lacune dans l'histoire de Milah, qui fut, selon les apparences, liée à celle de Constantine<sup>241</sup>.

---

<sup>237</sup> Reboud. (Dr. v.) et Goyt. (A), page 33

<sup>238</sup> Dureau de La Malle, Histoire des Guerres des Romains, des Byzantins et des Vandales, Paris, 1852, pages 214-216

<sup>239</sup> Gsell Stéphane, Les monuments Antiques de l'Algérie, tome 02, Paris 1901, page 365

<sup>240</sup> Tissot, ( Ch.), Géographie comparée de la province romaine d'Afrique R.S.A.C, T02, 1888, page 407

<sup>241</sup> مبارك بن محمد الميلي، تاريخ الجزائر في القديم والحديث، ج 1، المؤسسة الوطنية للكتاب الجزائر 1983، ص 284

Léon l'Africain, en parlant de Méla (Milah), dit : Cet oppidum, placé à 12 milles de Constantine, est entouré de murailles imprenables; il a jadis renfermé 3,000 familles; par le fait de la guerre, les maisons sont plus rares. On y voit un grand nombre d'ouvriers qui fabriquent des étoffes dont on fait des couvertures de lil (Lodices). La fontaine qui coule sur le forum est limpide. Quant aux habitants, ils sont rudes et grossiers, mais très-vigoureux. Les fruits abondent ainsi que les céréales et les troupeaux. Le prince qui règne à Constantine a l'habitude d'envoyer, chaque année, un officier pour rendre la justice et percevoir les impôts; or, il arrive quelquefois que le juge est mis à mort par le peuple <sup>242</sup>.

Pendant la période turque, Milah continue, à recevoir une garnison formée de soldats de la milice. Ces derniers, en épousant des femmes du pays, ont donné naissance à de nombreuses familles de Kourouglis qui existent encore aujourd'hui, et que l'on reconnaît à leurs noms turcs.

### **2.7. La période coloniale.**

En 1837, lors de l'arrivée des Français, le caïd de Milah administrait les tribus des Mouïas et des Beni-Haroun. La ville payait 1,000 boudjous d'impôt. Les indigènes qui labouraient dans la banlieue et les jardins étaient soumis à l'achour et versaient en plus deux charges de paille; les droits du marché appartenaient au caïd.

Milah a toujours été la base d'opération des colonnes qui ont expéditionné dans la Kabylie orientale. Pendant l'insurrection de 1871, la garnison de Milah, composée d'une compagnie d'infanterie et d'un détachement du 3<sup>ème</sup> Tirailleurs, a été vigoureusement attaquée par les Kabyles des montagnes voisines <sup>243</sup>.

---

242 Goy et Reboud, op cit., page 37.

243 مبارك بن محمد الميلي ، تاريخ الجزائر في القديم والحديث ، ج 1 ، المؤسسة الوطنية للكتاب الجزائر 1983 ، ص 24

### 3. Archéologie de la ville de Mila.

La vieille ville de Mila, se situe à quelque centaines de mètres à l'est du chef-lieu de la commune de Mila, sa superficie s'étend sur 70.703,42 m<sup>2</sup>, (figure.3.4).

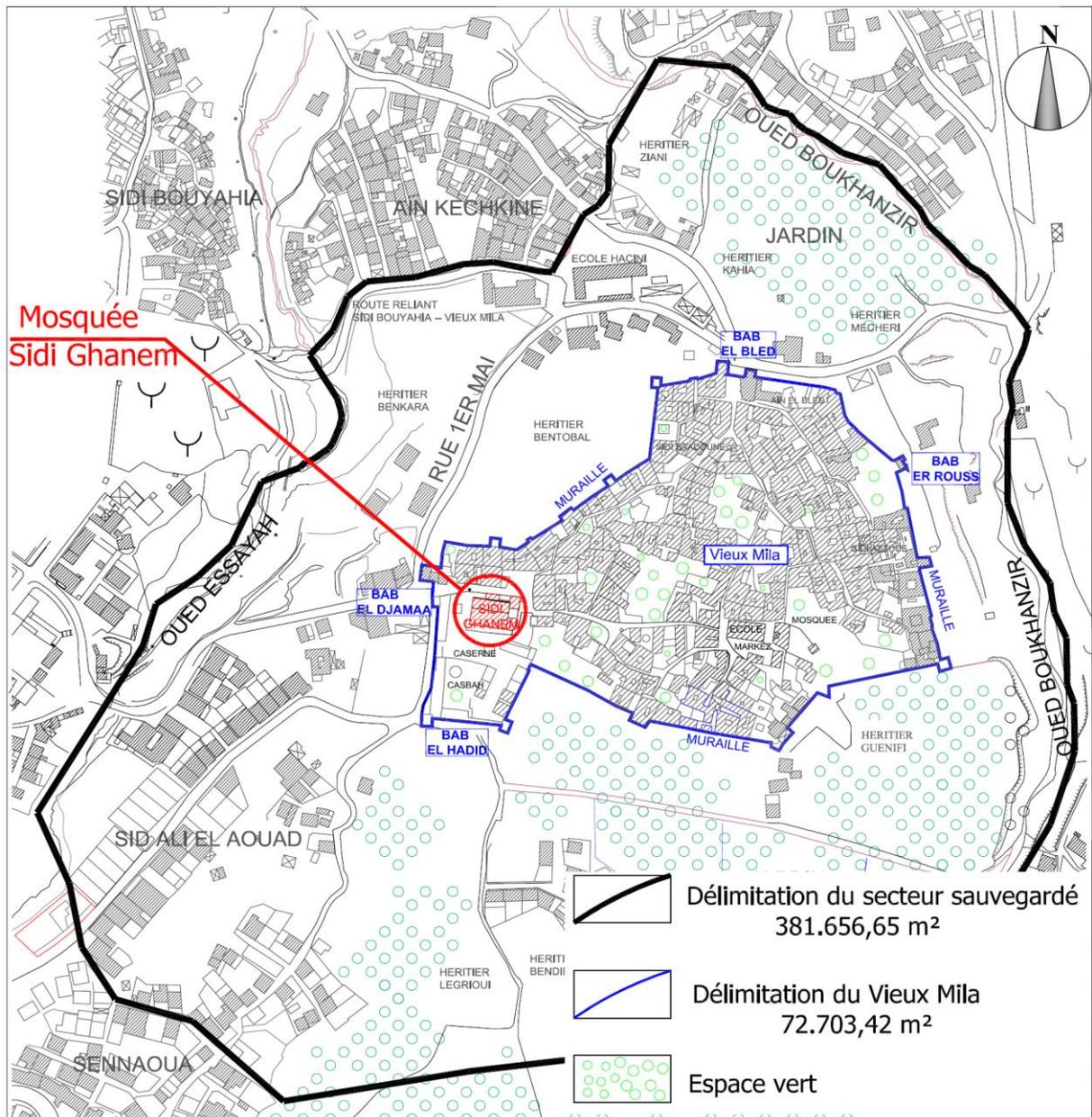


Fig.3.4. Délimitation du vieux Mila <sup>244</sup>.

#### 3.1. Sites Archéologiques et vestiges de la ville de Mila :

La ville possède une vieille casbah toujours ceinte d'un impressionnant mur, figure.3.5, aux 14 tours de guet qui remonte au VI<sup>e</sup> siècle (figure.3.6), elle est classée patrimoine protégé par le ministère de la culture algérien.

<sup>244</sup> Abd Elhamid Badjadja, Bureau d'études art et patrimoine, Constantine 2012,

La ville renferme également de nombreux monuments historiques tels que la fontaine romaine "Ain El Bled", (figure.3.7) et Bab El Bled (figure.3.8), qui remonte à l'époque romaine, la statue "Milo", (figure.3.8), la casbah et ses maisons et ruelles, (figure.3.9) et (3.10), la Zaouia Tidjania (figure.3.11), construite en la fontaine romaine et de nombreux vestiges archéologiques sarcophages, mosaïque, pierre gravée. (Figure.3. 12).ect.....



Fig.3.5.Mur Ouest de l'enceinte byzantine.



Fig.3.6.Tour de guet angle sud-ouest.



Fig.3.7.Fontaine romaine (Ain El Bled).



Fig.3.7.Bab El Bled.



Fig.3.8.Statue de Mlou.



Fig.3.9. Maisons de la casbah.

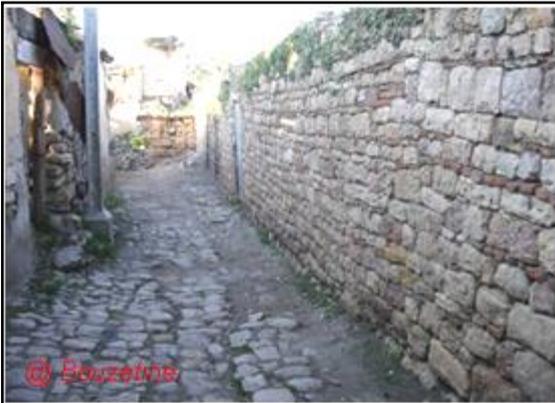


Fig.3.10. Ruelles de la casbah.

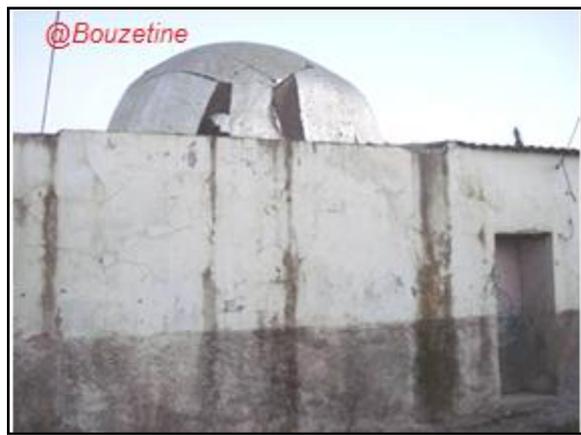


Fig.3.11. Zaouia El Rahmania



Fig.3.12. Quelques vestiges de la ville de Mila.

## 3.2 .Fouilles archéologiques

### 3.2.1 Fouilles archéologiques des années 1979-1880.

A l'ancienne nécropole de Milah font découvrir chaque jour quelques pierres tumulaires plus ou moins bien gravées sur des surfaces à peine dégrossies.

Cette fouille a mis le jour sur huit stèle sur une de ces stèles indique le cognomen de *Sanus*. Cet ethnique rappelle le Sarn-Milev de deux inscriptions de Tiddis. Au milieu des pierres tombales quelques stèles puniques qui présentent d'assez grandes différences avec celles de Constantine, elles offrent l'image de Tanit, la palme, le croissant aux cornes relevées supportant le globe lunaire, principaux symboles du culte de la déesse vénérée à Carthage, elles ne présentent aucune trace d'inscription.

Deux d'entre elles, en tuf blanchâtre et tendre, ont une largeur anormale; des acrotères ornent les parties latérales supérieures ; au milieu, le fronton triangulaire classique.

D'autres fouilles entreprises à l'ouest de la ville, à quelques pas de la porte de la casbah, une statue colossale en marbre blanc a été dégager le piédestal, le soubassement, les murs sur lesquels elle est établie et l'enceinte en pierres de taille, ornées d'un filet, qui semble avoir été le sanctuaire d'un temple<sup>245</sup>, (figure.3.13).

La statue est assise au fond d'une excavation dont les parois mesurent jusqu'à six mètres de haut; la face regarde l'Est. Elle forme, avec le piédestal et le soubassement, un monolithe de 2m94 de hauteur. La partie supérieure est fruste; la tête manque ainsi que les bras.

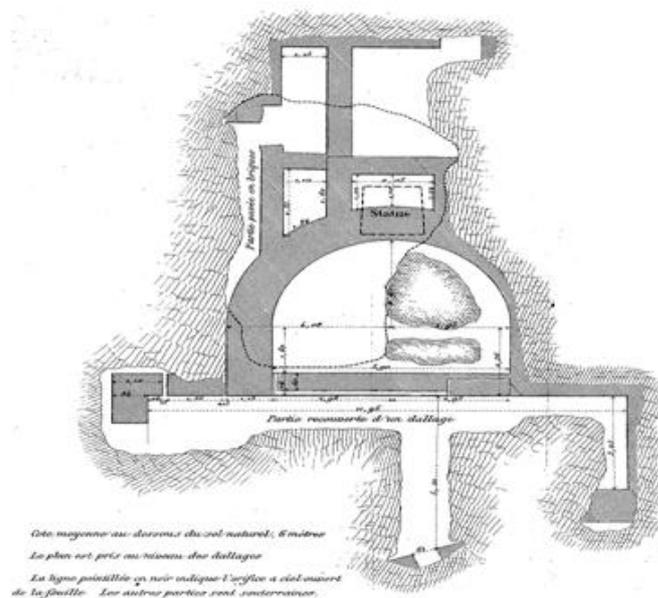


Fig.3.13.Plan du temple de Mila<sup>246</sup>.

<sup>245</sup>Dr V. Reboud et A. GOYT, op cit., page 194.

<sup>246</sup>Dr V. Reboud et A. GOYT, op cité., page 336.

### 3.2.2 Fouilles archéologiques des années 1926.

Au cours de ces recherches, une porte monumentale, englobée dans le mur d'enceinte et à quelques mètres de la statue trouvée en 1880, un sondage a été effectué au bas; un dallage intact fut mis à jour à 5 mètres de profondeur et un arc tétrapyle. Le sommet seul émergeait, les 4 arcs se dessinaient au-dessous de leur naissance et en-dedans se trouvait un remplissage de terre et de divers matériaux jetés pêle-mêle.

A cet une large tranchée sur a été creuser tout son pourtour jusqu'au sol de tuf sur lequel il repose.

Cet édifice attenant au mur Byzantin et y formant le bastion Nord fut sans doute construit à la même époque (539) par les soldats de Solomon qui avait, succédé à Bélisaire pour le rétablissement' de la puissance romaine dans les Provinces d'Afrique. Sa base est formée, sur son pourtour, de six rangs d'assises en retrait les unes des autres. Au-dessus sont construits les quatre pieds droits, sur lesquels ont été élevées les voûtes. A l'angle Nord-Est On un petit édicule rond, véritable tour de guet. Cet édicule semble un ancêtre de la poivrière médiévale.

L'irrégularité de la construction saute aux yeux et caractérise l'époque Byzantine où les pierres sont posées sans se préoccuper des dimensions ni du sens du lit de carrière.

Les voussoirs de 3 arcs sont faits pareillement. On a taillé les pierres de manière à pouvoir former les cintres et elles ont été ajustées tant bien que mal; travail hâtif qui a amené l'écroulement de l'Arc Nord, qui a été reconstruit à une époque plus récente, probablement sous la domination Turque.

La face Sud qui est encastrée dans le mur Byzantin formait une porte d'accès dans la cité. Mais cette ouverture, jugée trop large, à une époque où peut être la garnison se trouvait réduite pour un motif quelconque, fut restreinte pour ne permettre que le passage d'un homme de front ; au moyen d'une poterne de 0,98 de large sur 1,40 de haut seulement. Le seuil de cette poterne est formé de 3 marches.

Le remplissage en maçonnerie qui comblait les arcs, ne peut être attribué à l'époque Byzantine, mais bien postérieurement, vraisemblablement à l'époque Turque où cette voie de communication avait été complètement condamnée.

Ce qui démontre en outre que cet arc tétrapyle est de basse époque c'est qu'il a été édifié sur une nécropole Romaine datant des III et IVe siècles de notre ère. Ce sondage a permis de mettre à jour des tombes intéressantes.

Dans la partie explorée de cette nécropole, toutes les tombes renfermaient des petits sarcophages à incinération, dont un pu être conservé intact. Les débris osseux étaient en parfait état de conservation <sup>247</sup>.

---

<sup>247</sup> Pergola, op cit., page 80.

### 3.2.3 Fouilles archéologiques des années 1957 :

Ces fouilles ont été effectuées à la place du « Markès » (figure.3.14), le 17 Juin 1957 par Jean LASSUS, cette surface rectangulaire est la seule surface libre à l'intérieur de l'enceinte ; au début le sondage mesurait 5 par 7 mètres, il est rapidement réduit à cause de la présence d'un dallage, (figure.3.15).

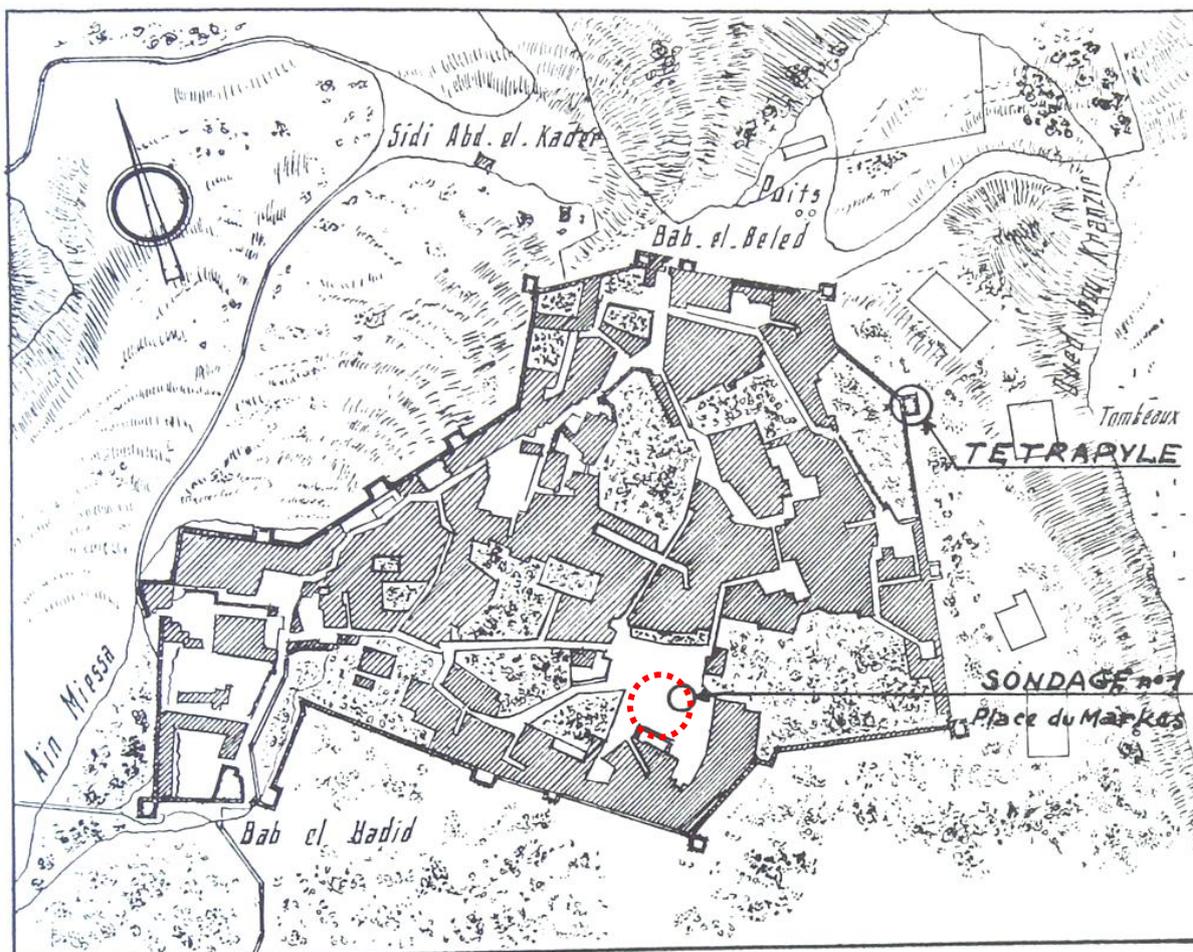


Fig.3.14. Milla Croquis du plan de la vieille ville d'après Delamare <sup>248</sup>.

- A 1,6 mètre la première stratification apparaît, il s'agit des restes d'un robuste dallage fait de blocs de réemploi vers l'angle est-ouest apparaît une suite à ce dallage, il s'agit d'un mur, grossièrement construit de blocs superposés mal joint et de taille très irrégulière. A l'est du sondage un autre mur beaucoup mieux construit vient d'apparaître très antérieure au dallage, le remblai entre ces deux murs contient des fragments de tessons céramiques de la poterie locale contemporaine.
- A 1,8 mètre, la présence d'un robuste dallage cimenté peut être contemporaine au premier dallage.

<sup>248</sup> Delamare Ad.H.Al, exploration scientifique de l'Algérie 1840, Paris, page 78.

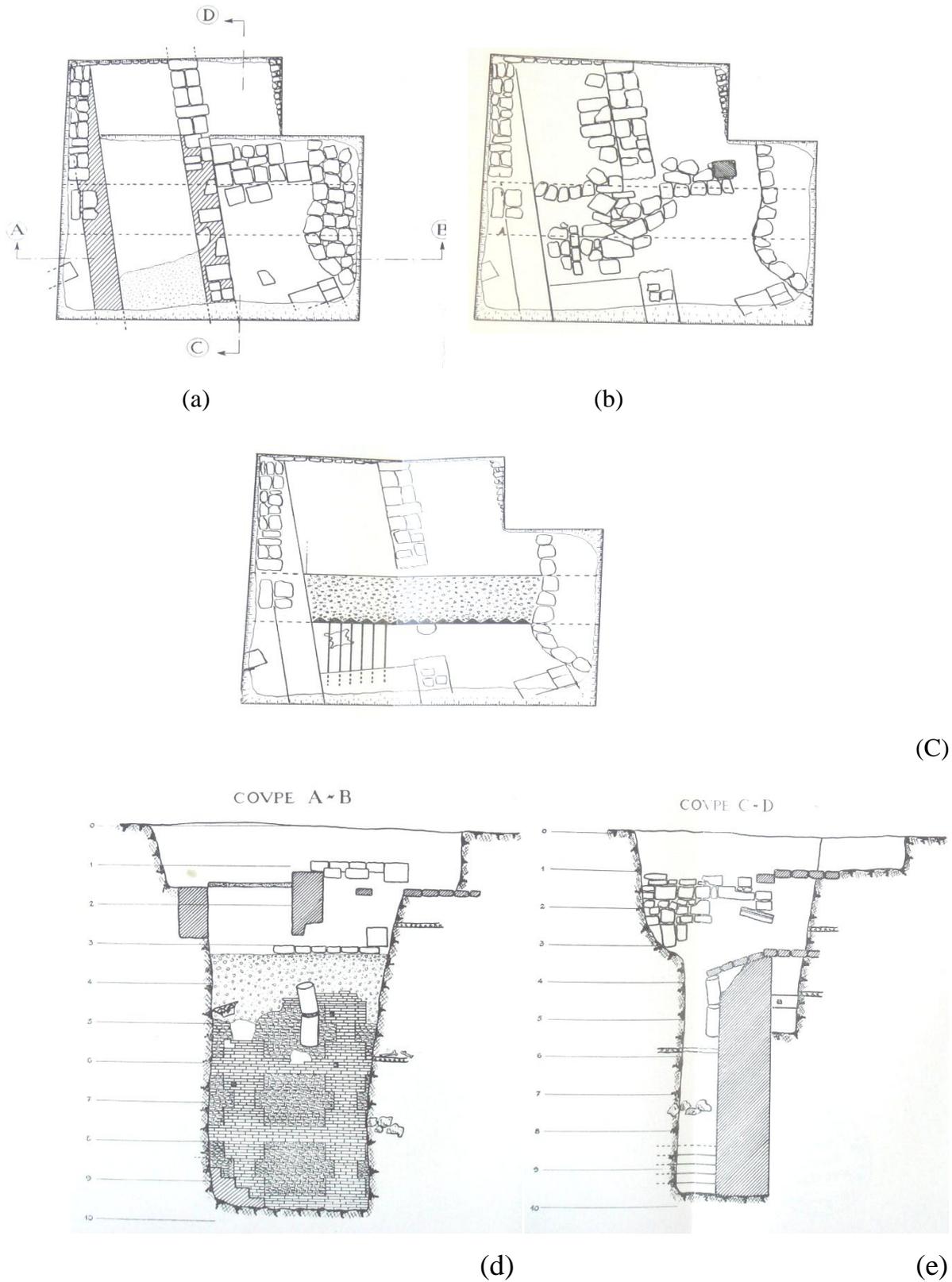


Fig.3.15 : (a) plan de fouille à 1 mètre ; (b) plan de fouille à 3 mètres ; (c) plan de fouille à 8 mètres ;(d) coupe A-B de la fouille ;(e) coupe C-D de la fouille <sup>249</sup>.

<sup>249</sup> Lassus, op cit., page 267.

- Vers -2,40 mètres, une couche d'incendie, à peu près continue dans la surface du sondage. La poterie retrouvée conserve un caractère local récent.
- Vers -3,00 mètres, dans la partie Est de la fouille à un Nouveau dallage ; autour d'une assez belle dalle se trouvent placés d'autres blocs plus petits. Le mur central paraît postérieur à ce dallage-les fondations de sa partie centrale s'arrêtent à un niveau supérieur ; au Nord et au Sud, elles cessent vers -3,20. Le mur Est fait de moellons relativement homogènes, continue régulièrement.
- Vers -3,80 mètres, dans la partie Ouest de la fouille un bloc de ciment, dont la suite des fouilles révélera qu'il représente la partie supérieure conservée d'un logement d'un énorme mur d'époque romaine, qui traverse le sondage dans sa longueur, à 40 cm face Sud.

A ce niveau se trouve :

Une poterie tournée commune, de pâte sèche, généralement de couleur brique à l'intérieur- et complètement grise dans les parties minces, plus parfaitement cuites. D'autres tessons sont au contraire de couleur brique à l'extérieur, gris à l'intérieur. Parfois cette poterie de la couleur brique, parfaitement cuit, a la tranche de couleur homogène, se trouve parfois des dessins au trait, séries de raies parallèles droites, ou en forme de sinusoire et des traces d'engobe jaunâtre, quelques tessons ont reçu un engobe rosé, d'autres sont d'une terre verdâtre. Un beau fragment de plat vernissé confirme dans l'idée que ces remblais se sont accumulés pendant le moyen âge. La même conclusion résulte de la trouvaille d'un carré de céramique vernissée bleu ciel (cote -6,30 mètres).

- la poterie antique est représentée par une lampe ronde, tardive, et deux tessons de terre rouge, d'époque byzantine.
- Une monnaie a été trouvée à la cote -3,20, au-dessus du dallage.
- Une autre à la cote -3,60, au-dessous du dallage (cf. p. 320).
- A - 4,70. Contre le mur romain, reste d'un chapiteau byzantin à quatre feuilles.
- A - 5,85. Couche de cendres, mêlée à de la terre très humide. Dans cette couche, qui s'étend sur l'ensemble de la fouille, se trouve des fragments de métal et des ossements de bovidés. Les tessons deviennent de plus en plus rares.
- A -8,20 mètres. Tessons romains, mêlés à des tessons arabes médiévaux.
- A 8,50 mètres. La proportion de tessons romains s'accroît lorsqu'on descend, mais il reste des tessons beaucoup plus tardifs. Les fragments de marbre sont aussi de plus en plus nombreux : ils ont appartenu à un décor en opus sectile : les couleurs les plus

fréquentes sont : blanc et rose ; blanc veiné de noir ; blanc veiné de vert ; blanc rose et rouge ; jaune ; noir. Les épaisseurs varient de 1 cm, 2,5 à 3 cm.

- A 8,75 mètres. Couche de briques, fragment de tuiles plates et arrondies, mêlées à des tessons romains, dont certains d'excellente qualité ; on retrouve encore des tessons de poterie peinte.
- A 9,00 mètres. Tessons romains avec déco à la barbotine et à la roulette, mêlés à de la poterie grossière, en terre rouge, avec engobe blanc à l'extérieur et ondulations intérieures. Un tesson de poterie peinte. Plusieurs fragments de marbre.
- A 9,40 mètres dans l'Est de la tranchée, on met à jour six marches, qui descendent d'est en ouest parallèlement au mur, elles ont 0,25 mètres de hauteur pour 0,35 mètres de largeur, et se prolongent vers le Nord au-delà de la limite de la tranchée, soit sur plus d'un mètre, les marches sont monolithes.
- A 9,70 Font de la fouille.

#### Conclusion de la fouille

Le mur romain dont une partie a été mise à jour par sondage est d'une masse et d'une qualité assez impressionnante. Il est orienté du Sud-est au Nord-Ouest à peu près parallèlement, au mur de la mosquée comme au mur de l'immeuble que quelques-uns au mois des murs modernes de la ville reprennent les directions antiques, ou même se servent des murs antiques comme fondation. Ici, le mur a été effacé du plan de la ville à une époque assez ancienne, lorsqu'il fut recouvert par le dallage que nous avons en partie retrouvé au niveau- 3,00 mètres. Les murs contemporains de ce dallage, ou postérieurs, n'ont que de vagues rapports avec l'orientation primitive.

Ainsi ce sondage a conduit à d'importantes conclusions.

- 1) La place de Markés actuelle semble avoir été occupée par des édifices, à toutes les époques de l'histoire de la cité, sauf l'époque contemporaine.
- 2) Deux niveaux sont fortement marqués (- 1,00 -3,00) mètres par des dallages de pierres, robustes quoique faits de matériaux de remploi.

Trois autres niveaux d'habitation (-2,40, -4,20,- 5,70) sont attestés par des couches de cendre trace des incendies qui les ont ravagés<sup>250</sup>.

---

<sup>250</sup> LASSUS, op cit, pages 120-132

3) Le sol romain est recouvert par 9,70 mètres de remblais successifs.

L'époque romaine a laissé un énorme mur, épais de 0,50 mètres et conservé sur une hauteur de 6,50 mètres, ce mur, construit en béton, avec un revêtement de moellon et de briques complexe et soigneusement exécuté, donne une haute idée des édifices de l'antique Mileu et de sa prospérité.

4) Le niveau byzantin n'a pas été identifié avec certitude. Il ne paraît pas impossible qu'il ait été représenté par le dallage situé à la cote - 3,00, et qui recouvre les restes du mur romain abandonné. Peut-être est-il signalé seulement par la couche de cendre de -5,70 mètres.

Il faut signaler aussi que : la céramique musulmane émaillée a été repérée au niveau de 1,60 mètre et un fragment de bol, terre blanc crème identique à celui trouvé par George Marçais (Béni Hammad) planche. Sans oublier les pièces de monnaies musulmanes en bronze corrodées et d'inscription coufique arrondies entre les niveaux (2,80 et 3,60) mètres.

#### **4. Archéologie de la mosquée de sidi Ghanem.**

##### **4.1 Description de la mosquée de Sidi Ghanem**

La mosquée de sidi Ghanem est estimée comme la plus vieille mosquée en Algérie se situe au cœur de la Médina (ancienne ville de Mila), à l'intérieur de l'enceinte byzantine, elle renferme dans et sous ses murs le témoignage de plusieurs époques de la vie de la cité de Mila, son emplacement a été révélé par les fouilles archéologiques faites en 1968-1970,

La mosquée de sidi Ghanem est un édifice de moyen âge, ce monument a connu des transformations importantes et pendant l'occupation française son minaret fut abattu. La partie réservée à la prière fut transformée en caserne et puis plus tard en hôpital et puis en caserne. Les toitures de l'édifice furent remplacées par une toiture en tuiles modernes qui fausse l'identité du monument et lui offre un aspect extérieur trompeur, (figure.3.16) Et (figure.3.17)



Fig.3.16.Les modifications qui à subit la mosquée pendant l'occupation française.



Fig.3.17.Vue intérieure et extérieure de la salle de prière de la mosquée de Sidi Ghanem.

La mosquée de Sidi Ghanem montre une très grande diversité de matériaux de construction ; on voit, dans les soubassements des murs de grosses pierres de taille calcaires de plusieurs types : des colonnes et des chapiteaux de réutilisation de différentes époques en marbre et en calcaire de différents types et couleurs, des arcades en briques supportent des murs en *toub* (terre crue séchée). La réutilisation systématique de matériaux implique un certain éclectisme des textures (figure.3.18).

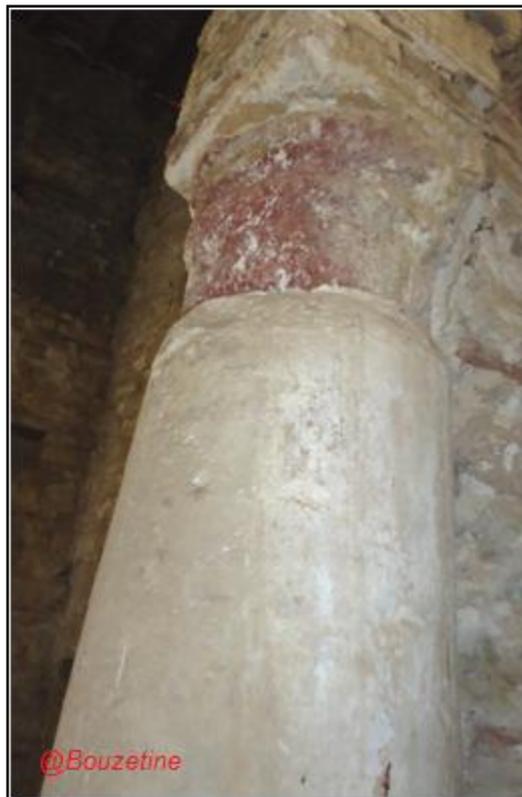


Fig.3.18.Diversité des matériaux de réemploi : colonne en marbre blanc avec un chapiteau en marbre rouge.

### a) La salle de prière :

Le plan de la salle de prière est de hypostyle, plus large que profond organisé en six nefs et huit travées figure III.18. Couvrant une surface d'environ 475 m<sup>2</sup>. Le mur fondation côté Sud est un mur antique en bloc de calcaire parfaitement équarris et bosselés sur leurs faces (figure.3.19).

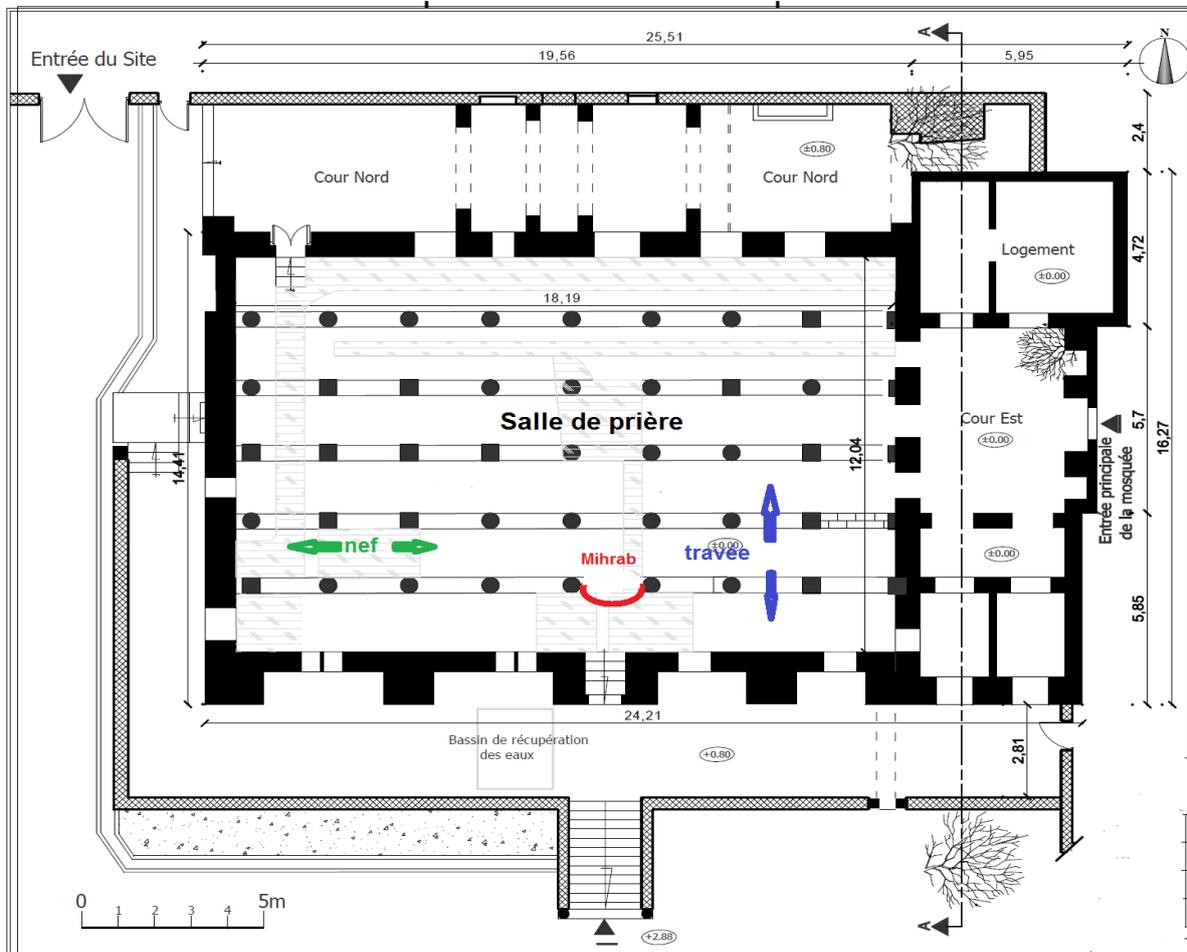


Fig.3.19. Plan de masse de la salle de prière<sup>251</sup>.

Les quatre murs de la salle sont construits par le réemploi des grosse pierres calcaires, le mur nord de l'édifice comporte une série de portes bouchées ces porte ont été fermée à l'époque française .Les murs sud et ouest été réalisés en moellons et reposent eux-mêmes sur base antique.

Une fondation semi-circulaire jouxte le mur antique à hauteur de l'axe central de la salle, cette fondation par sa forme et sa position et surtout sa position ne peut être que celle de Mihrab, (figure.3.20).

<sup>251</sup> Abd Elhamid Badjadja, op cit.,page 3,



Fig.3.20: La position du Mihrab

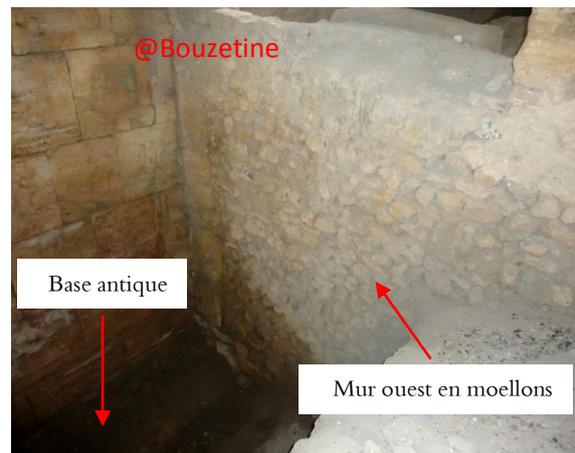


Fig.3.2.Figure mur sud antique mur ouest en moellon

Les colonnes reposent sur des monolithes de calcaires récupérés de formes diverses plus ou moins allongées, superposées sur une base antique dalle en schiste très dur jusqu'à atteindre le niveau de la mosquée, c'est-à-dire sur une hauteur de trois mètres environ, (figure 3.2), (figure.3.22) et (figure.3.23).

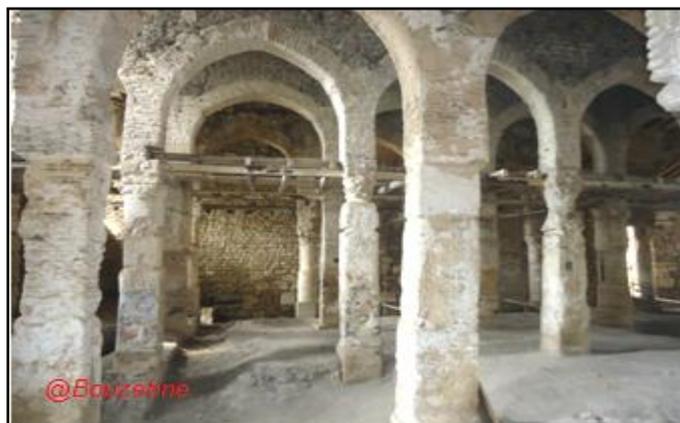


Fig.3.22.Disposition des colonnes.



Fig.3.23.Disposition des colonnes.

Il y a une grande diversité de colonnes, de chapiteaux et d'embases. Cette pratique de récupération est typique des mosquées primitives érigées sur des territoires conquis aux Byzantins, (figure.3.24).



Fig.3.24. Exemple de chapiteaux coiffant les colonnes.

Les arcades ont été réalisées en briques sous la forme d'arcs outrepassés au sommet brisé ou arc à cheval, (figure.3.25). Ces arcs d'origine probablement sassanide imposeront leurs lignes dans tout le Maghreb et serviront de modèle aussi bien pour les constructions d'édifices de culte ou de pouvoir que pour les maisons d'habitation.

Les colonnes et les chapiteaux,, sont de remploi. Ils ne proviennent pas des mêmes édifices, ils n'ont donc pas la même hauteur, d'où un jeu sur la hauteur des bases pour harmoniser l'ensemble.



Fig.3.25.Les arcades outrepassés et brisé.

La façade principale est aménagée dans le mur Est de la cour d'entrée. Elle consiste en une porte surmontée d'un arc surhaussé occupant la partie centrale et de deux portes plus petites et plus basses situées de part et d'autre ; Ces portes sont coiffées de panneaux. Une corniche recouverte de tuiles venait couronner l'ensemble.

#### **b- Le Minaret**

On raconte qu'il contient 365marches le nombre des jours de l'année, et que du sommet du de ce minaret on aperçoit la ville de Constantine. Mais ce minaret a été détruit par les français et ses pierres ont été utilisées dans la construction d'une église au centre-ville, (figure 3.26).

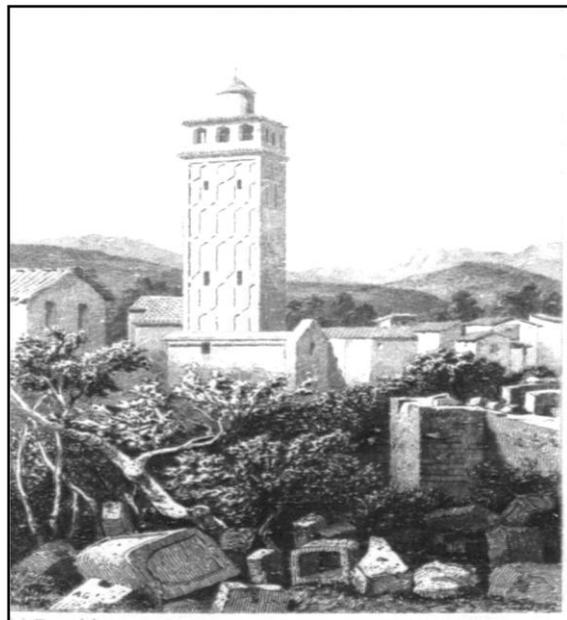


Fig.3.26. Minaret de la mosquée de Sidi Ghanem<sup>252</sup>.

---

<sup>252</sup>Delamare Ad.H.Al, op cit., page 109.

## **4.2 Campagne de fouilles archéologiques de 1968, 1969 et 1970:**

Ces fouilles archéologiques ont été réalisées par, DOUKALI Rachid attaché de recherche et directeur des fouilles au service des antiquités d'Alger. Ces fouilles sont déroulées en plusieurs étapes étalées sur trois années 1968, 1969 et 1970 ce qui a permis d'effectuer plusieurs sondages à l'intérieur et à l'extérieur de la mosquée, ils sont réparties comme suit :

**4.2.1. Première campagne de fouilles (1968) :** à l'intérieur de la salle hypostyle (salle de prière)

### **Sondage A :**

Ce sondage a été pratiqué en le mur nord et les colonnes D1 et E1, poursuivi jusqu'à une profondeur de 3 mètres, (figure.3.27), ce qui a permis de déterminer le niveau de la porte d'entrée, (figure.3.28), le long de la paroi Nord- Ouest un mur parallèle au mur Nord a été mis à jour. C'est sur ce mur que reposent les bases des colonnes D1 et E1, ce dernier est constitué de moellons avec une épaisseur de 1,20 mètre ainsi qu'un contrefort mesurant 1,20 x 1,20 mètre moyen appareil sensiblement sur l'axe de la colonne B1 est apparu, s'appuyant sur le mur en moellons. Le mur en moellons se reposait sur des grosses dalles en schiste, ce sondage est arrêté au niveau de ces dalles, ce qui est peut être appartenant à une voie, (figure.3.29).

L'étude stratigraphique des couches successives de ce sondage permet de faire les conclusions suivantes :

*« Le mur en moellons, son contrefort et le seuil de la porte plaquée sur le mur Nord, sont d'époque médiévale »*<sup>253</sup>

### **Sondage B :**

Il a été pratiqué entre les colonnes C2, C3, D2, D3, (figure.3.30), il était pour objectif de retrouver les différents niveaux de sol repérés dans le sondage A, voir quels peuvent être les soubassements des quatre colonnes. Ce sondage a fait apparaître à 60 cm, un sol de chaux qui correspond au niveau du seuil de la porte étudiée dans le sondage A, il s'agit d'un état ancien de la mosquée, déterminé à ce jour. L'étude des couches stratigraphiques a montré la présence de couches d'époque médiévale sous ce sol. A 2,9 mètres du sommet du sondage, nous sommes toujours en présence de céramique d'époque arabe d'autre part, à 70 cm sous ce sol de chaux, une monnaie arabe a été trouvée. *« Il s'agit d'une pièce de bronze avec inscription centrale en caractères coufique »*<sup>254</sup>. Même type de monnaie trouvée lors des fouilles de 1956 sur la place des Merkez.

---

<sup>253</sup>DOUKALI Rachid, rapport de fouille du 30 novembre 1968, service des antiquités, Alger, page3.

<sup>254</sup>DOUKALI, op cit, page 4.

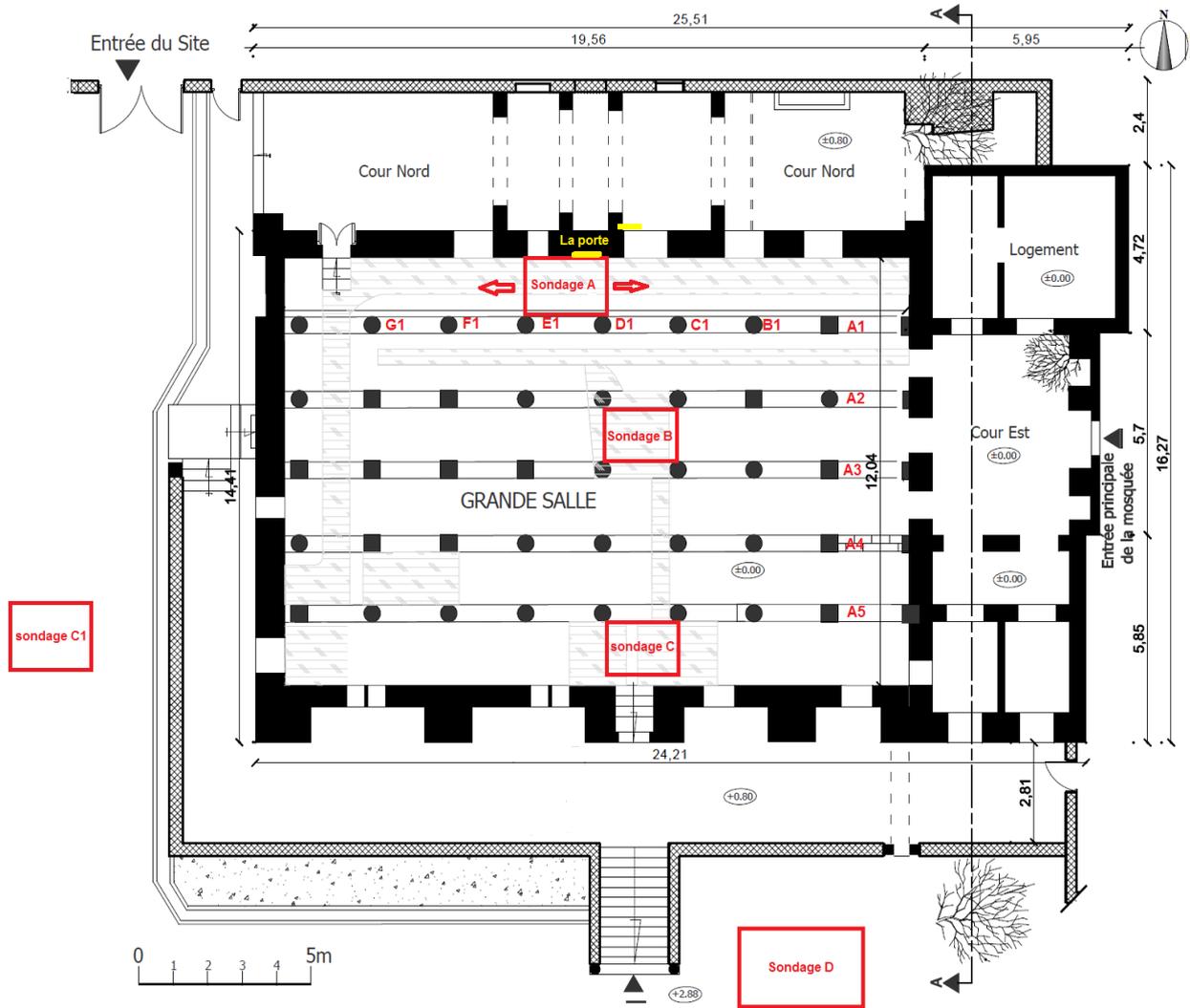


Fig.3.27.Emplacement des sondages (par l'auteur).

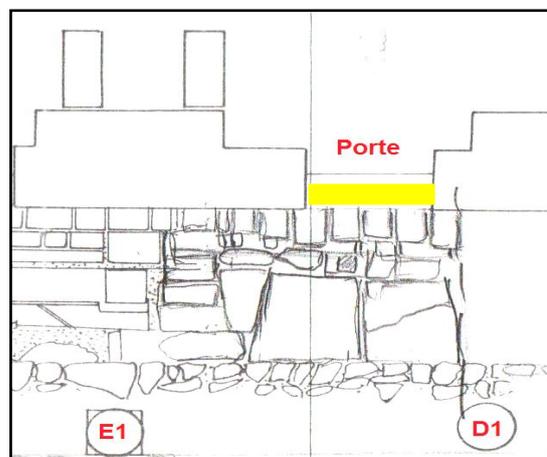


Fig.3.28.Détail du sondage A.

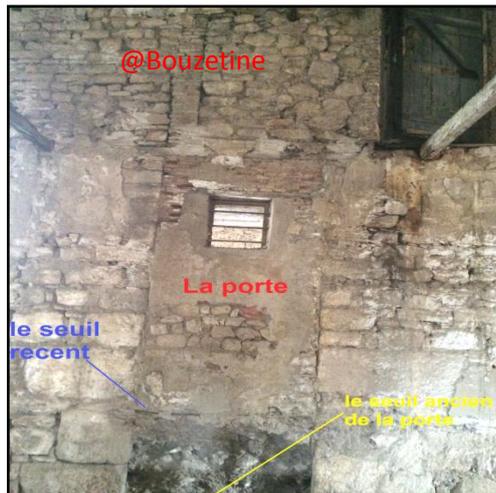


Fig.3.29.La porte d'entrée avec le ancien seuil et le seuil à l'époque coloniale.

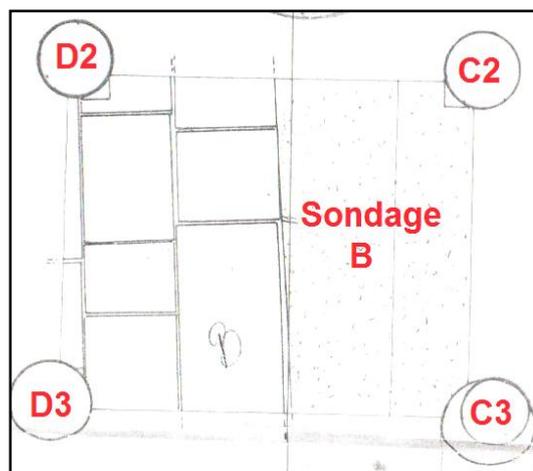


Fig.3.30.Détail du sondage B.

#### 4.2.2 Deuxième campagne de fouille (1969):

Cette deuxième campagne à été réalisée aussi par DOUKALI Rachid, elle est composée de deux sondages, le sondage C à l'intérieur de la salle de prière et le sondage D à l'extérieur ainsi que l'élargissement des deux sondages précédent A et B.

##### Le sondage A:

L'élargissement du sondage a permis de constater la continuation du dallage et du mur en moellons, (figure.3.31). Par ailleurs, il a été pratiqué à l'enlèvement d'une dalle pour permettre la continuation du sondage ce qui permet de trouver un canal de tesson de poterie sous la dalle, ce canal et probablement un canal « *d'égout qui passait sous le dallage* ».

### **Le sondage B:**

Le sondage à été poursuivi. A 2,90 mètre au niveau supérieur du sondage, montre la présence de grosses dalles analogues à celles rencontrées dans le sondage A, les colonnes C2 et C3 reposent sur ce dallage. Ayant les mêmes caractéristiques, ces dalles du sondage B font partie du même dallage que celles trouvées dans le sondage A. il est évident que l'on se trouve en présence d'un dallage sinon d'une place publique du moins d'un pari d'un édifice « *peut être un temple* », (figure.3.32).

### **Le sondage C:**

Le sondage C a été pratiqué entre le mur antique et le mur Sud de la mosquée, s'appuyant sur le mur extérieur du mihrab et le mur en moellons, perpendiculaire au mur du mihrab, le but de ce sondage est d'étudier des murs extérieurs du mihrab, qui sont recouverts d'enduit de chaux, de les mettre en relation avec le mur antique dans lequel est ouvert le mihrab. Ce sondage mesure 3,20 X 3 mètres. A 45 cm du niveau supérieur du sondage un sol de chaux est apparu qui semble correspondre avec le sol de chaux repéré à la base du mihrab, (figure.3.33).

Ce sondage a été continué sur le sol de chaux à 1,50 mètre, du niveau supérieur du sondage, un dallage en calcaire est apparu, les dalles n'étaient pas aussi grande qu'elles l'étaient dans le sondage A et B, ce dallage appartient probablement à la période antique, mais ne faisait pas partie du même niveau de sol que celui des sondages A et B, placé à 1 mètre plus bas dans la salle de prière.

### **Le sondage D :**

Le sondage D a été fait à l'extérieur du monument au sud du Mihrab et dans son axe Nord-Sud. Le sondage se situe sur l'espace plat, situé entre le monument est un des côtés de l'enceinte byzantine. Il était pour but de retrouver certains habitats de la ville médiévale de Mila et de les mettre en relation avec la mosquée. Ce sondage mesurait 10X10 mètres, La partie supérieure du terrain fouillée était composée de terres de remblais, la profondeur à étaient de 2,0 mètres sans la présence de couches archéologiques bien définie.

*« le nettoyage de la salle de prière à fait apparaitre à proximité du mur antique des éléments de décors sur plâtre identique à celle trouver par Golvin dans la Kalaa des Bani Hammad, et surtout de ce qui est important , des éléments d'une grande inscription arabe style coufique sur plâtre, c'est un élément essentiel intéressant pour l'étude et la datation de ce monument»<sup>255</sup>.*

---

<sup>255</sup> DOUKALI Rachid, op cit., page.6

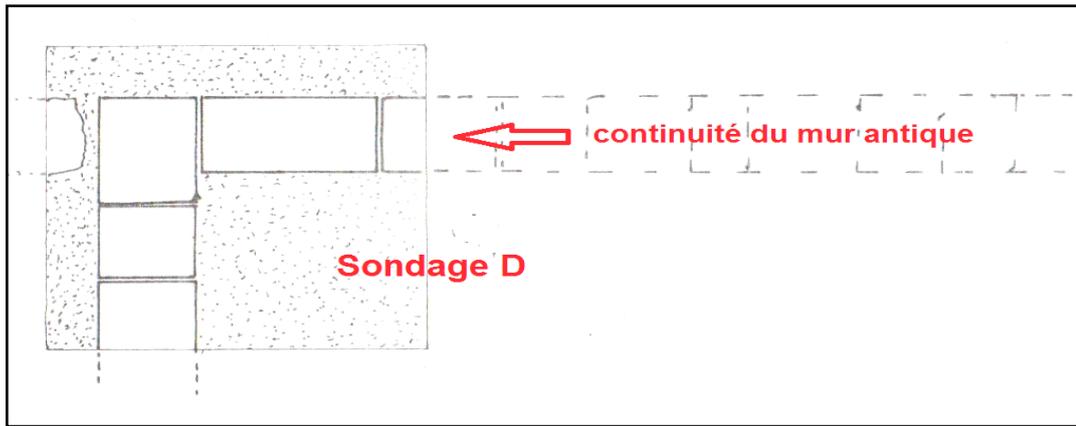
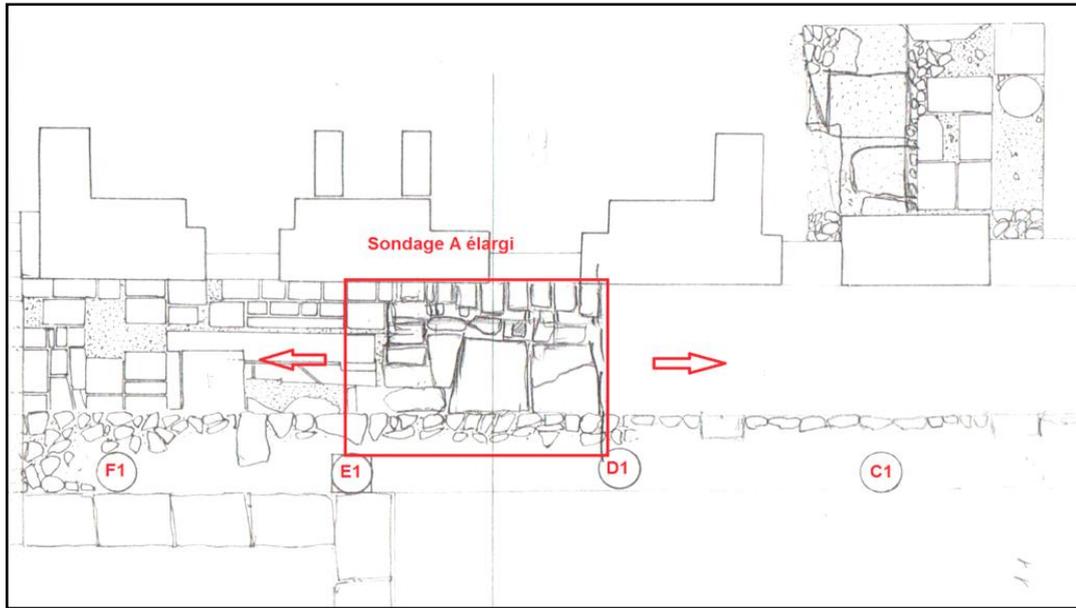


Fig.3.32.Reprise du sondage B.

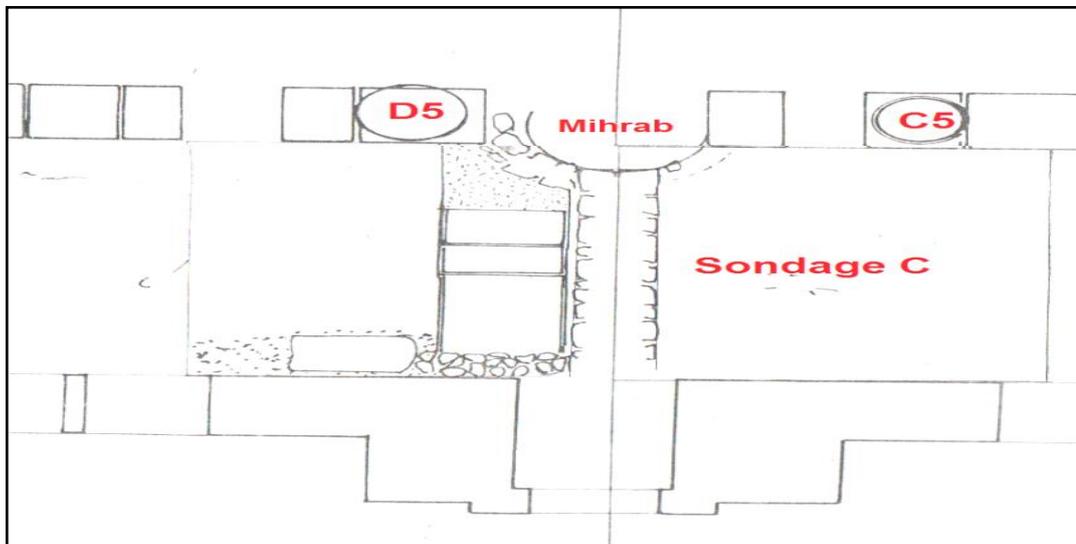


Fig.3.33.Révélation du mihrab au sondage C.

#### **4.2.3 Troisième campagne de fouilles (1970) :**

Cette troisième et dernière campagne de fouilles a été réalisée par DOUKALI Rachid, le sondage D à été repris et les sondages A et C ont été élargie.

##### **Le sondage A :**

Le sondage A à été élargie jusqu'au mur Est du monument, ce qui à permis de constater la continuité du dallage et le mur en moellons.

D'autre part, la continuation du sondage vers l'Ouest a fait apparaitre un élément nouveau. le mur en moellons s'arrête sous la colonne G1 et forme angle droit avec l'autre mur en moellons qui passe sous les colonnes G2, G3 et G4.

##### **Le sondage C :**

Ce sondage a été agrandi et un autre carré C2 a été ouvert de l'autre côté du mur en moellons. La stratigraphie est analogue à celle du carré C1. A 45 cm du niveau supérieur du sondage du sol de chaux est apparu ; le même sol que celui repéré à la base du mihrab. de même à 1,5 mètre du niveau supérieur du sondage, nous avons le même dallage en calcaire, de l'époque antique identique à celui du carré C1 du même sondage

##### **Le sondage D :**

La partie supérieure du terrain fouillé était composé de terres remblais. Le sondage D à été poursuivi ; le carré C1 du sondage et à 2 mètres du niveau supérieur, est apparu une construction en briques, s'adosent contre le mur Est du carré. Les briques sont en assises circulaire superposées les unes sur les autres.

Les éléments de décor en stuc sont venu s'ajouter à ceux trouvées à proximité du mur est du monument identiques à ceux trouvés à la Qala'a des Banu Hammad Golvin.

## 5 . Conclusion

La recherche historique sur l'ancienne ville de Mila nous apprend que la stabilisation de l'être humaine dans la région de Mila remonte dans les anciens temps, elle était le parcours de plusieurs civilisations, passant de l'homme préhistorique de Machta El Arbi et les objets en Silex taillés trouvés sur le plateau qui s'étend au nord-ouest de la vieille ville de Mila, qui remonte à la civilisation capétienne, à la période antique ou la découverte de plus de 49 inscriptions Libyque et Punique dans la ville qui confirme que Mila était une grande ville de la Numidie, en 46 Av J-C, *Manassès*, allié de *Juba* et père d'*Arabion*, régnait sur les territoires de Cirta et de Sitifis; qu'en cette même année, César prit les meilleures terres de ce monarque et les donna, en récompense de ses services, à *P. Siltius Nucérinus*, qui les distribua à ses soldats. C'est ainsi que Cirta (Constantine), Chullu (Collo), Rusicade (Skikda) et Milev (Mila, formèrent les quatre colonies Cirtéennes. Le nom de Milev n'apparaît pour la première fois dans l'histoire qu'en 256 dans les écritures des chrétiens, au concile que tint *saint Cyprien* à Carthage, le 1er septembre, et auquel assista *Polianus* évêque de Milev.

Après le déclin et la division de l'Empire romain, les vandales traînaient sur le Maghreb et ils ont resté dans la région de l'Est environ un siècle, après que le commandant *Boniface* avoir été incapable de les arrêter et probablement Milev a été soumis par le commandant Vandale *Genséric* qui a fait de Cirta un centre chargé de surveiller le reste des villes de la région. En 539 Solomon, général de l'empereur Justinien chargé pour la seconde fois, de la direction des affaires utilisa les débris de la ville pour la construction d'une forteresse et d'un mur d'enceinte soutenu par quatorze tours de contrôle, capable de résister aux attaques des tribus. Cette enceinte renferme les plus importants édifices de la ville romaine. En an 55 de l'hégire correspondant à l'année 674 la ville de Mila est conquise par les musulmans par le conquérant Abou Mouhadjir Dinar, Et a construit la mosquée SIDI GHANEM sur les décombres d'une église. Et s'y installa pendant deux ans en menant les conquêtes à travers les autres territoires.

Vers l'an 902, l'apôtre Chite, Abou-Abdallah, lieutenant du Mehdi, vint s'établir au milieu des montagnes des Ketama, dans un lieu appelé Guidjel, non loin de Sétif. Après avoir répandu les nouvelles doctrines, il entra en campagne et, à la tête de nombreux berbères réunis à Tazerout, il vint attaquer Milah. La ville fut prise par la trahison.

En 1154, la ville de Mila est soumise au pouvoir du prince de Bougie, Yahia-ben-El-Azis (dernier des Hammadides, dépossédé par Abd-el-Moumen).

Pendant la domination turque, Milah continue, à recevoir une garnison formée de soldats de milice. Ces derniers, en épousant des femmes du pays, ont donné naissance à de nombreuses familles de Kourouglis qui existent encore aujourd'hui.

En 1837, lors la ville de Mila tombe entre les mains de l'armée française après une violente résistance.

Les données archéologiques du vieux Mila se concorde parfaitement avec les données historiques. Les témoins matériels confirme ce qui à été dit, le silex trouvé remonte à la période préhistorique tandis que les inscriptions libyque et punique témoignent que la ville était une importante ville Numide.

La présence de la cité de Mila sur la table de Peutinger, les vestiges romain, tombes, mobiliers funéraires, céramiques, inscriptions latine sur pierre, le mur en pierres de taille minutieusement travaillée et la fontaine de Ain el Bled sont tous des indices qui confirme que cette cité était une ville romaine. La construction de l'encinte par le réemploi des pierres de taille de différentes natures sans préoccuper des lits de stratification technique très connue chez les byzantin marque le présence de ces derniers sur cette terre.

La mosquée de Sidi Ghanem marque fortement la présence de l'islam dans une période très avancée des Foutouhates, ses caractéristiques architecturales telles que le plan arabe hypostyle plus large que profond, ses nefes et travées en marbre et chapiteaux romain, l'utilisation de l'arc plein cintre outrepassé ou fer à cheval, et l'orientation de la Qibla vers le Sud et son emplacement sur ancienne édifices romain et byzantin sont tous des indices qui confirme que cette mosquée est très ancienne et ressemble au premières mosquée dans le monde musulman.

La présence des éléments de décors sur plâtre identique à celle trouvés par Golvin dans la Kalaa des Baní Hammad, et surtout de ce qui est important , des éléments d'une grande inscription arabe style coufique sur plâtre, c'est un élément qui confirme le passage des Hammadides dans cette ville.

La casbah, ses maisons et ses palais témoignent du passage des Turques par Mila.

**Deuxième Partie :**  
*Partie Pratique*

**Chapitre 01 :**  
*Méthodologie et techniques de caractérisations  
des matériaux.*

## 1. Introduction

Il existe aujourd'hui une multitude de techniques et de combinaisons possibles de méthodes d'analyses qui peuvent être utilisées pour l'étude et la caractérisation des matériaux archéologiques. Dans le processus analytique, il est nécessaire de pouvoir aborder le matériau à différentes échelles, suivant plusieurs niveaux de détails.

Les méthodes de caractérisation sont nombreuses et généralement normalisées. Le choix des normes est lié au type de matériaux à étudier, ou bien aux propriétés à déterminer. Elles peuvent différer d'un pays à l'autre mais elles sont très strictes tant avec les conditions expérimentales à respecter, qu'avec le nombre d'échantillons à tester ou la forme et la taille qu'ils doivent respecter.

L'étude des matériaux du patrimoine représente un véritable défi d'un point de vue analytique car il s'agit de matériaux composites et hétérogènes, souvent conservés en faible quantité. Dans certains cas, il n'est pas possible de réaliser un prélèvement sur l'œuvre en raison de son caractère unique.

Lorsque des prélèvements sont possibles, les échantillons obtenus sont souvent de très petite dimension, ce qui ne permet de réaliser qu'une seule et unique analyse. Ces matériaux ont de plus été transformés par l'homme et ont ensuite été soumis à un ensemble de dégradations naturelles. La quantité prélevée du matériau, doit pouvoir être restreinte au minimum représentatif et les techniques de prélèvement doivent être les moins destructives possible.

La méthode de caractérisation à adopter, nous a permis d'aborder les matériaux selon différentes échelles. Cette méthode se base sur une observation macroscopique et microscopique, une étude pétrographique complétée par des analyses chimiques, minéralogiques, thermiques et physiques. Les avantages de cette méthode sont que les différentes observations offrent directement un grand nombre d'informations, sur la texture et les composants de l'échantillon. Le couplage de ces observations avec des techniques d'analyse physico-chimiques, nous a permis d'identifier des éléments non observables et de contrôler et valider en partie les premières observations,

Une datation des briques cuites par luminescence optiquement stimulée OSL a été également effectuée par la mesure de la concentration des éléments radioactifs et leurs activités par ICP-MS et spectrométrie gamma

La (figures.1.1) montre les matériaux et les essais à réaliser, tandis que l'organigramme (figure.1.2) montre l'emplacement des prélèvements.

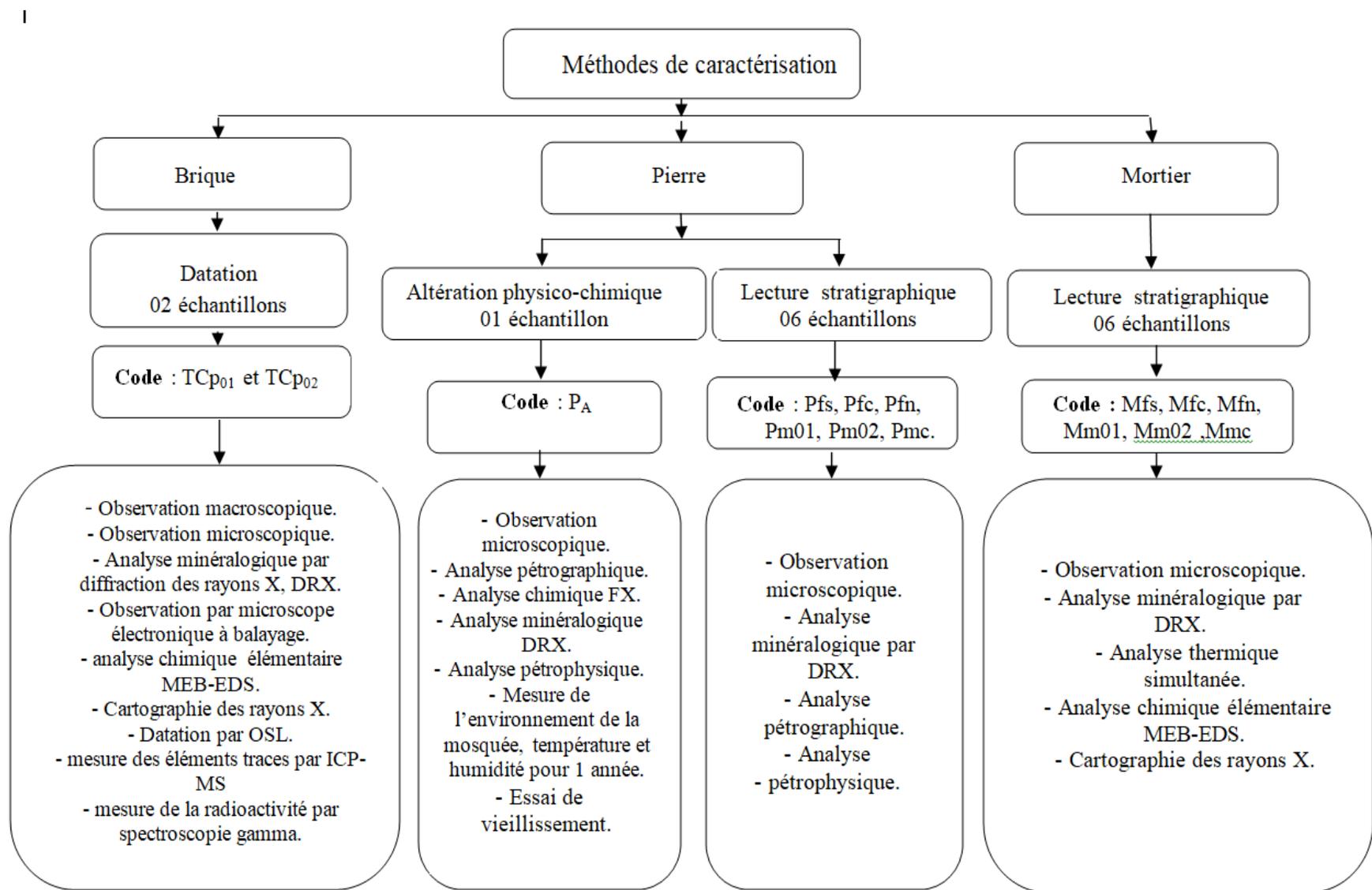


Fig.1.1. Organigramme des étapes de caractérisation des matériaux de construction.

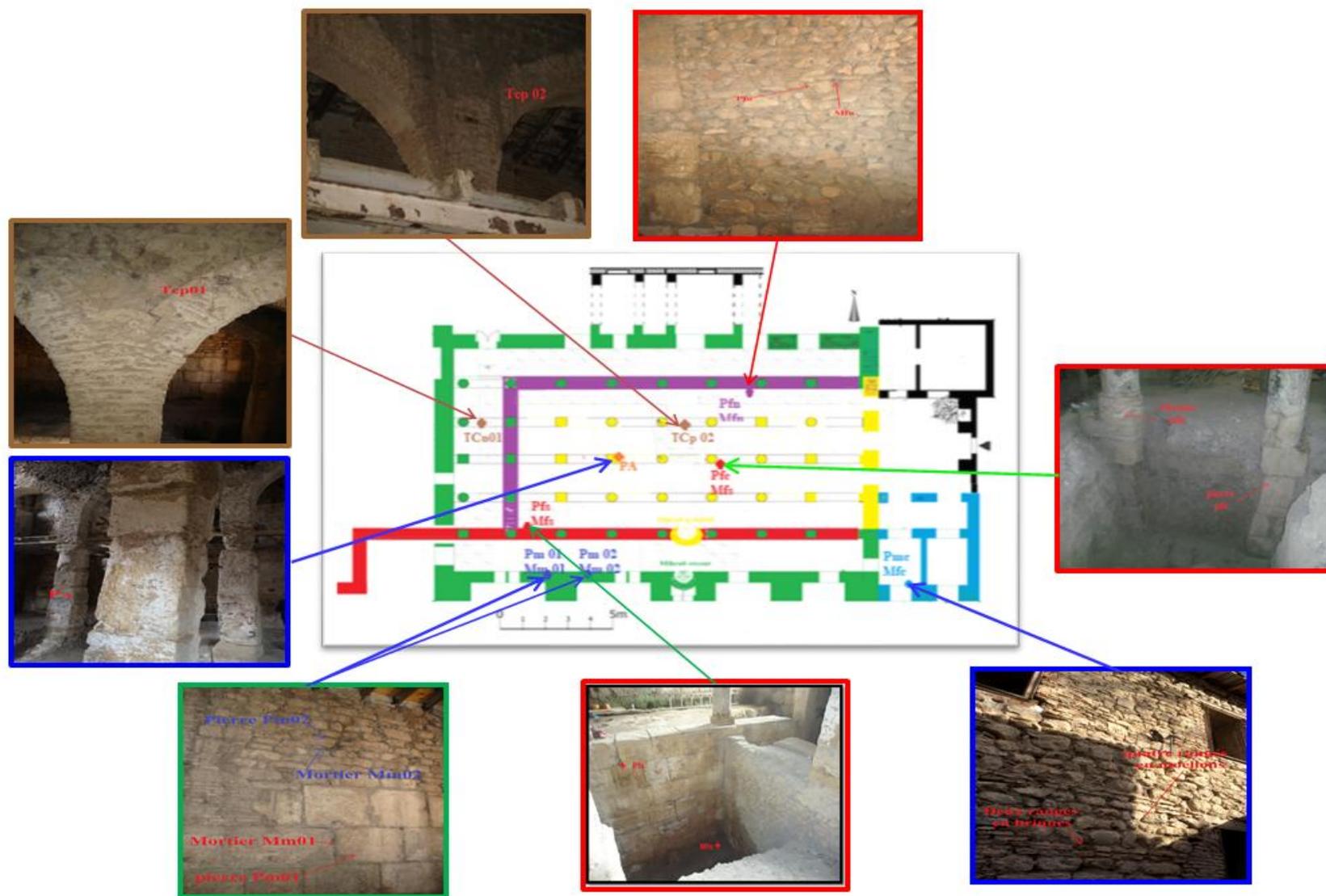


Fig.1.2.Schéma d'emplacement des prélèvements des échantillons.

## 1. Les méthodes utilisées dans l'analyse et la caractérisation des matériaux :

### 1.1. L'observation :

L'observation à l'œil nu, à la loupe binoculaire et au microscope optique, menés sur les matériaux anciens aide à :

- Identifier les matériaux constitutifs de l'œuvre ;

Donner des informations sur :

- La structure, la texture.....ect
- La technique de fabrication et de mise en forme.
- L'état de conservation de l'œuvre.
- Eventuelles formes de dégradations présentes

L'observation peut se faire sur des matériaux brutes c'est-à-dire sans aucune préparation préalable ou sur des sections polis pour des grossissement relativement élevé ; Le pouvoir séparateur d'un microscope optique (grossissement) est limité par la longueur d'onde de la lumière ; aucun détail de dimension inférieure à quelque micromètre ne peut être observé la (figure.1.3), montre les techniques d'observation des matériaux .

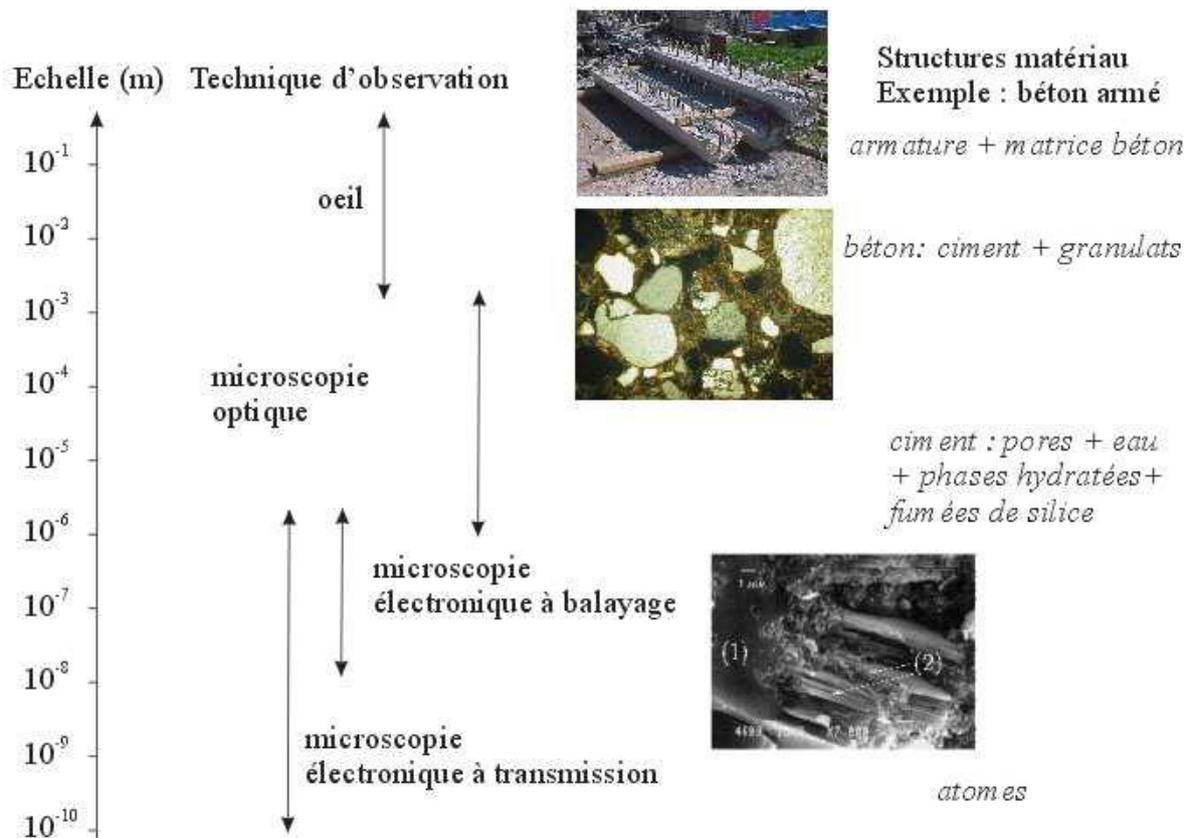


Fig.1.3. Techniques d'observation des matériaux

## 1.2. Analyse pétrographique sur lame mince ;

La pétrographie est la science ayant pour objet la description des roches et l'analyse de leurs caractères structuraux et minéralogiques. Cette technique est utilisée aujourd'hui, en archéométrie notamment pour identifier l'origine des éléments archéologiques tels que, les céramiques ou les tuiles en terre cuite. Elle se base sur l'étude de leurs composants minéraux tout en les comparant avec les données géologiques. Le principe en est l'analyse microscopique et la comparaison informatique à une banque de données de référence.

- La description macroscopique doit répondre à trois critères : Le premier élément est la couleur de la matrice, un deuxième point concernant l'homogénéité de la matrice par rapport à sa composition granulaire et le troisième se rapporte à sa structure macroscopique.

La description microscopique a pour objectifs d'identifier et de décrire l'ensemble des composants des échantillons, à savoir :

- La texture
- La matrice ou le ciment
- Les éléments figurés (grains)
- La porosité

La fabrication des lames minces des différents échantillons, objets de notre étude, a été réalisée au niveau du centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine CICRP, Marseille, France.

La technique adoptée, répond à un protocole en trois étapes principales : Le sciage du prélèvement, le collage d'un échantillon sur une lame de verre, la réalisation de la lame mince proprement dite par usure de l'échantillon

*Le sciage du prélèvement* : Il est réalisé à l'aide d'une scie circulaire diamantée. Deux coupes parallèles espacées d'environ 1 cm permettent de détacher une plaque du matériau, dans laquelle, on découpe enfin un fragment ayant une taille d'un morceau de sucre, (figure 1.4).

*Le collage sur lame de verre* : l'une des faces du "morceau de sucre" est aplanie à l'aide d'un tour à plateau horizontal par usure avec un abrasif.

*La réalisation d'une lame mince* : Le fragment de matériau, collé sur la lame, est à nouveau découpé à la scie diamantée pour réduire son épaisseur à 2 mm environ. Il faut ensuite amincir encore cette section par usure sur le plateau du tour à l'aide d'abrasifs. En fin d'opération, le technicien contrôle avec un microscope optique le parallélisme des faces et

l'épaisseur de la préparation qui doit être de 30  $\mu\text{m}$ . A cette épaisseur, la plupart des minéraux sont transparents à la lumière et ils peuvent être étudiés sous un microscope à lumière polarisante, (figure.1.5).

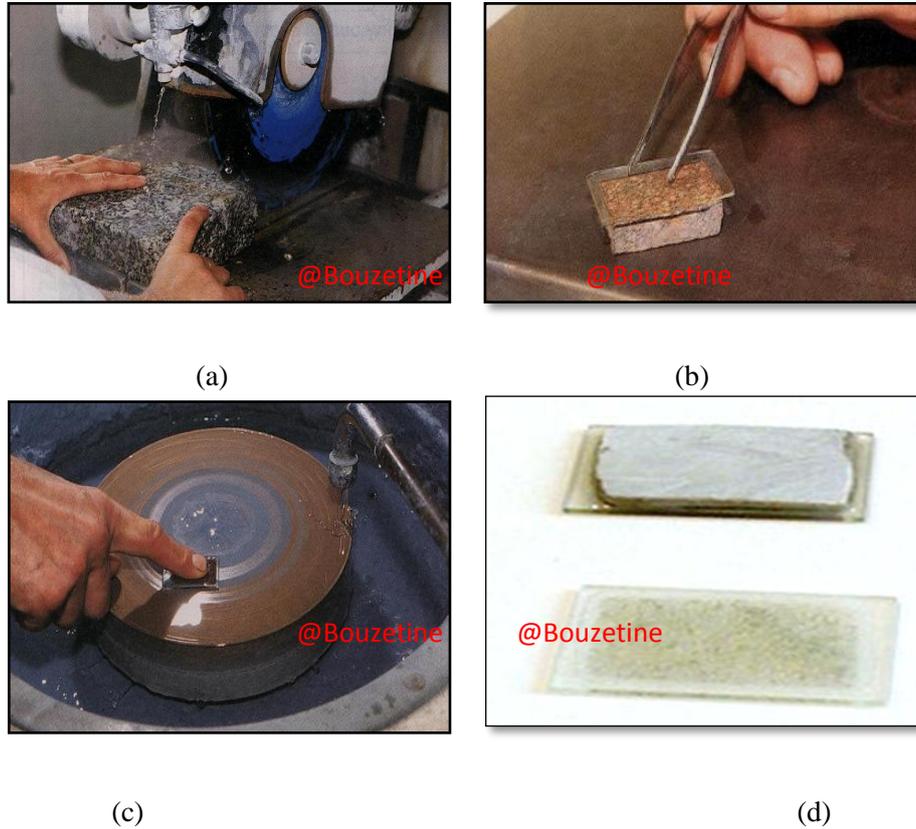


Fig.1.4. Préparation d'une lame mince : (a) sciage ; (b) collage de la lame du verre ; (c) rodage;(d) lame mince finie



Fig.1.5. photo d'un microscope à lumière polarisante.

### 1.3. L'analyse thermique différentielle (ATD)

L'analyse thermique différentielle est une technique dans laquelle la différence de température entre l'échantillon et un matériau de référence est contrôlée en fonction du temps ou de la température tandis que la température de l'échantillon, dans une atmosphère spécifiée, est programmée.

L'échantillon et la référence sont placés symétriquement dans le four, (figure.1.6), Le four est contrôlé selon un programme de température et la température de l'échantillon et la référence sont modifiées. Au cours de ce processus, un thermocouple différentiel est mis en place pour détecter la différence de température entre l'échantillon et la référence. De plus, la température de l'échantillon est détectée à partir du thermocouple du côté échantillon.

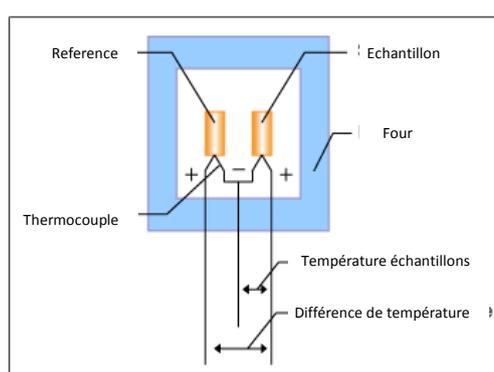


Fig.1.6. Principe de la DTA <sup>256</sup>.

Sur la (figure 1.7). Le graphique (a) montre le changement de température du four, la référence et l'échantillon en fonction du temps.

Le graphique (b) montre le changement de différence de température ( $\Delta T$ ) en fonction du temps détecté avec le thermocouple différentiel.

Le signal  $\Delta T$  est appelé signal DTA.

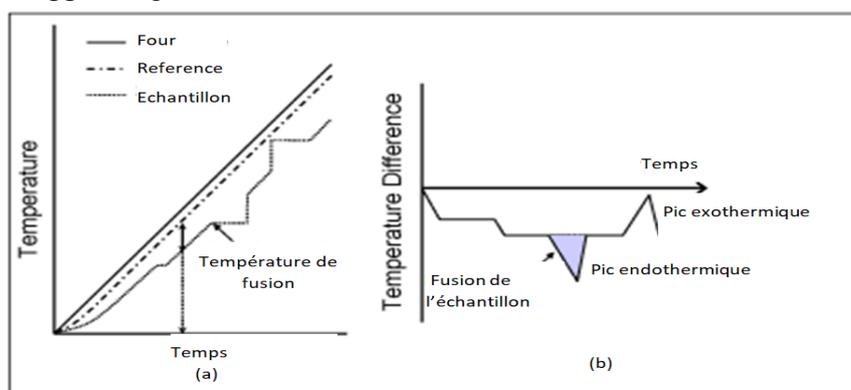


Fig.1.7. Principes de mesure du DTA <sup>257</sup>.

<sup>256</sup>Gilbert TEYSSÈDRE, Colette LACABANNE, Analyse thermique différentielle et analyse enthalpique différentielle, 1996, techniques de l'ingénieur.p21

<sup>257</sup>Gilbert TEYSSÈDRE, Colette LACABANNE, op cité ,p22

Les matières qui ne changent pas dans la plage de température de mesure (généralement l' $\alpha$ -alumine) sont utilisées comme référence.

Lorsque le chauffage du four commence, la référence et l'échantillon commencent à chauffer avec un léger retard en fonction de leur capacité thermique respective, et finalement chauffent en fonction de la température du four.

$\Delta T$  change jusqu'à ce qu'un état statique soit atteint après le début du chauffage, et après avoir atteint la stabilité, atteint une quantité définie conforme à la différence de capacité thermique entre l'échantillon et la référence. Le signal à l'état statique est appelé la ligne de base.

Lorsque la température augmente et que la fusion se produit dans l'échantillon, par exemple, l'élévation de température s'arrête comme le montre le graphique (a) et le  $\Delta T$  augmente. Lorsque la fusion se termine, la courbe de température revient rapidement à la ligne de base.

À ce stade, le signal  $\Delta T$  atteint le pic, comme le montre le graphique (b). À partir de là, nous pouvons détecter la température de transition de l'échantillon et la température de réaction à partir du signal  $\Delta T$  (signal DTA).

Dans le graphique (b), la différence de température due au changement endothermique de l'échantillon est représentée par une direction négative et la différence de température due au changement exothermique de l'échantillon est représentée par une direction positive.

#### **1.4. Thermogravimétrie (TG)**

Une technique dans laquelle la masse de l'échantillon est contrôlée en fonction du temps ou de la température tandis que la température de l'échantillon, dans une atmosphère spécifiée, est programmée.

#### **1.5. Définitions de la thermique simultanée(ATS).**

Comme défini ci-dessus, TG est une technique qui mesure le changement de masse dans un échantillon, et elle est utilisée pour détecter l'évaporation, la décomposition, l'oxydation et d'autres effets de changement de température qui provoquent des changements de masse.

La (figure.1.8), montre les poutres d'équilibre de l'échantillon et de la référence se trouve dans le four. Les masses de l'échantillon et de la référence sont mesurées séparément par les bobines d'entraînement étalonnées en sensibilité. La différence de masse est envoyée sous forme de signal TG. Par la mesure de masse différentielle, les effets de l'expansion du faisceau, du flux de convection et de la force de flottabilité sont annulés. Ainsi, la mesure de thermogravimétrie hautement sensible est obtenue. La mesure de la masse de l'échantillon et de la référence par les

bobines d'entraînement indépendantes permet un réglage facile de la dérive de la ligne de base TG électriquement.

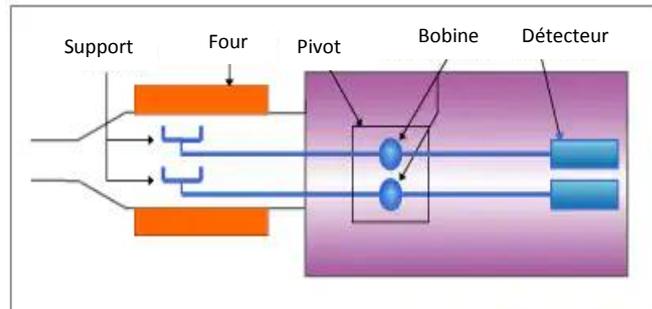


Fig.1.8. Schéma de principe du différentiel horizontal TG / ATD<sup>258</sup>.

En outre, un thermocouple est situé dans chaque support, ce qui permet la sortie simultanée du signal ATD.

La TG peut être utilisée pour l'analyse de la décomposition thermique, de l'oxydation, de la déshydratation, de la résistance à la chaleur et de l'analyse cinétique. En combinant avec l'autre technique de mesure, diverses informations peuvent être obtenues à partir d'un échantillon. En particulier, l'instrument de mesure simultanée TG / DTA est le plus courant.

Les analyses thermiques simultanées ont été réalisées sur un analyseur, ATG-DSC Q600 (TA Instruments), au niveau des laboratoires de Coloronda.SL, Espagne, (figure. 1.9).



Fig.1.9. analyseur type ATG-DSC Q600,TA Instruments.

## **1.6. L'analyse chimique par fluorescence X, (XRF)**

La composition chimique élémentaire des matériaux a été effectuée pour l'ensemble des échantillons au niveau de Coloronda.SL Espagne. Il s'agit d'une analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X selon le principe de la norme *NF P 15-467*, ainsi que la perte au feu selon les modalités de la norme *EN 1744-1*.

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide.

Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis et surtout reproductibles.

### **2.6.1. Principe**

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, Les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique.

### **2.6.2. Rayons X et fluorescence**

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques. On distingue, des plus énergétiques aux moins énergétiques, les rayons gamma, les rayons X, les Ultra-Violet, la bande du visible, l'Infra Rouge. Les rayons X représentent la partie du spectre électromagnétique comprise entre 100eV et 1 Mev. L'énergie contenue dans les photons X est donc bien plus grande que celle des photons lumineux et est suffisamment grande pour pouvoir arracher des électrons situés au coeur des atomes. L'énergie  $E$  et la longueur d'onde  $\lambda$  d'un photon sont liées par la relation  $E = h.c / \lambda$  où  $h$  est la constante de Planck ( $6,6.10^{-34}$  J.s) et  $c$  la vitesse de la lumière ( $3.10^8$  m/s).

En spectrométrie de fluorescence X, les sources de rayonnements X habituellement utilisées sont les tubes à rayons X ou les sources radioactives (surtout pour les appareils portables mais qui tendent à disparaître avec le développement des mini-tubes). Du fait de leur énergie importante, les photons X émis par un tube ont la capacité d'arracher des électrons situés sur les couches proches du noyau des atomes. L'atome alors ionisé va tendre à revenir à l'état d'équilibre : un électron d'une couche plus externe va venir combler la lacune laissée par l'électron qui a été éjecté. Cette transition électronique s'accompagne d'une libération d'énergie sous forme d'un photon X d'énergie caractéristique de l'atome. C'est le phénomène de fluorescence X. Plusieurs transitions électroniques sont possibles, un atome pouvant émettre plusieurs types de photons X. Pour les nommer on utilise la notation de Siegbahn, on parle de raies  $K\alpha$ ,  $K\beta$ ,  $L\alpha$ ,  $L\beta$ ,.....,(figure.1.10).

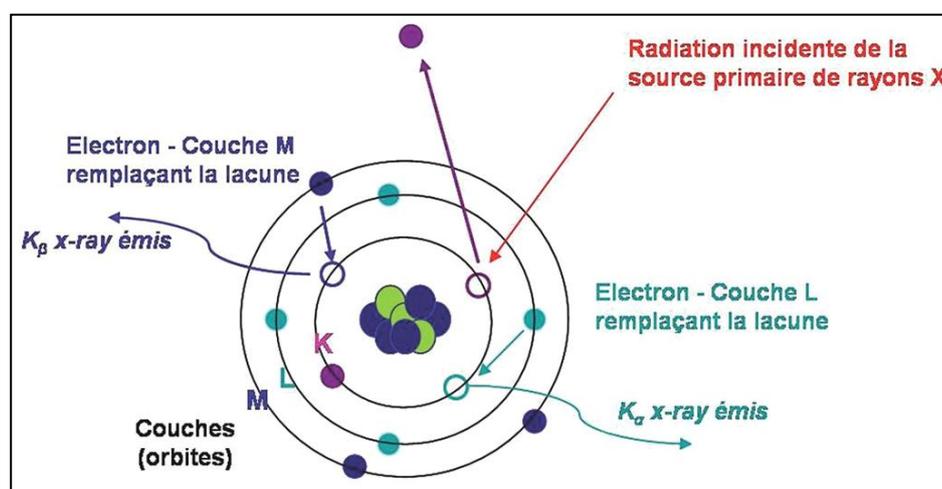


Fig.1.10.Principe de la fluorescence X.

Pour l'analyse du rayonnement de fluorescence X émis par l'échantillon, il existe deux grands types d'appareillage : les spectromètres à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF, *Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry*) et les spectromètres à dispersion en énergie (ED-XRF, *Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry*). La deuxième méthode que sera utilisée dans l'analyse de nos échantillons.

<sup>259</sup>Valérie Thirion, Merle, Spectrométrie de fluorescence X, Archéométrie et archéologie, UMR5138, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, CNRS, Université de Lyon, 7, France, p 42

### 2.6.3. Méthode de préparation de l'échantillon :

Après le broyage du matériau et le réduire en poudre fine, On peut soit préparer une pastille soit préparer une 'perle de verre'. La pastille est obtenue par compression de la poudre céramique à l'aide d'une presse. Un liant peut être ajouté pour conférer une bonne solidité mécanique à la pastille. L'échantillon est alors prêt pour analyse. Néanmoins l'épaisseur des grains influence fortement l'intensité de fluorescence X en l'augmentant ou la diminuant suivant l'élément et la matrice, tout comme la pression et le temps de pastillage. Ces inconvénients sont supprimés par la méthode de fusion où l'échantillon est transformé en une 'perle' de verre homogène et de surface parfaitement lisse. Pour ce faire, la poudre est mélangée à un fondant (mélange tétraborate et métaborate de lithium) est portée à une température élevée sous agitation constante pour assurer la fusion complète et une excellente homogénéité au verre formé qui est ensuite coulé dans une coupelle puis refroidi, (figure.1.11) Dans nos analyses nous avons préparé des perles à partir de 0,8g de poudre à analyser et de 3,2g de fondant. En utilisant spectromètre Gold Award, l'EDX-7000P Shimadzu , (figure1.12).

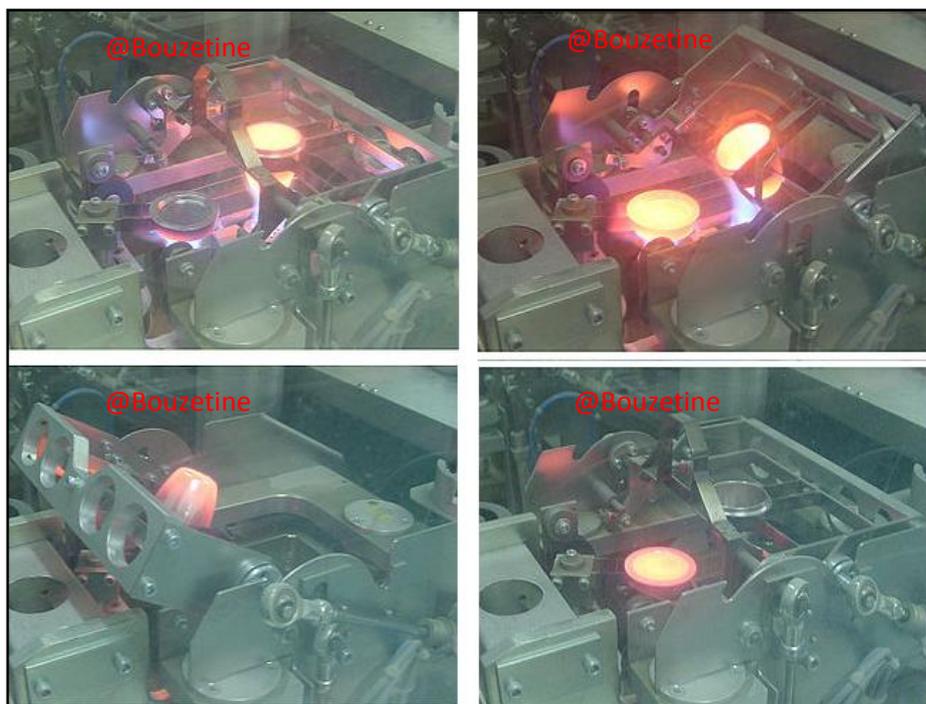


Fig.1.11. Préparation d'une perle en verre.



Fig.1.12. Spectromètre modèle Gold Award, l'EDX-7000P Shimadzu.

### 2.7. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) :

Les rayons X sont à la base de différentes techniques d'analyse comme la radiographie, la spectroscopie et la diffractométrie. Ces radiations électromagnétiques ont une longueur d'onde de l'ordre de l'Ångström ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ).

Un cristal est un agencement d'atomes, d'ions ou de molécules, avec un motif se répétant périodiquement dans les trois dimensions. Les distances interatomiques sont de l'ordre de l'Ångström, du même ordre de grandeur que les longueurs d'onde des rayons X : un cristal constitue donc un réseau 3D qui peut diffracter les rayons X.

Un cristal peut être vu comme la répétition périodique tridimensionnelle d'éléments (atomes ou molécules), appelés nœuds. Le schéma représenté sur la (figure.1.13), représente une coupe de *plans réticulaires* passant par les centres de ces éléments, espacés d'une distance  $d$ . L'angle  $\theta$  (*angle de Bragg*) détermine l'incidence d'un faisceau parallèle de rayons X sur ces plans réticulaires. Notez que  $\theta$  est le complémentaire de l'angle d'incidence usuel en optique. La différence de chemin optique entre les deux rayons lumineux particuliers représentés vaut  $AC + CB = 2 d \sin\theta$ . Ils interfèrent de manière constructive lorsque la différence de marche est égale à un nombre entier  $p$  de longueur d'onde. C'est la loi de Bragg :

$$2d \sin \theta = p\lambda.$$

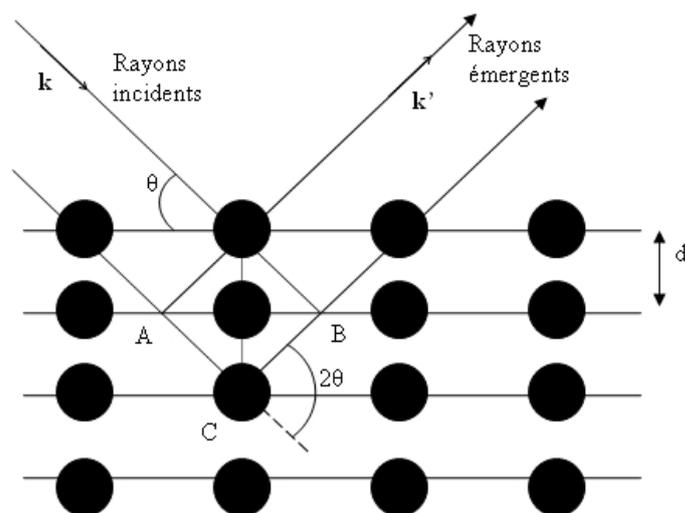


Fig.1.13. Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés  
D'une distance  $d$ <sup>260</sup>.

Dans un même composé, plusieurs familles de plan peuvent être présentes. C'est pour cette raison qu'un balayage angulaire assez large est effectué. La variation de l'angle permet de déterminer les angles pour lesquels  $n$  est entier dans l'équation de Bragg.

L'angle étant ainsi connu et la longueur d'onde étant prédéterminée et constante, il est alors possible de déterminer la distance réticulaire.

L'intensité relative des pics de diffraction est calculée en divisant l'intensité absolue d'un pic par l'intensité absolue du pic le plus intense puis convertie en pourcentage. Les valeurs d'intensité absolue ne sont généralement pas utilisées car elles varient avec les paramètres instrumentaux et expérimentaux.

Le spectre de diffraction est spécifique et unique à une seule phase, même si des phases ont la même composition chimique. La position des pics ainsi que leurs intensités relatives sert à des comparaisons dans des bases de données menant ainsi à l'identification de la ou des phases présentes.

La première étape consiste à chercher des spectres compatibles dans des bases de données. Une comparaison est ensuite faite entre les résultats expérimentaux et le spectre de référence. La dernière étape consiste en l'identification des phases en acceptant ou non la comparaison.

---

<sup>260</sup>Christophe Aronica, Diffraction Des Rayons X, Techniques et études des structures cristallines, 2009, Catherine Simand, culture sciences physique 03.

La méthode de diffraction X sur poudre a été mise en place par P. Debye et P. Scherrer.

Un faisceau monochromatique de rayons X est dirigé sur l'échantillon de poudre qui est composé d'un très grand nombre de petits monocristaux d'orientation aléatoire. En raison de leur grand nombre, il en existe toujours beaucoup pour lesquels une famille de plans réticulaires (hkl) respecte la relation de Bragg. L'intensité d'une raie (hkl) sera donc égale au nombre de cristaux en position de Bragg multiplié par l'intensité diffractée par un cristal élémentaire. Cette intensité est directement proportionnelle au facteur de structure  $F_{hkl}$ . Ce facteur est lié à la nature des atomes dans le plan et à leur position dans la maille cristalline. Pour plusieurs familles de plans, la diffraction permet d'obtenir un ensemble de cônes de diffraction dont le sommet est commun. L'ouverture du cône correspond à  $2\theta$  et l'axe est le faisceau incident. Il existe un cône pour chaque valeur de distance interréticulaire ( $d_{hkl}$ ) et il est alors possible d'établir la liste des différents  $d_{hkl}$  présents dans l'échantillon étudié. L'indexation de ces anneaux de diffraction est effectuée par un programme informatique permettant d'analyser ce spectre rapidement.

La diffraction des rayons X, a été réalisée sur un diffractomètre sur poudre type RX D8 Advance (Bruker-axs), comme montre les (figures 1.14), (figure 1.15) et (figure 1.16).



Fig.1.14. Échantillon de poudre sur support



Fig.1.15. RX D8 Advance (Bruker-axs).

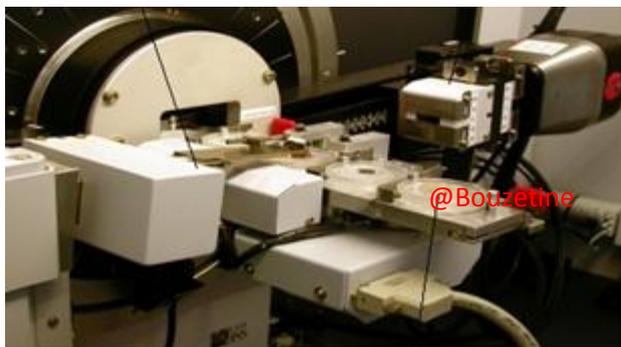


Fig.1.16. Zoom autour du détecteur.

## 2.8. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La Microscopie Electronique à Balayage MEB (ou Scanning Electron Microscopy SEM) est une technique d'observation de la topographie des surfaces. Elle apporte des informations sur la structure et la texture d'un échantillon mais aussi sur la taille et la forme des grains élémentaires ou agglomérats selon le grossissement choisi. Elle est fondée sur la détection des électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un faisceau très fin d'électrons primaires monocinétique qui balaye la surface d'un échantillon où se produisent des interactions électrons-matière dans une zone appelée poire d'interaction (figure 1.17), détectées par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons. On distingue plusieurs types d'électrons réémis :

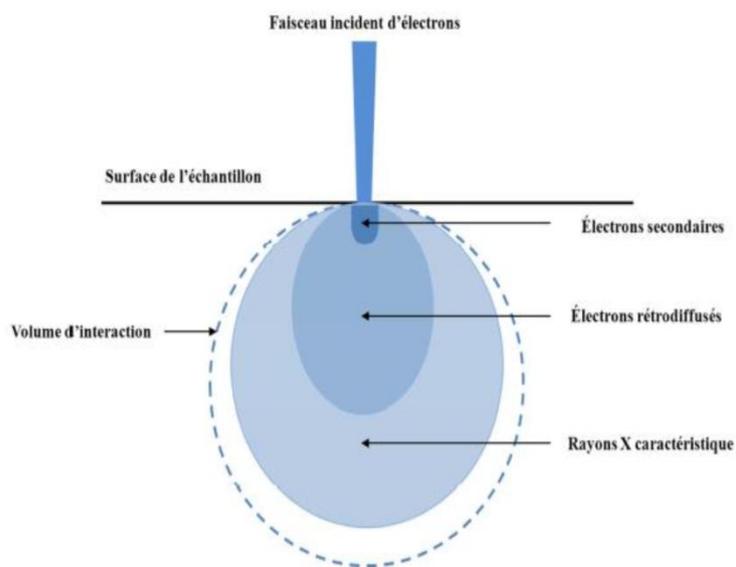


Figure.1.17. Poire d'interaction<sup>261</sup>.

<sup>261</sup>HAFSI Zoulikha, Etude du comportement du faisceau d'électrons dans un MEB à pression variable – Conséquences sur les électrons rétrodiffusés, thèse de doctorat en physique, 2018, université de Bel Abbas , p45.

**Les électrons secondaires** : sont des électrons initialement sont liés à l'atome et éjectés par absorption d'une partie de l'énergie d'un électron incident. Ces électrons servent en imagerie, pour donner des informations topographiques de la surface de l'échantillon d'une profondeur moins de 10 nm. Ce mode d'électrons permet d'obtenir des images rendant compte du relief de la surface et de renseigner sur la taille des grains et des agglomérats. C'est aussi une très bonne technique pour repérer les défauts présents tels que les porosités ou les fissures même si l'information acquise ne rend pas compte de l'étendue volumique des défauts sous la surface étudiée.

**Les électrons rétrodiffusés** : sont des électrons produits par l'interaction entre les électrons primaires et les noyaux des atomes. Ils ont une énergie élevée et sont réémis dans une zone pouvant atteindre le micromètre de profondeur. Ce mode d'électrons permet d'obtenir des images en « contraste chimique ». Les éléments les plus lourds apparaissent plus clairs et les plus légers, plus sombres. Cela permet de repérer la répartition des différentes phases dans les matériaux composites mais on perd l'information sur le relief de la surface. Sauf indication contraire, les micrographes présentés dans ce rapport sont des clichés obtenus en mode électrons rétrodiffusés.

Les photons X : émis par désexcitation du cortège électronique des atomes dont un électron de cœur a été attaché sous l'impact électronique. Ce type de rayonnement X, donne des informations chimiques qualitatives et quantitatives de l'atome cible (analyse EDS : Energy Dispersive Spectroscopy). (La figure.1.18), montre un exemple d'application des images des électrons rétrodiffusés et de la microanalyse de rayons X pour l'étude de la matière picturale

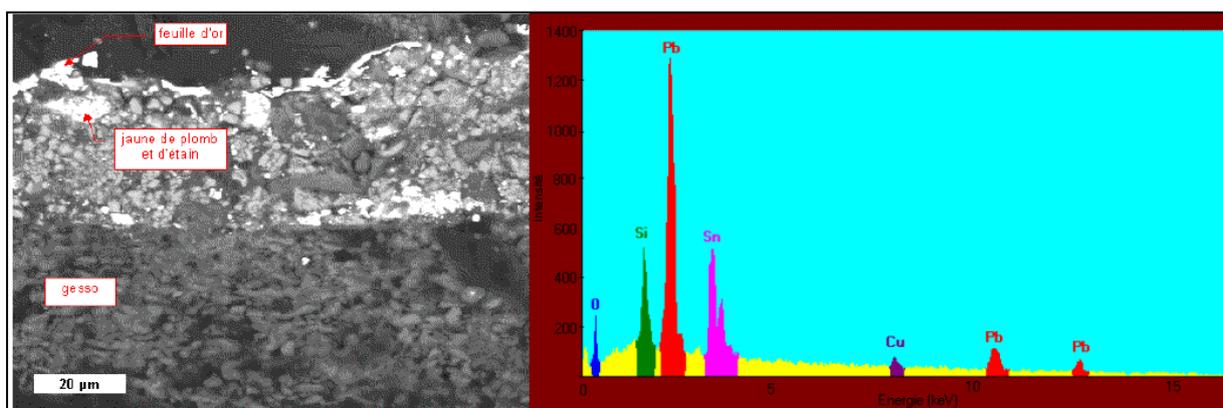


Fig.1.18. Applications des images en électrons rétrodiffusés et de la microanalyse de rayons X pour l'étude de la matière picturale<sup>262</sup>.

<sup>262</sup>ECAM, Le Microscope électronique à balayage et la microanalyse X, school of engineering, université de lyon.

Donc L'analyse par EDS permet de déterminer la composition et de la distribution des éléments chimiques dans l'échantillon analysé. Selon le mode choisi, il est possible d'effectuer une analyse élémentaire en un point précis (sur un volume de  $1 \mu\text{m}^3$  environ) ou en moyenne sur une surface, de constituer un profil de concentrations sur une distance donnée ou de réaliser la cartographie élémentaire d'une surface. La (figure 1.19), montre un exemple Cartographie X d'une corrosion.

Toutefois, l'analyse quantitative en EDS n'est fiable que pour les éléments lourds, typiquement à partir du sodium Na, et elle peut manquer de fiabilité pour les éléments plus légers (limite de détection au niveau du bore B).

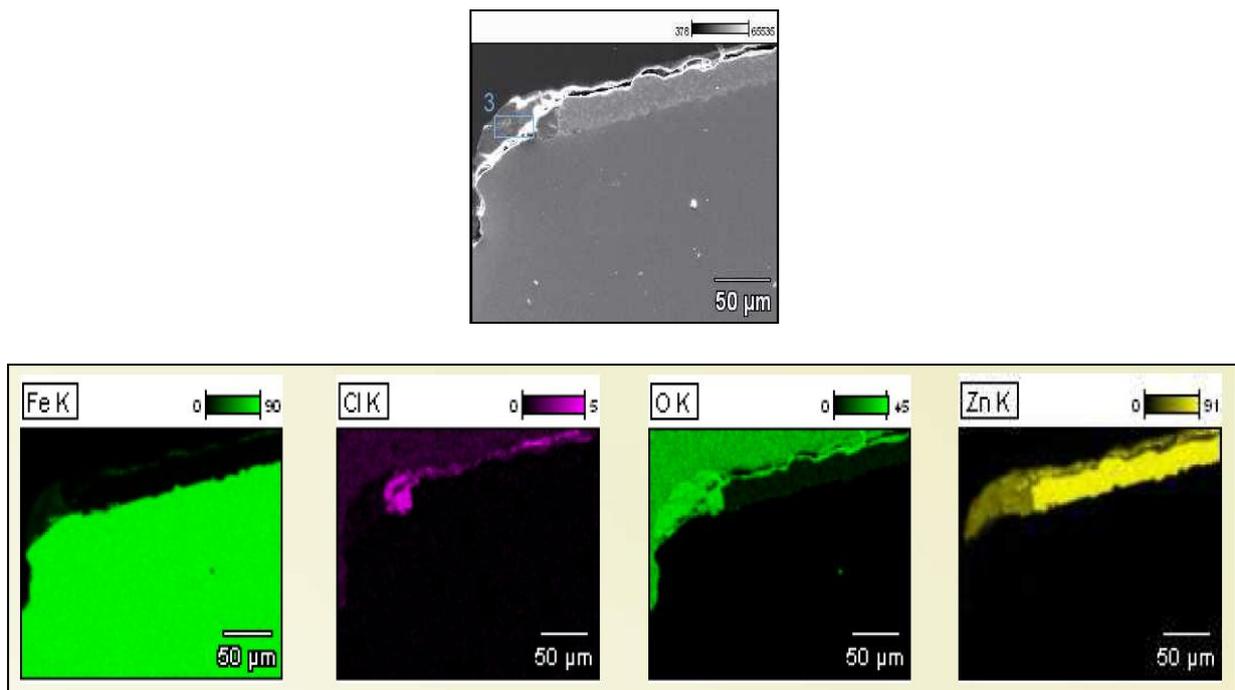


Fig.1.19.Cartographie X d'une corrosion<sup>263</sup>.

Une sonde électronique fine (faisceau d'électrons) est projetée sur l'échantillon à analyser. L'interaction entre la sonde électronique et l'échantillon génère des électrons secondaires, de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal. À chaque point d'impact correspond un signal électrique. L'intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact qui détermine le rendement en électrons secondaires et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Il est ainsi possible, en balayant le faisceau sur l'échantillon, d'obtenir une image de la zone balayée. (La figure 1.20), montre une Photographie d'un MEB équipé d'un détecteur EDS.

<sup>263</sup>ECAM,op cité,page 02.



Fig.1.20. Photographie de l'appareil MEB équipé d'un détecteur EDS.

## 2.9. Datation par OSL

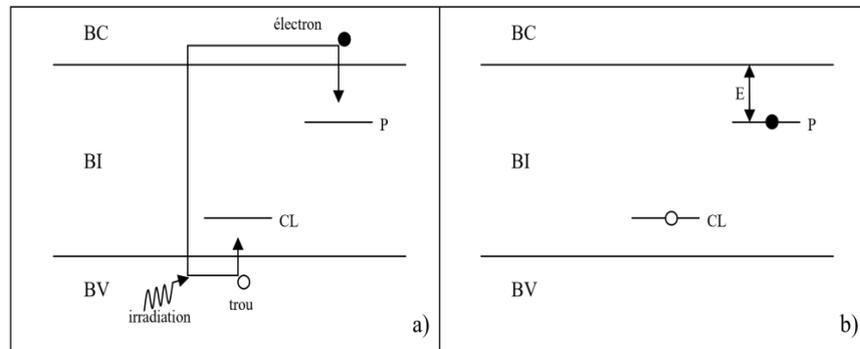
### 2.9.1. Origine de la luminescence

Certaines substances préalablement irradiées ont la propriété d'émettre de la lumière lorsqu'elles sont soumises à une stimulation thermique ou lumineuse. Dans le premier cas, le phénomène est nommé thermoluminescence (TL) et, dans le second cas, luminescence stimulée optiquement (OSL, acronyme de la traduction anglaise « optically stimulated luminescence »). L'intensité du signal lumineux est une fonction croissante de la dose d'irradiation reçue. Le phénomène de luminescence a été observé pour des minéraux naturels. Il est usuellement expliqué à l'aide d'un diagramme de bandes qui représente les niveaux d'énergie possibles des électrons dans un cristal. Le schéma présente trois bandes qui sont, par ordre croissant d'énergie : – la bande de valence (BV) dans laquelle les électrons sont liés aux atomes, – la bande interdite (BI), zone intermédiaire où les électrons, dans un cristal parfait, ne séjournent pas, – la bande de conduction (BC) dans laquelle les électrons se déplacent librement.

En réalité, les cristaux contiennent toujours en nombre élevé des défauts, qu'il s'agisse d'imperfections physiques telles que des lacunes atomiques ou des dislocations, ou d'imperfections chimiques telles que la présence d'impuretés, c'est-à-dire d'atomes étrangers au réseau cristallin. Ces défauts sont à l'origine de la présence de niveaux d'énergie métastables, localisés dans la bande interdite, caractérisés par leur énergie d'activation  $E$  qui correspond à la différence d'énergie entre la bande de conduction et ce niveau. L'exposition du matériau à des rayonnements ionisants a pour effet la création de porteurs de charges libres (trous et électrons) susceptibles d'être piégés dans les défauts cristallins (Figure.1.21). Dans ce qui suit, nous considérerons par convention que la luminescence est liée au piégeage des électrons, mais un raisonnement semblable pourrait s'appliquer en considérant les trous. Lors d'une stimulation

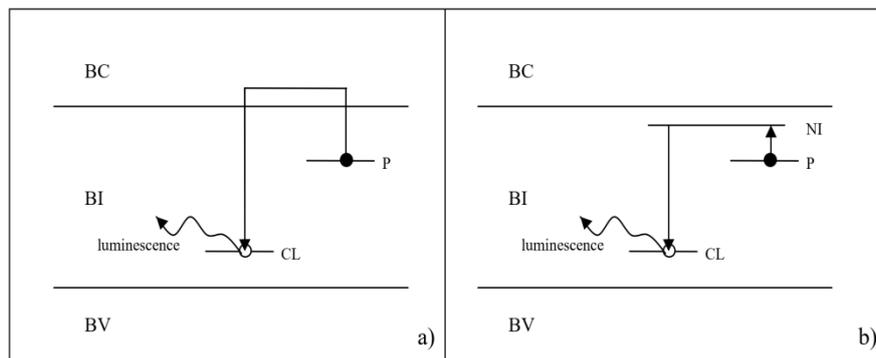
thermique ou optique, les électrons piégés dans des sites métastables sont libérés et peuvent se recombiner avec un trou.

Ce dernier est décrit comme un « centre de recombinaison ». Si la recombinaison se produit au niveau d'un centre « luminogène » (CL), l'énergie de l'électron est dissipée sous forme d'un photon : c'est le phénomène de la luminescence. Dans les autres cas de recombinaison, l'énergie de l'électron est dissipée sous forme de chaleur (phonon) au niveau de centres appelés « inhibiteurs », « quencher » ou « killer »



**Figure.1.21.** Schéma de bandes montrant : a) la création de charges libres due à l'irradiation et b) leur piégeage dans des défauts cristallins (P : piège, CL : centre luminogène, E : profondeur du piège)<sup>264</sup>.

Différents processus de recombinaison sont envisageables, impliquant par exemple le passage de l'électron par la bande de conduction (Figure.1.22.) selon le modèle de SchönKlasens (Schön, 1942 ; Klasens, 1946) ou bien par un niveau intermédiaire (NI) localisé dans la bande interdite (Figure 2.2.b) selon le modèle de Bräunlich-Scharmman (1964).



**Figure.1.22.** Processus de recombinaison électron-trou selon le modèle de Schön-Klasens (a) et de Bräunlich-Scharmman (b)<sup>265</sup>.

<sup>264</sup>Claudio Furetta, Questions and Answers on Thermoluminescence (TL) And Optically Stimulated Luminescence (OSL), 2008, World Scientific Publishing Company, P10.

<sup>265</sup>Claudio Furetta, op cit, p 11.

### 2.9.2. Les signaux d'OSL

Les signaux d'OSL enregistrés au cours d'une stimulation optique à puissance constante, exprimée  $\text{mW.cm}^{-2}$ , décroissent au fur et à mesure que les pièges se vident et l'aire sous la courbe dépend de la dose reçue par le cristal (Figure.1.23). L'énergie excitatrice et l'énergie émise étant de même nature (photons), il est nécessaire d'éviter un recouvrement de leurs domaines spectraux. Le choix d'une longueur d'onde de stimulation dans le bleu et une détection du signal d'OSL dans le proche UV permet, par exemple, de remplir cette condition.

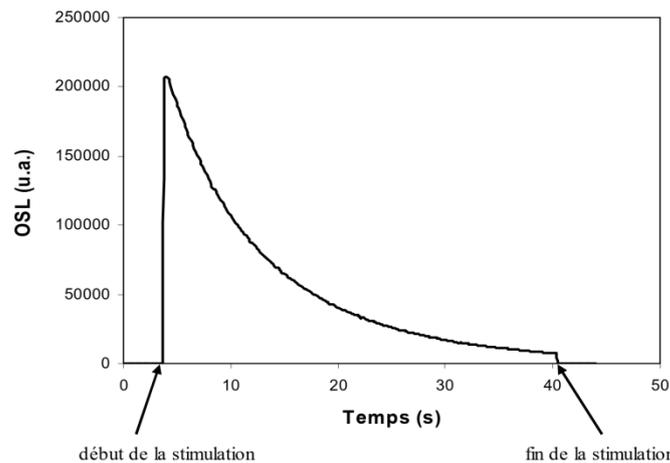


Figure 1.23. Signal d'OSL d'un échantillon de quartz, enregistré après une préchauffe de 10s à  $260^{\circ}\text{C}$ <sup>266</sup>.

### 2.9.3. Principe de la datation

Le principe de la datation par la luminescence est donné par la figure.1.24

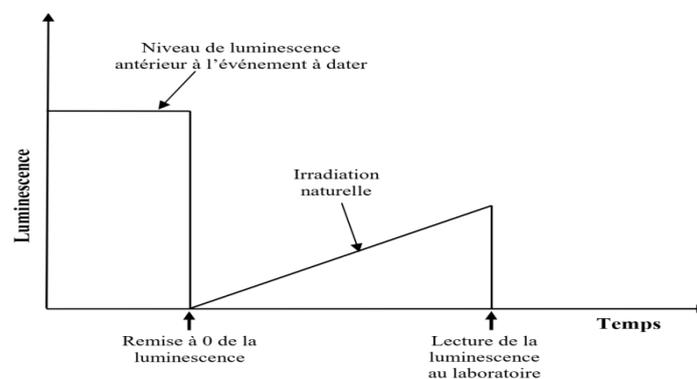


Figure.1.24: Schéma du principe de la datation par la luminescence (d'après Aitken, 1998)<sup>267</sup>.

<sup>266</sup>Claudio Furetta, op cité, p 11.

<sup>267</sup>Claudio Furetta, op cité, p 12.

L'événement à dater, aussi bien par TL que par OSL, correspond à la remise à zéro du signal de luminescence du cristal. Elle peut avoir lieu par chauffage, lors de la cuisson de poteries ou de céramiques, de la chauffe de pierres dans un foyer préhistorique ou encore lors de la mise en place d'une coulée volcanique en ce qui concerne les sédiments et galets de notre étude. Cette remise à zéro peut aussi avoir lieu par exposition à la lumière solaire (ou blanchiment) lors du transport des minéraux par le vent ou par un cours d'eau. Enfin, il peut s'agir de la formation même du minéral, par exemple la cristallisation de la calcite des stalactites des grottes ou celle des quartz ou feldspaths d'une lave.

Au cours de l'enfouissement, les rayonnements  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  émis par les éléments radioactifs contenus dans les échantillons et ceux qui sont présents dans leur environnement, auxquels s'ajoute le rayonnement cosmique, déposent une fraction de leur énergie en traversant les minéraux. Cette énergie est transférée à des charges qui se déplacent et peuvent être piégées dans le minéral jusqu'à la mesure du signal de luminescence au laboratoire.

La datation de l'échantillon par les méthodes fondées sur la luminescence comporte alors deux volets d'égale importance, à savoir :

- l'évaluation de la paléodose, c'est-à-dire de la dose totale d'énergie reçue depuis la remise à zéro du signal. Cette étape consiste à comparer le signal « naturel » résultant de l'irradiation naturelle et enregistré pendant l'enfouissement, aux signaux du même échantillon induits au laboratoire par l'administration de doses de rayonnement artificiel avec une source calibrée.
- l'évaluation du débit de dose annuel (ou dose annuelle) auquel est soumis l'échantillon.

Il est évalué par estimation de la radioactivité de l'échantillon et de son environnement à partir de mesures au laboratoire et sur le terrain.

Le temps écoulé depuis la remise à zéro du cristal est alors obtenu en faisant le rapport suivant :

$$\text{Age} = \frac{\text{Paléodose}}{\text{Débit de dose}}$$

### **2.9.3.1. Détermination de la paléodose :**

Les quartz, lors d'une stimulation optique (OSL), présentent principalement une bande d'émission dans le violet-proche UV, centrée à 365 nm (Huntley et al., 1991). Au début des années 80, les signaux d'OSL du quartz étaient stimulés par un laser à argon émettant dans le vert, à 514,5 nm (Huntley et al., 1985). Par la suite, des moyens moins onéreux de stimulation

optique tels que des lampes halogènes filtrées ou des diodes électroluminescentes (LED) ont été proposés. Actuellement de nombreux appareils d'OSL sont équipés de LEDs émettant dans le bleu (470 nm), les faibles longueurs d'onde étant celles qui permettent de stimuler la luminescence avec la meilleure efficacité.

Les variations de la luminescence en sont étudiées en fonction de la dose artificielle ajoutée. par les protocoles des aliquotes uniques ou protocoles de single-aliquot.

#### - Protocoles de single-aliquot

Avec les procédures de single-aliquot, toutes les mesures nécessaires à l'estimation de la paléodose sont réalisées sur la même fraction (aliquote), d'où l'utilisation d'une très faible quantité de minéral, ce qui constitue un avantage important en archéologie et en géologie, quand les échantillons sont peu abondants, « précieux » ou pauvres en minéraux luminescents. En pratique, plusieurs aliquotes de l'échantillon étudié sont mesurées indépendamment afin d'apprécier la distribution des paléodoses obtenues. Cette dernière fournit des indications sur l'homogénéité de l'échantillon du point de vue de la dosimétrie ou, dans le cas des sédiments non chauffés, sur l'homogénéité du blanchiment des minéraux.

#### - Méthode de régénération

Depuis la fin des années 1990, des protocoles SAR (Single-Aliquot Regenerative dose) tenant compte des changements de sensibilité dus aux préchauffes et mesures ont été développés pour la datation par OSL. Pour ces méthodes, c'est le signal total d'OSL, et non plus seulement sa fraction initiale, qui est mesuré (et par suite remis à zéro). Ceci constitue un avantage pour les échantillons jeunes ou qui présentent une faible luminescence, puisque l'intégration du signal OSL sur une durée de stimulation plus longue améliore la statistique de comptage. Deux approches ont été proposées pour prendre en compte les changements de sensibilité.

Murray et Wintle (2000a) ont proposé un protocole SAR (Figure.1.25) qui permet de construire une courbe de régénération corrigée des changements de sensibilité (rapports Li/Ti en fonction de la dose). Plusieurs doses de régénération  $R_i$  (en général 3 ou 4) encadrant la paléodose attendue sont utilisées et chaque signal OSL ( $L_i$ ) est corrigé par celui d'une dose test fixée ( $T_i$ ).  $P$  est obtenue par interpolation du signal OSL naturel corrigé sur la courbe  $Li/Ti=f(dose)$

- (1) Ajout d'une dose de régénération (=0 lors du 1<sup>er</sup> cycle)
  - (2) Préchauffe (160-300°C/10sec)
  - (3) Mesure OSL à 125°C/100sec ( $L_i$ )
  - (4) Ajout d'une dose test
  - (5) Préchauffe à 160°C/0sec (cut-off ou cutheat)
  - (6) Mesure OSL à 125°C/100sec ( $T_i$ )
  - (7) retour à l'étape (1)
- Répété en utilisant les doses de régénération 0, R1, R2, R3, R4, 0, R1

Figure 1.25 : Protocole SAR proposé par Murray and Wintle<sup>268</sup>.

## - Instrumentation

### **Le Risø :**

Ce lecteur automatique, de type TL/OSL-DA-20, est commercialisé par le Risø National Laboratory au Danemark. Il est équipé d'un PM de type Thorn-EMI 9235QA et permet des mesures de TL et d'OSL. Le système de stimulation optique est constitué de diodes électroluminescentes émettant dans le bleu, à une longueur d'onde de 470 nm. Une diode laser infrarouge permet par ailleurs une excitation dans l'infrarouge (830 nm). Les signaux d'OSL sont détectés à travers un filtre de type Hoya U-340 dont le maximum de détection se situe à 340 nm. Nos mesures de TL bleue avec le protocole SAR ont été également réalisées avec cet appareil, en plaçant un filtre bleu (MTO 380 nm) devant le PM.

Le principe de la mesure de la luminescence est représenté sur la (figure.1.26), la (figure.1.27) montre l'instrument Risø TL/OSL-DA-20, la (figure.1.28) montre le la table de l'instrument porte disque et la (figure.1.29) montre le disque porte échantillon ou chaque trou contient un seule grain de quartz de très petite taille environ inférieure à 20 microns.

### 2.9.3.2. Détermination de la dose annuelle (débit de dose).

Les méthodes de datation par la luminescence requièrent, outre la détermination de la paléodose, l'estimation de la dose d'irradiation annuelle reçue par les minéraux luminescents depuis leur remise à zéro. La dose annuelle est due, pour sa plus grande part, aux rayonnements émis par les éléments radioactifs présents dans l'environnement terrestre. Il s'agit principalement :

- des radioéléments de la famille de l'uranium 238 et de celle de l'uranium 235 ( $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$  représentent respectivement 99,28% et 0,72% en masse de l'uranium naturel). Ils sont émetteurs  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .
- des radioéléments de la famille du thorium 232. Ils sont émetteurs  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .
- du potassium 40, émetteur  $\beta$  et  $\gamma$  et qui représente 0,0117% de la composition isotopique du potassium naturel.

La contribution du rubidium 87, émetteur  $\beta$ , à la dose est quant à elle faible, (<1% de la dose totale) et est donc souvent négligée. Le rayonnement cosmique formé, à basse altitude, de particules de haute énergie (muons), intervient également, mais à un niveau assez faible (<10% du débit annuel total). Il dépend de la profondeur d'enfouissement de l'échantillon, de l'altitude du site et de sa latitude géomagnétique. Le pouvoir de pénétration des rayonnements dans la matière condensée, c'est-à-dire la distance sur laquelle ils perdent leur énergie, est très variable : il est de quelques dizaines de micromètres pour les  $\alpha$  et de 2-3 millimètres pour les  $\beta$ . Quant aux rayonnements  $\gamma$ , plusieurs dizaines de centimètres sont nécessaires pour atténuer presque complètement leur flux.

#### - Les débits de dose.

La dose correspond à l'énergie déposée par irradiation par les particules lors de leur interaction avec la matière. Elle est exprimée en Grays (unité : Gy) et  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ . Il est d'usage de considérer séparément les débits de dose délivrés par les trois types de particules, à savoir  $D_\alpha$ ,  $D_\beta$  et  $D_\gamma$ , qui sont calculables à partir des teneurs en uranium [U], thorium [Th] et potassium [K] du milieu par ICP-MS et leur activité radioactive par spectrométrie gamma.

### 2.10. Spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS)

La spectrométrie de masse est une technique instrumentale d'analyse reposant sur la séparation, l'identification et la quantification des éléments constitutifs d'un échantillon en fonction de leur masse. Elle est basée sur le couplage d'une torche à plasma générant des ions et d'un spectromètre de masse quadripolaire (dans le cas de l'ICP—MS Thermoelectron X7) qui sépare

ces ions en masse.

L'analyse des échantillons par ICP-MS, (figure.1.30), peut être divisée en quatre étapes : introduction-nébulisation, ionisation, séparation en masse et détection. L'échantillon est mis en solution. Un passeur automatique d'échantillons couplé à une pompe péristaltique introduit la solution dans une chambre de vaporisation où le nébuliseur la transforme en un aérosol liquide composé de micro-gouttelettes de quelques  $\mu\text{m}$  à l'aide d'argon gazeux. L'aérosol ainsi formé est envoyé dans une torche à plasma d'argon ( $15 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) à très haute température (entre  $6\ 000$  et  $10\ 000\ ^\circ\text{C}$ ), suffisante pour vaporiser, dissocier, atomiser et ioniser complètement la plupart des éléments.

Une partie de ce plasma (10%) est échantillonnée par un premier orifice de  $1 \text{ mm}$  de diamètre environ au sommet d'un cône en nickel ou en platine (« le sampler »), puis se détend sous l'effet du vide modéré ( $1\text{-}2 \text{ mbar}$ ) qui règne dans une chambre de pompage différentiel (qui permet de passer de la pression atmosphérique au vide secondaire du spectromètre de masse) et passe ensuite dans un deuxième orifice (« le skimmer »). Un système de vide différentiel accélère les ions du plasma vers un ensemble de lentilles électrostatiques qui extrait les ions chargés positivement et les transporte vers un filtre de masse quadripolaire. Cet ensemble de lentilles est aussi appelé lentille ionique.

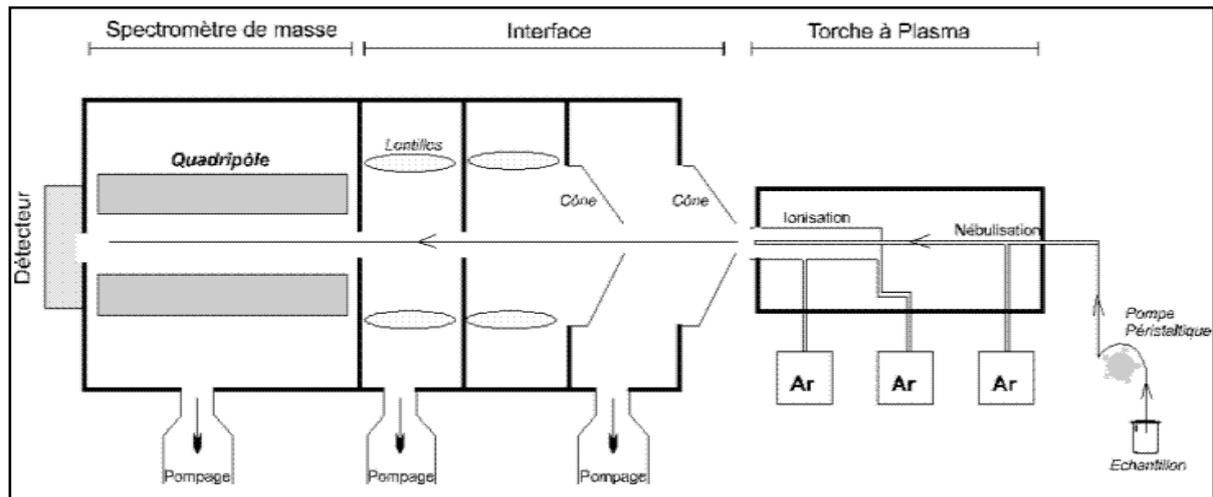


Fig.1.30. Principe de la méthode ICP-MS<sup>270</sup>.

Ce filtre de masse transmet seulement les ions présentant un rapport masse sur charge particulier, déterminé en fonction de la fréquence appliquée au quadripôle. Le principe du spectromètre est basé sur la séparation des éléments en fonction de leur charge et de leur masse. Les quatre barres cylindriques qui composent le spectromètre sont séparées en deux paires opposées et soumises à un courant continu (DC) et alternatif (RF). Les deux paires ont des tensions continues opposées et des tensions alternatives de même amplitude et de signe opposé. Dans le plan formé par la paire positive les ions légers sont trop déviés et heurtent les barres.

L'ion à analyser et ceux ayant une masse supérieure restent entre les deux barres. Dans ce plan le quadripôle joue le rôle de filtre passe-haut. Dans le plan de la paire négative, ce sont les ions lourds qui sont déviés, ce qui équivaut à un filtre passe-bas. En combinant ces deux filtres, seuls les ions ayant le rapport  $m/z$  (masse/charge) désiré seront transmis au détecteur.

La partie détection s'effectue grâce à un multiplicateur d'électrons à dynodes discrètes. Pour la détection des ions positifs, une série de dynodes est soumise à une tension négative de quelques milliers de volts. L'extrémité de la série de dynodes est reliée à la terre. A la sortie du quadripôle, un ion positif, attiré par la tension négative, heurte la surface semi-conductrice de la première dynode. Cet ion positif provoque l'émission d'un ou de plusieurs électrons secondaires qui heurtent à nouveau la paroi de la deuxième dynode : un effet « boule de neige » se produit. A l'extrémité de la série de dynodes, pour un ion qui heurte le détecteur, environ 100 électrons atteignent un collecteur équipé d'un préamplificateur. Le signal se traduit en nombre d'impulsions (nombre de coups), une interface informatique assure le transfert des données afin qu'elles soient traitées.

Pour un isotope donné, le nombre d'ions mesuré permet de calculer directement la concentration de l'élément analysé grâce à un logiciel de traitement quantitatif et qualitatif de l'enregistrement. Les nombres de coups sont convertis en concentrations grâce à l'utilisation de deux types de calibrations : externe (solutions étalon) et interne (spikes). Pour les matrices complexes telles que les roches, un traitement supplémentaire des données est nécessaire.

L'ICP-MS est la technique incontournable pour l'analyse simultanée des éléments en trace et « ultra-traces » (éléments dont la teneur est inférieure à  $10^{-6}$  g/g) et pour la détermination des rapports isotopiques dans les roches, l'eau, les sols,

L'Equipements utilisés ICP-MS Series 7700 (Agilent Technologies) Nébuliseur « modified Lichte » avec chambre cyclonique (autres matrices) (figure.1.31), au niveau de IRAMAT-CRP2A, centre de recherche en physique appliquée à l'archéologie, université de Bordeaux Montaigne.



Fig.1.31. Analyseur ICP-MS Série 7700 (Agilent Technologies).

## 2.11.Spectrométrie Gamma

La spectrométrie gamma est une technique de mesure nucléaire très utilisée pour identifier des éléments radioactifs par la mesure de l'énergie des rayonnements gamma émis, à l'opposé de la technique utilisant un compteur Geiger qui lui ne détecte que la présence de rayonnement gamma sans pouvoir fournir une information sur la nature de la source détectée.

### - Principe

Les noyaux atomiques ont une structure en niveaux d'énergie analogue à celle des niveaux d'énergie des atomes, de sorte qu'ils peuvent émettre (ou absorber) des photons d'énergie particulière. Comme les atomes, les niveaux d'énergie particuliers des noyaux sont caractéristiques de chaque espèce d'atome, de sorte que l'énergie des photons gamma émis, qui correspondent aux différences d'énergie des noyaux, peuvent être utilisés pour identifier les éléments particuliers et des isotopes. La distinction entre les rayons gamma d'énergie légèrement différente est très importante dans l'analyse de spectres qui peuvent être complexes, et la qualité d'un spectromètre est notamment caractérisée par sa résolution en énergie (exactitude avec laquelle l'énergie de chaque photon est mesurée).

Pour le spectromètre gamma à haute résolution, les rayons gamma interagissent avec le détecteur au germanium de haute pureté (HPGe) amenant la production de paires d'électrons étant excités à un niveau plus élevés énergétiquement, laissant un « trou » à son ancien niveau. Cette paire chargée est collectée par un champ électrique appliqué. Un amplificateur amplifie les impulsions de la charge électrique résultant de l'interaction photon gamma. Des analyseurs ou ordinateurs sont utilisés pour séparer et ranger les impulsions selon l'énergie absorbée dans le cristal, (figure.1.32). L'émission gamma par les radionucléides dans l'échantillon est

mesurée dans le taux de comptage selon la région d'énergie caractéristique de ce radionucléide. Des corrections peuvent être apportées pour la contribution d'autres radionucléides.

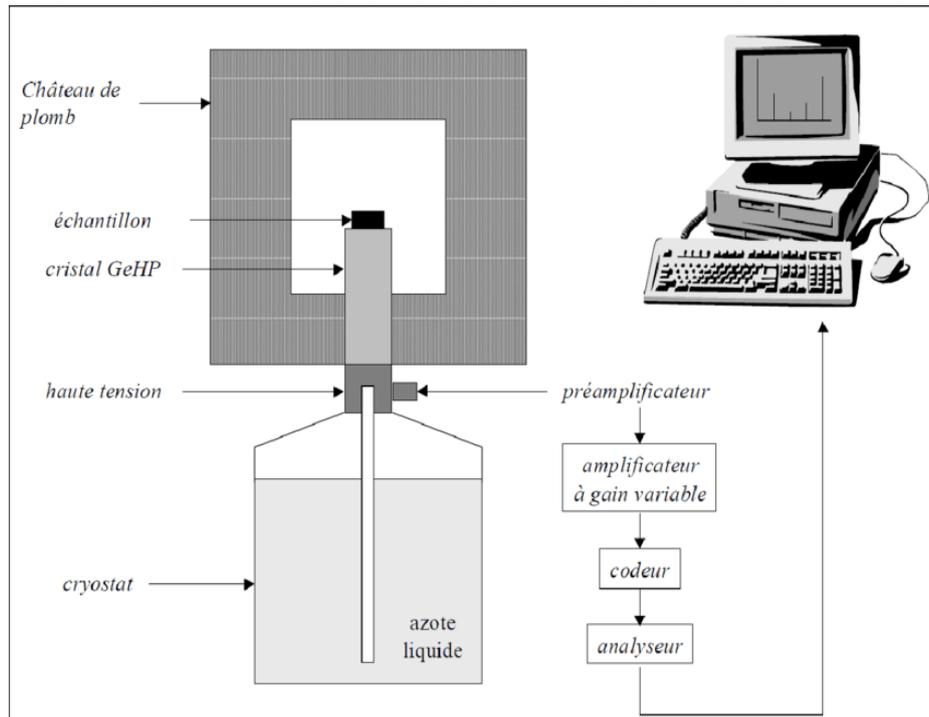


Fig.1.32. Principe d'un Spectromètre Gamma<sup>271</sup>.

Le grand avantage de cette spectroscopie est son habilité à mesurer les émetteurs de rayons gamma directement dans l'échantillon original sans avoir à faire une séparation chimique au préalable. De plus, elle permet une analyse autant qualitative que quantitative des radionucléides de l'échantillon.

Le système de spectroscopie gamma entier comprend, (figure.1.23), un détecteur au germanium avec refroidissement par l'azote liquide, un analyseur multicanal avec un ordinateur correspondant puissant et des logiciels servant à l'interprétation des données et des analyses. Des standards de radionucléides avec la même géométrie que les échantillons sont utilisés.

Le détecteur est construit par conversion d'une face d'un bloc de germanium au type de semi-conducteur opposé par évaporation et diffusion ou par implantation ionique. Sur le bloc, on crée une couche positive sur une face, puis on applique la polarisation inverse sur le détecteur. Cela permettra de créer une couche d'appauvrissement à travers le matériau. Ceci est la base de toute fabrication de détecteur au germanium. L'efficacité relative peut être estimée en divisant le volume actif du détecteur par 4,33. En 2003, le plus grand détecteur au germanium de haute pureté produit était fait de 4,4 kg de germanium avec une efficacité relative de 207,6 %.

Les détecteurs conventionnels HPGe à grand volume sont généralement limités à compter des taux de l'ordre de dix mille coups par seconde, cependant, leur efficacité est limitée pour les

applications à haut débit de comptage. Pour remédier à cette limitation, un nouveau prototype de détecteur HPGe a été conçu en 2015 pour être capable d'atteindre la résolution voulue et avec un taux de comptage de plus de un million de coups par seconde. Les tests de ce premier prototype d'appareil démontrent de bonnes performances de collecte de charge et à faible bruit de fond. Les détecteurs au germanium de haute pureté restent la norme pour la spectroscopie de rayons gamma à haute résolution. L'excellente résolution en énergie que les détecteurs HPGe offrent les rend souvent comme les détecteurs de choix pour les applications aussi diverses que la recherche en physique nucléaire ou l'imagerie médicale. Lorsque l'identification et la quantification des isotopes sont nécessaires, la résolution des détecteurs HPGe minimise certaines incertitudes systématiques. Ceci est particulièrement important dans les cas où les spectres de rayons gamma complexes sont susceptibles d'être rencontrés. Le HPGe est plus adapté pour la surveillance de la radioactivité de plusieurs radionucléides dans les produits provenant des opérations des entreprises du secteur nucléaire que le détecteur à scintillation solide.

Le spectromètre utilisé dans notre travail est du type, Eurisy Measurements brand, model EGPC 200 P17, (figure 1.33), et cela au niveau de IRAMAT, CRP2A.



Fig.1.33. Spectromètre gamma, Eurisy Measurements brand, model EGPC 200 P17.

## 2.12. Caractéristiques physiques

### 2.12.1. Masse volumique spécifique

Elle est définie comme étant le quotient de la masse sèche de l'échantillon sur le volume occupé par la matière solide, sans tenir compte des pores et des capillaires. La mesure de la masse volumique spécifique (masse volumique absolue) des matériaux est obtenue en

utilisant des pycnomètres. Selon la méthode normalisée (NF P18-558).

Le calcul de la masse volumique absolue a été réalisé en appliquant la formule suivante

$$\rho_s = \frac{(M_2 - M_1) \cdot P}{[M_4 + (M_2 - M_1)] - M_3}$$

M1 : La masse du pycnomètre vide

M2 : La masse du pycnomètre + l'échantillon (g)

M3 : La masse du pycnomètre + l'échantillon + toluène (g)

M4 : La masse du pycnomètre + toluène (g)

P : La densité du solvant 0.86g/cm<sup>3</sup>

### 2.12.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est définie comme le rapport de la masse sèche de l'échantillon par son volume en tenant compte des pores et des capillaires. Elle a été obtenue en appliquant la méthode hydrostatique d'un échantillon paraffiné, en suivant les étapes suivantes : Pesée de l'échantillon à l'air ; pesée de l'échantillon paraffiné et pesée de l'échantillon sous l'eau.

Le calcul de la masse volumique apparente a été réalisé en appliquant la formule suivante :

$$\rho_v = \frac{M_s}{[M_{pa} - M_{pt}] - M_p / \varphi}$$

M<sub>s</sub> : Masse de l'échantillon sec (g)

M<sub>pa</sub> : Masse de l'échantillon paraffiné pesé à l'air (g)

M<sub>pl</sub> : Masse de l'échantillon paraffiné pesé sous l'eau (g)

M<sub>p</sub> : masse de la paraffine M<sub>p</sub> = M<sub>pa</sub> - M<sub>s</sub> (g)

ρ<sub>v</sub> : masse volumique apparente de l'échantillon : g/cm<sup>3</sup>

φ : densité de la paraffine : 0,9g/cm<sup>3</sup> La densité de l'eau : 1g/cm<sup>3</sup>

### 2.12.3. Absorption d'eau

L'absorption d'eau reflète la capacité d'un matériau à capter de l'eau dans son réseau de pores. Cette caractéristique est à considérer pour les usages où les éléments qui sont susceptibles d'entrer en contact avec l'eau. Elle est réalisée selon la norme NF P18 554.

Pour déterminer l'absorption d'eau, nous avons appliqué la formule suivante :

$$Abs = \frac{M_d - M_s}{M_s} \times 100\%$$

Avec :

M<sub>s</sub> : La masse de l'échantillon sec

M<sub>d</sub> : masse de l'échantillon saturé d'eau

#### **2.12.4. La porosité totale.**

La porosité totale c'est le volume d'eau que peuvent contenir les interstices d'une roche lorsqu'elle est saturée. C'est la somme de la porosité fermée et de la porosité totale.

Le calcul de la porosité totale s'effectue, avec la formule suivante :

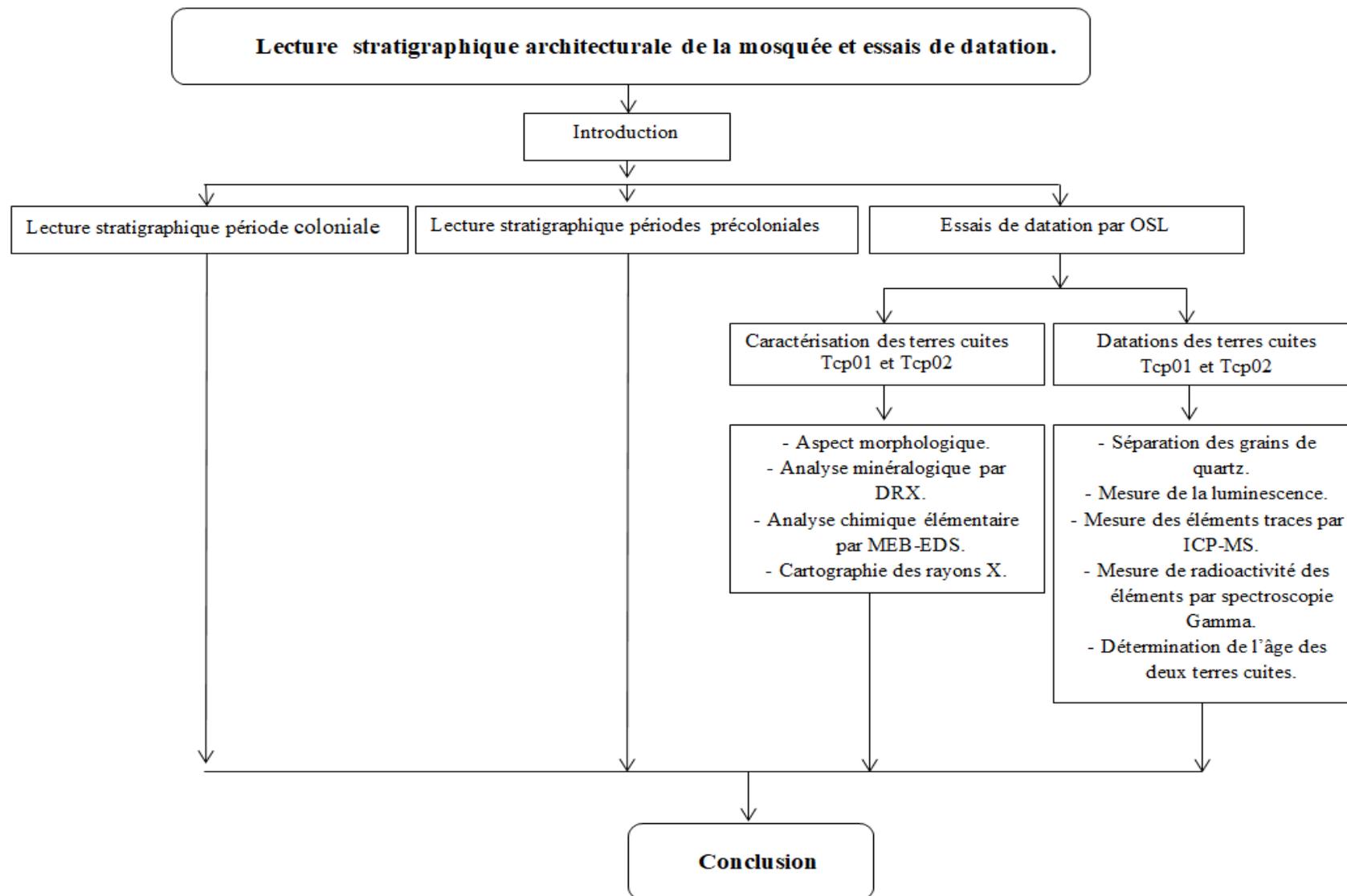
$$P_t = \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_s}\right) \times 100\%$$

**Avec :**

$\rho_s$ : Masse volumique spécifique.

$\rho_v$ : Masse volumique apparente.

**Chapitre 02**  
*Etat de conservation de la mosquée de Sidi  
Ghanem*



## 1. Introduction

Les matériaux mis en œuvre dans les monuments historiques subissent de multiples agressions de la part de leur environnement. Ces agressions se traduisent par divers types d'altérations, dont la nature et l'intensité dépendent de la variété de la roche mise en œuvre, ainsi que de son positionnement sur le monument. Les dégradations sont de quatre types : physiques, chimiques, minéralogique et biologiques. L'action de l'eau est fondamentale dans le développement de ces altérations : elle mobilise les sels solubles, gèle, dissout les minéraux, favorise l'implantation et l'activité des microorganismes, modifie les propriétés mécaniques du matériau (Bromblet et al., 2002a). Ainsi l'eau est, sans aucun doute, l'agent principal d'altération des monuments.

Les altérations prennent des formes variées qui ont été recensées et décrites dans la littérature. On distingue 5 grandes catégories de formes d'altération dans lesquelles sont classées plus de 70 altérations différentes.

- Fissures et déformation (fracture, clivage...)
- Détachement (boursoufflure, éclatement, délitage, désagrégation, fragmentation, pelage, desquamation)
- Figures induites par des pertes de matière (alvéolisation, érosion, dégât mécanique, micro-karst, partie manquante, perforation, pitting)
- Altération chromatique et dépôt (croûte, dépôt, altération chromatique, efflorescence, encroûtement, aspect luisant, graffiti, patine, encrassement, subefflorescence)
- Colonisation biologique (colonisation biologique, algue, lichen, mousse, moisissure, plante)

Dans ce chapitre nous avons fait un inventaire des altérations qui affectent la mosquée de Sidi Ghanem et sa stabilité et les facteurs responsables de ces derniers en commençant par les altérations physiques, mécaniques, biologiques suivi d'une étude détaillée d'un mécanisme physico-chimique de dégradation de la pierre mise en œuvre.

## 2. Etat des lieux et facteurs de dégradations de la mosquée de sidi Ghanem

### 2.1 Facteurs mécanique et instabilité de la maçonnerie :

En règle générale, les constructeurs ont veillé à employer les matériaux les plus résistants dans les parties structurels, en charge, des bâtiments. On voit ainsi bien souvent des assises de soubassement réalisées avec une pierre bien plus compacte que l'élévation au-dessus. Cette compaction est généralement associée à une plus grande dureté superficielle et une porosité réduite, de sorte que les assises de soubassement à la fois supportent parfaitement la charge de la construction, mais constituent aussi une barrière contre les remontées capillaires du sol et offrent une bonne résistance à l'érosion et à l'abrasion.

Cependant, ces pierres particulièrement dures et compactes peuvent malgré tout se fracturer sous l'effet de surcharges locales ou de l'instabilité de la maçonnerie. Elles présentent parfois des discontinuités qui constituent des plans de faiblesse propices à la propagation des fissures et sensibles à l'action des intempéries.

Sur le site de la mosquée de sidi Ghanem nous avons localisé des fissurations liées aux surcharges locales :

Exemple 01 : fissure sur un dé en brique pleine situé au soubassement d'une colonne sur des dizaines de centimètres suite à un effondrement partiel du mur nord, (figure 2.1).

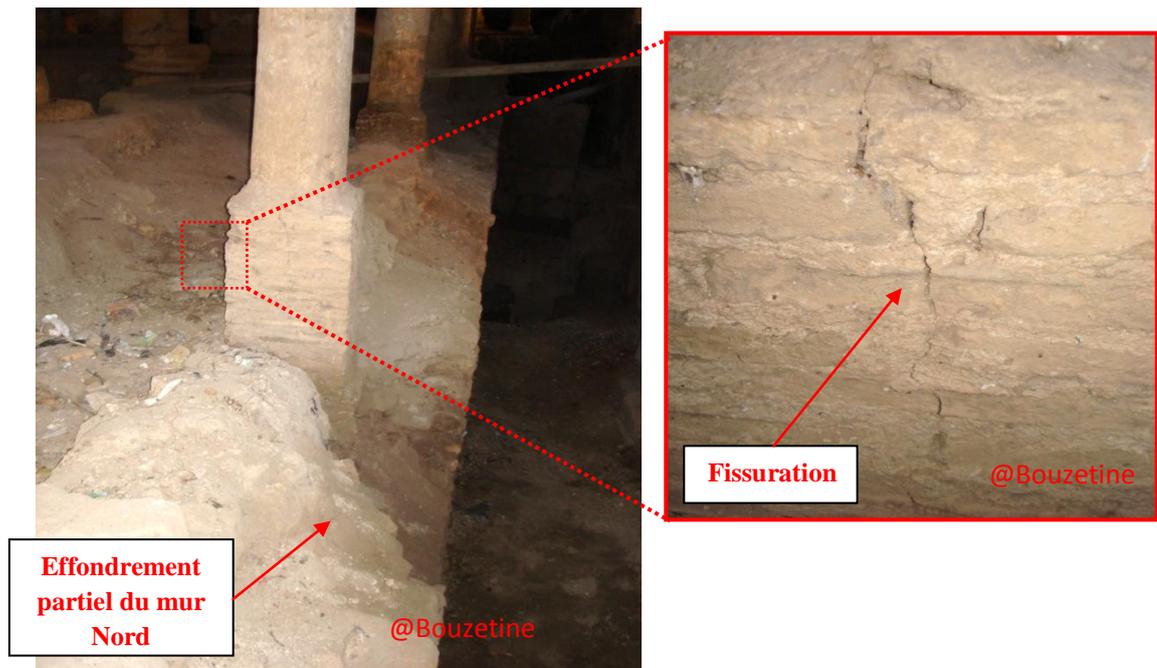


Fig.2.1. Fissuration du soubassement d'une colonne suite à un effondrement du mur Nord.

Exemple 02 : fissures sur des pierres du mur antique sud qui supporte la première ligne de colonnes à cause des charges locales produite par la première et la deuxième colonne , (figure 2.2).



Fig.2.2.Fissure sur les pierres du mur antique Sud.

Ainsi l'instabilité de la structure induit des fissures et des effondrements de la maçonnerie.

Quelques exemples sont donnés ci-dessous, montrent l'effet des charges sur l'effondrement des structures.

Exemple 01 : Fissuration dans la maçonnerie sur l'angle sud-est de la salle de prière, (figure 2.3), qui a induit aussi l'effondrement d'une arcade sur les deux dernières colonnes de la première nef, (figure.2.4).

Exemple 02 : Effondrement du plancher de l'époque coloniale figure, qui surmontent une maçonnerie plus ancienne ce qui a provoqué une charge locale excessive ce qui conduit à la fissuration de l'arc en bas ce qui a induit l'entassement et la fissuration du mur de la façade Est, (figure.2.5).

Exemple 03 : Le cas le plus dangereux et le plus inquiétant qui menace l'édifice de tomber en ruine, est l'instabilité de la structure qui marque un considérable désaxement sur les deux dernières lignes de colonnes provoqué par le poids du plancher rajouté à la mosquée durant l'occupation française, (figure.2.6).



Fig.2.3.Fissuration dans la maçonnerie sur l'angle sud-est de la salle de prière.



Fig.2.4.Effondrement d'une arcade sur les deux dernières colonnes de la première nef.

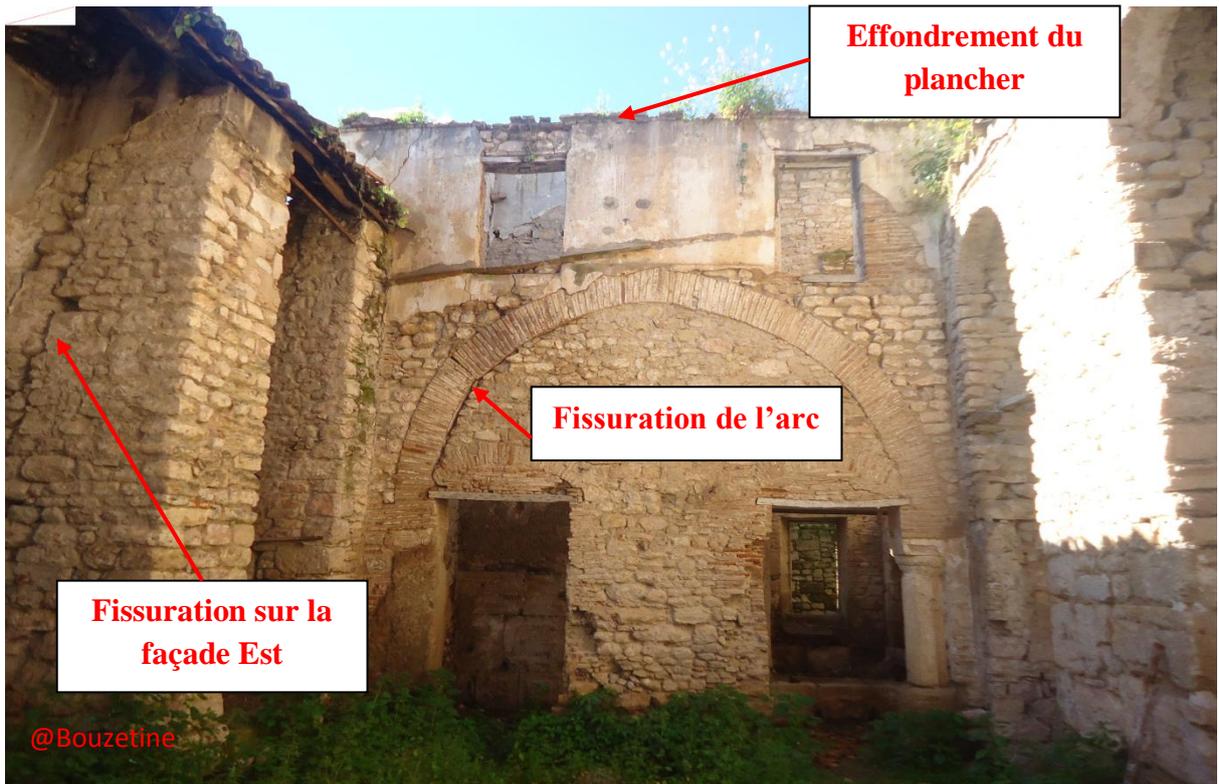


Fig.2.5. Effondrement du plancher, fissuration de l'arc et fissuration de la maçonnerie de la façade Est.



Fig.2.6. Désaxement des colonnes sous le poids du plancher.

## 2.2. Les Remontées capillaires du sol :

L'eau peut monter par capillarité depuis le sol jusqu'à quelques mètres à la base des murs. Une nappe phréatique subaffleurante, un sous-sol mal drainé, une contre-pente malencontreuse induisent la concentration de grands volumes d'eau au pied d'un édifice. Dans ces zones de remontées capillaires, les dégradations sont fréquentes. L'eau imbibe les matériaux qui montrent des taches d'humidité plus ou moins sombres. En se concentrant et en s'évaporant, l'eau permet aussi la cristallisation de sels solubles qui forment des efflorescences, des croûtes salines superficielles et qui, en contaminant plus en profondeur la pierre, sont capables de produire différents types d'altérations : efflorescence des sels sur le mur antique, (figure 2.7) et formation d'une patine au pied du mur Nord, (figure 2.8).



Fig.2.7.Efflorescence des sels sur la surface des pierres du mur antique



Fig.2.8. Formation des plaques sur la surface des pierres du mur Nord

## 2.3. Infiltrations des eaux pluviales à travers les maçonneries :

L'eau des pluies peut s'infiltrer à travers les maçonneries et venir s'évaporer en sous-face des murs en permettant la cristallisation de sels solubles et des dégradations identiques à celles que l'on observe dans les zones de remontées capillaires. Les transferts gravitaires (perméabilité) s'ajoutent aux transferts capillaires sur ces surfaces, (figure.2.9).



Fig.2.9. Infiltration des eaux de pluie à travers le mur Nord de la salle de prière.

#### 2.4. Le manque d'entretien :

Une toiture ou des joints défectueux, des gouttières bouchées ou percées, traduisent un manque d'entretien régulier. Le cheminement des eaux est perturbé et des infiltrations à l'intérieur de la maçonnerie vont inmanquablement se produire. Les eaux attaquent les matériaux et se chargent en sels. Des zones humides plus propices au développement de moisissures des érosions, d'algues peuvent apparaître. Des sels peuvent aussi cristalliser sous forme d'efflorescences ou à l'intérieur des pierres en provoquant des desquamations et des désagréations d'épiderme de la pierre ou le mortier.

Exemples 01 : mauvaise étanchéité de la toiture provoque l'érosion d'un mur d'adobe sous l'effet de ruissèlement des eaux de pluie, (figure.2.10).

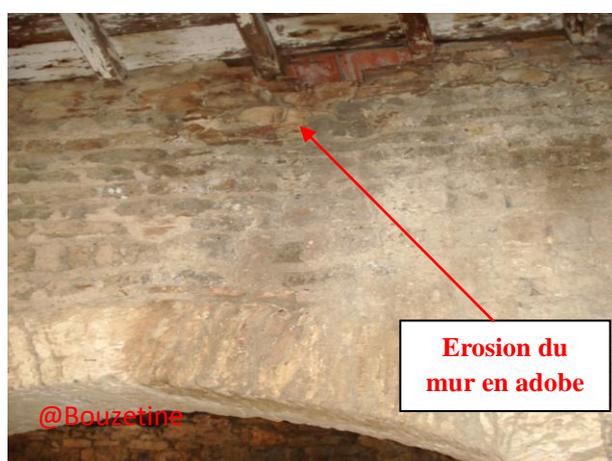


Fig.2.10. Erosion d'une maçonnerie en adobe sous l'effet des ruissèlements d'eau.

Exemple 02 : absence des fenêtres laissant des ouvertures dans les murs permettent la pénétration des eaux de pluie conduisant à une érosion est une désagréation des briques et du mortier de chaux, (figure.2.11).

Exemple 03 : absence d'entretien a permet au végétaux supérieurs de se pousser sur les murs, et la toiture, ce qui peut provoquer des fissures sur la pierre ou sur la maçonnerie, (figure 2.12).

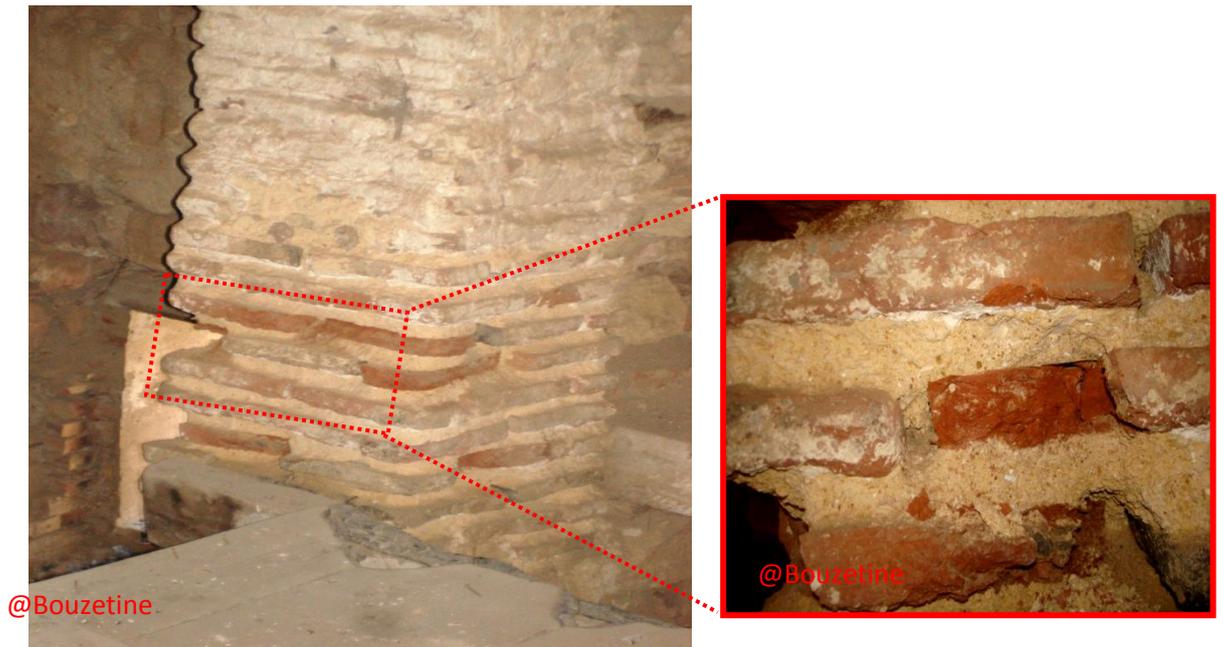


Fig.2.11. Erosion et désagrégation des briques et du mortier de chaux suite aux infiltrations de pluies.



Fig.2.12: présence des végétations du au manqué d'entretien.



Fig.2.13: digestions des pigeons sur la pierre.

### **2.5. Les lichens et les champignons :**

Les lichens sont constitués d'une association complexe entre champignon et algue, l'ensemble formant algues. Ils s'accrochent sur le matériau grâce à leurs racines et forment des recouvrements colorés sur les surfaces humides. Parmi les grands groupes morphologiques de lichens, ce sont les *foliacés* et les *crustacés* que l'on rencontre majoritairement sur les monuments.

Les foliacés forment un recouvrement compact mais superficiel, sans insertion véritable dans la roche. En revanche les crustacés font presque partie intégrante de la pierre. Leurs *rhizines* pénètrent dans les fissures existantes de la pierre ou même en créent d'autres par la production d'acides organiques. Ils sont donc capables d'entraîner à long terme une désagrégation granulaire superficielle.

Globalement, les lichens vont dégrader les supports qu'ils colonisent par émission d'acides organiques.

La présence de ces micro-organismes est très répandue à l'intérieur de la salle de prière vu la présence des conditions favorisant leur développement, (figure.2.14).



Fig.2.14.Présence des lichens sur les pierres aux pieds des murs de la salle de prière.

### **2.6. Les traitements inadaptés :**

Les réparations avec des matériaux incompatibles, par exemple l'utilisation d'un mortier de ciment rigide et compact au contact d'une pierre tendre et très capillaire, les interventions avec des produits avec des effets secondaires néfastes comme du ciment riche en sels solubles, sont des sources fréquentes d'altération (figure.2.15).

L'accumulation d'eau à l'intérieur de la maçonnerie derrière des surfaces de pierres rendues étanches et imperméabilisées par application de produits hydrofuges de surface ou d'enduits étanches peut également engendrer des désordres importants.

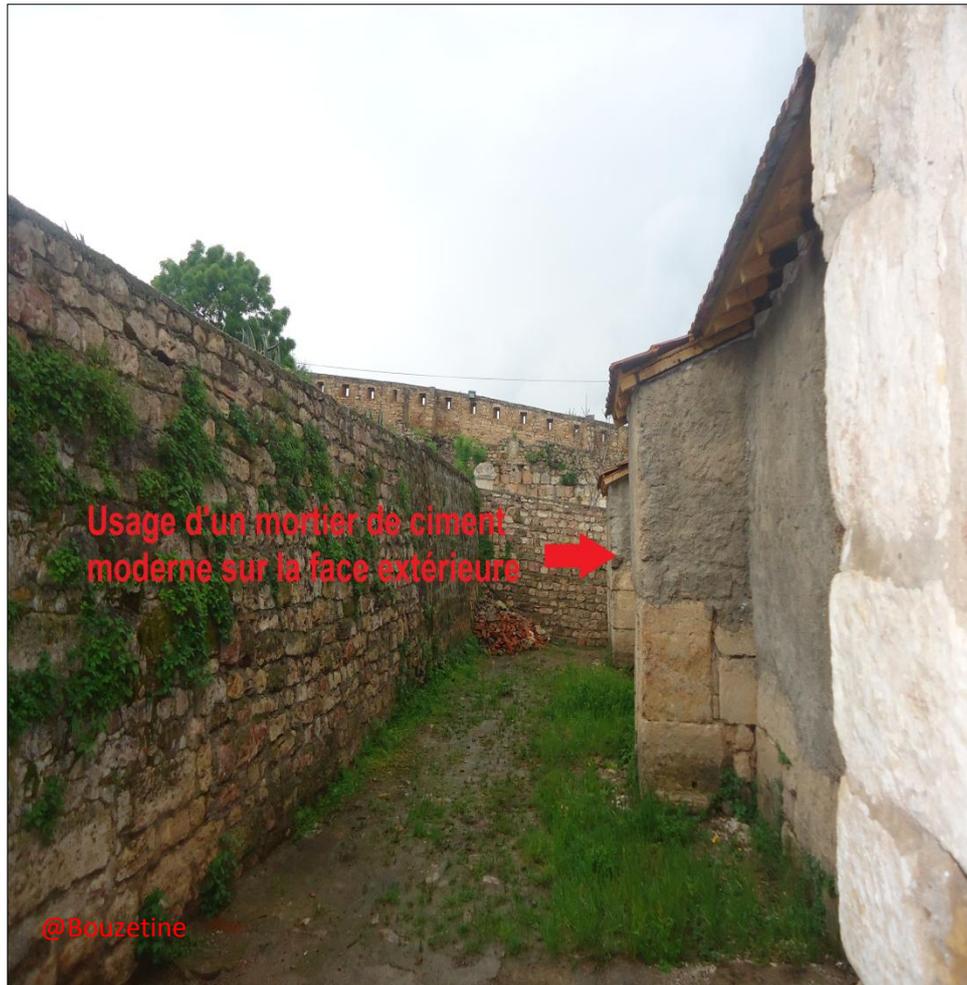


Fig.2.15. Utilisation du ciment moderne sur la façade extérieure de la mosquée.

## 2.7. Altération physico-chimique :

La pierre monumentale subit au fil du temps et sous l'exposition aux agents atmosphériques des mécanismes physico-chimiques générant des altérations. Ces altérations détruisent l'épiderme des monuments, et à terme, elles peuvent affecter la structure porteuse et sa stabilité. Dans cette partie de travail nous avons étudié l'influence de la séquence (humidification /séchage) sur l'altération de la pierre calcaire de la mosquée de Sidi Ghanem, une caractérisation morphologique, pétrographique, minéralogique, chimique et petrophysique a été faite sur la pierre, des mesure de la température et de l'humidité à l'intérieur de la mosquée pendant une année par des thermo-hygro-bottons suivi d'un test de vieillissement par des cycles de (humidification /séchage) sur la pierre non altérée afin de mettre en évidence les facteurs responsables.

### 2.7.1. Description de la forme d'altération :

Cette altération se présente sous forme d'une patine, une couche colorée avec une teinte marron - orangée, peu résistante au touché et friable avec une profondeur de 2 à 5 cm (figure 2.16 et 2.17).

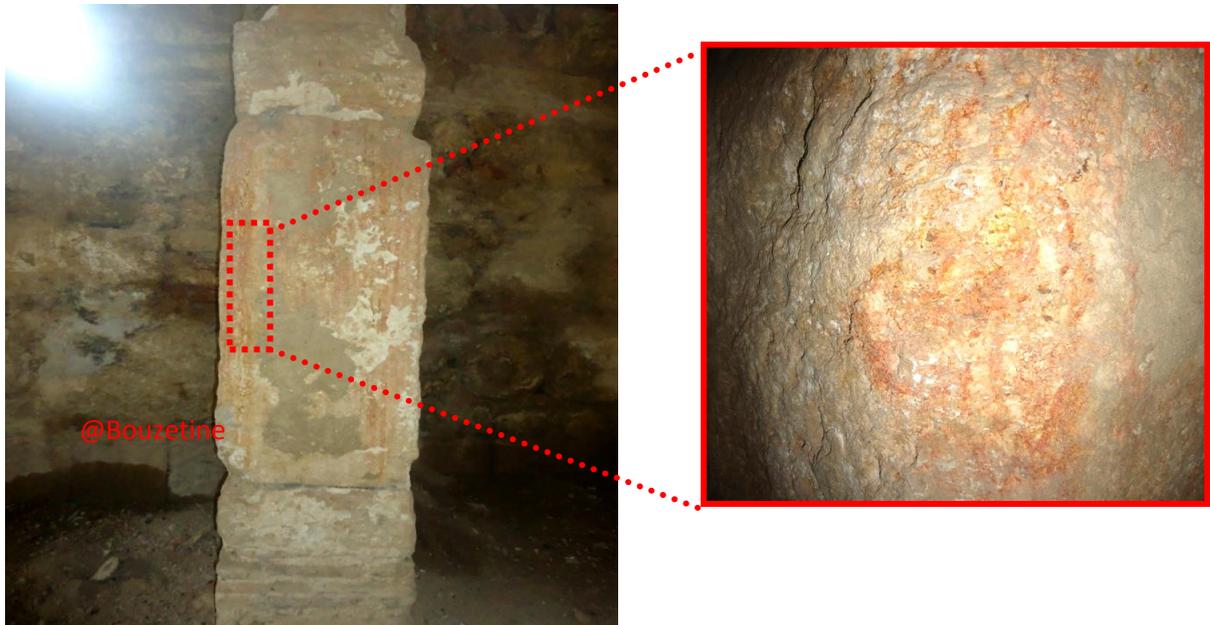
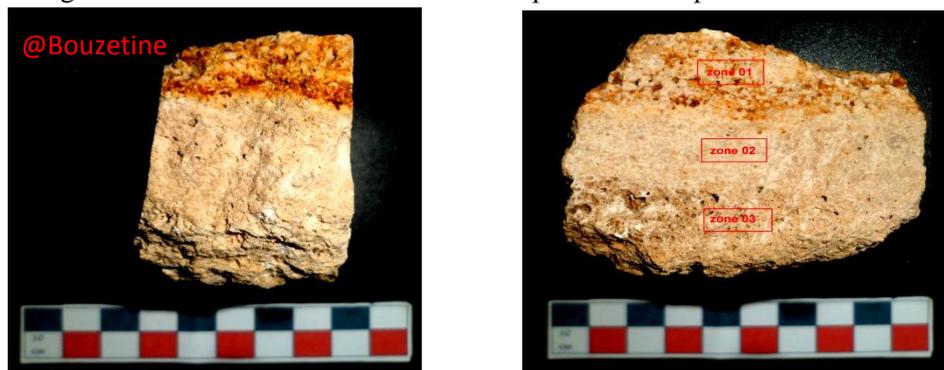


Fig.2.16. Pilier à l'intérieure de la salle de prière touché par cette altération.



*Vue de face*

*Vue de profil*

Fig.2.17. Vue de face et vue de profil d'une pierre altérée.

Sur la section polie, (figure.2.18), Nous constatons qu'il y a 03 zones :  
Nous l'avons découpé suivant ces zones : zone 01, zone 02 et zone 03, chacune de ces zones a subi une série d'analyses : observation sous loupe binoculaire, analyse pétrographique sur lame mince, analyse minéralogique par diffraction X, analyse chimique par fluorescence X et analyses pétrophysique.

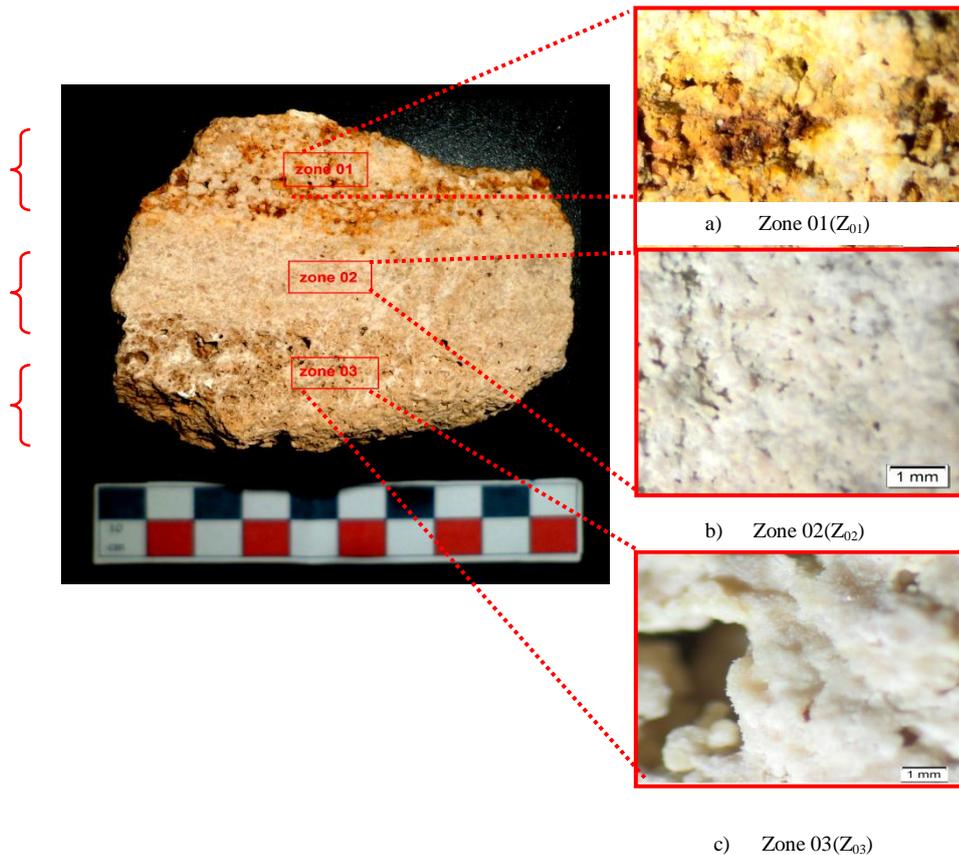


Fig.2.18.Représentation d'une section polie montrant les différentes zones.

### 2.7.2 Observation sous loupe binoculaire :

#### Zone 01 :

Caractérisée par une couleur marron- orangée ressemble à la rouille, avec la présence de certains macrospores.

#### Zone 02 :

Caractérisée par une couleur beige claire et une structure plus compacte.

Zone 03 : Caractérisée par une couleur beige claire et une structure moins compacte que la zone 02 avec la présence de certaines macrospores.

**2.7.3 Examen pétrographique sur lames minces :** la confection des lames minces est réalisée selon la norme NF EN 12407 (2000),

#### Zone 01 : Z<sub>01</sub>

La roche est une roche calcaire micritique fortement recristallisé de structure microsparithique de teinte sombre fortement contaminé par des impuretés pélitiques de nature ferrugineuse très fines de fer forment par endroit des accumulations se présentant sous l'aspect de taches de rouilles ,(figure.2.19)

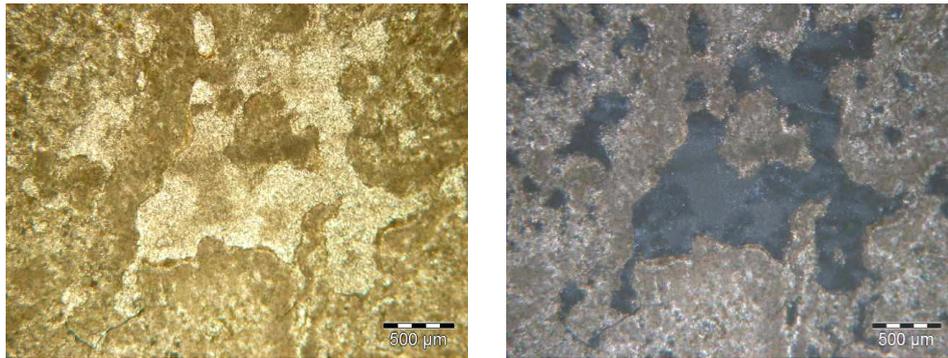


Fig.2.19. Zone  $Z_{01}$  sous microscope polarisant en LP à gauche et LPA à droite.

**Zone 02 :  $Z_{02}$**

La roche est de nature calcaire micritique fortement recristallisé de structure microsparithique de teinte sombre. Par ailleurs on remarque que cette matrice micritique a subit une intense cristallisation en plus grands cristaux de calcite développant par endroits des amas irréguliers se présentant- en lame mince sous l'aspect de taches claires. Ces amas sont formés par des assemblages de petits cristaux polygonaux de calcite de couleurs blanchâtre agencés suivant une structure de mosaïque, (figure.2.20).

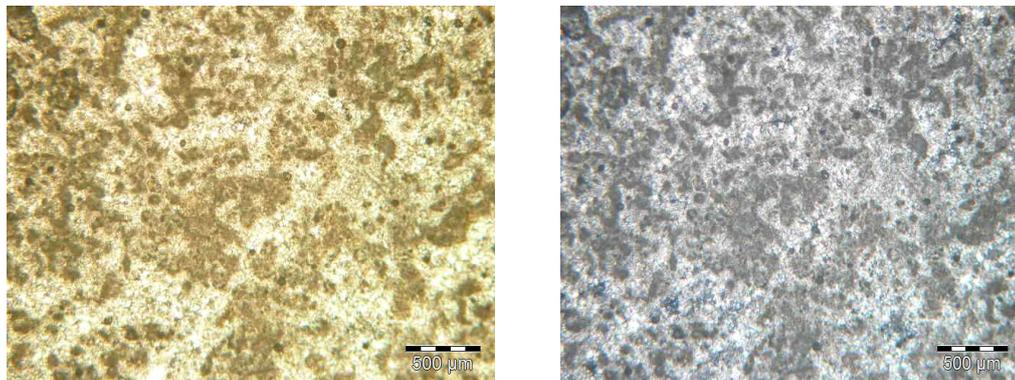


Fig.2.20.Zone  $Z_{02}$  sous microscope polarisant en LP à gauche et LPA à droite.

**Zone 03 :  $Z_{03}$**

La roche est une roche calcaire micritique fortement recristallisé de structure microsparithique de teinte sombre. La matrice micritique a subit une intense cristallisation. La recristallisation dans cette partie s'est opérée à un degré plus intense par rapport aux zones  $Z_{01}$  et  $Z_{02}$ , (figure 2.21)

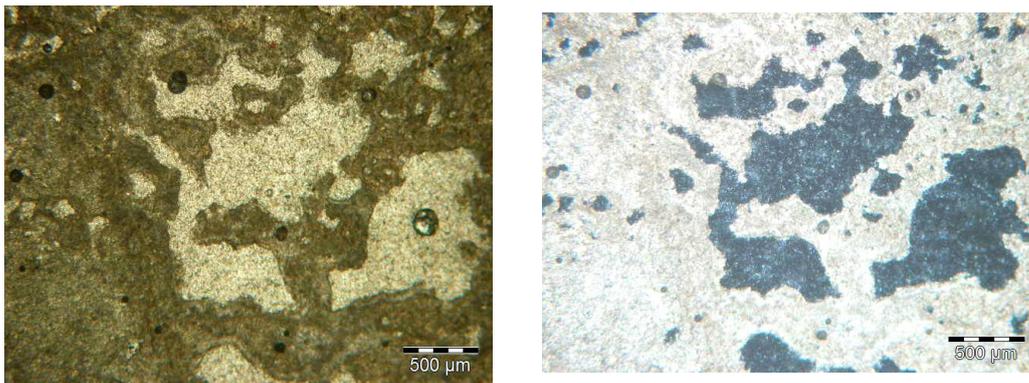


Fig.2.21.Zone  $Z_{03}$  sous microscope polarisant en LP à gauche et LPA à droite.

#### 2.7.4 Analyse minéralogique par diffraction X :

Les résultats de l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, montre que la calcite est le constituant unique de ces trois Zones analysées, (figure.2.22), (figure.2.23) et (figure.2.24).

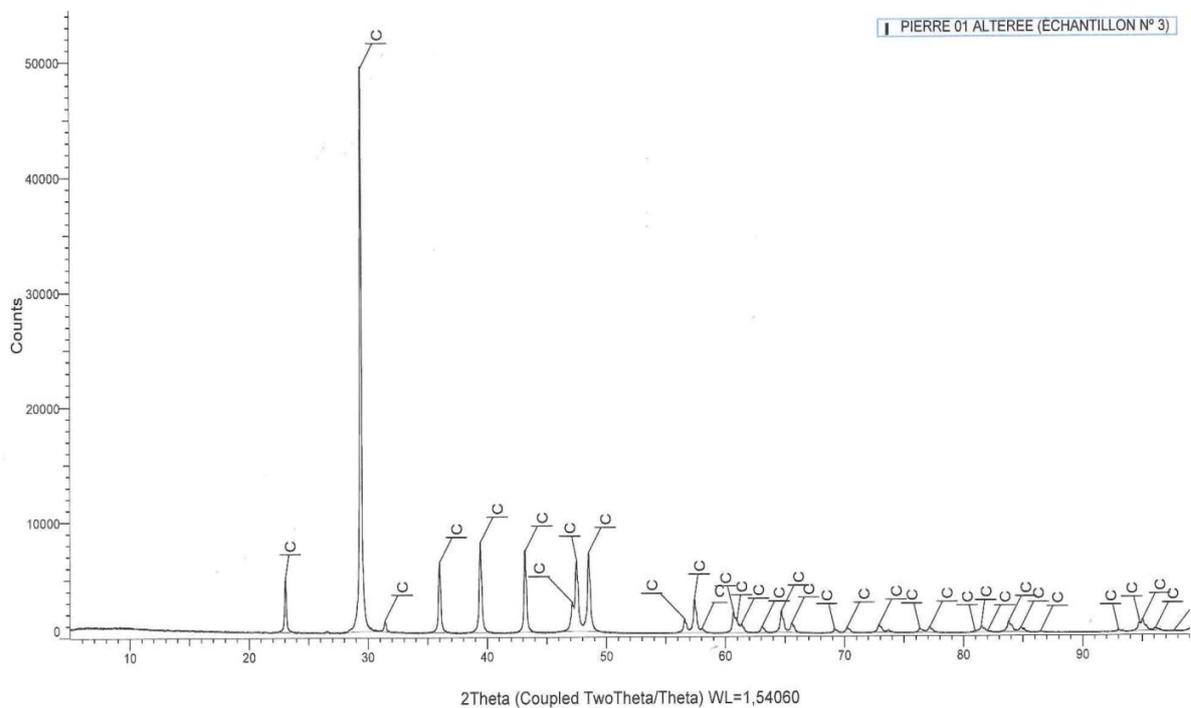


Fig.2.22. Analyse minéralogique par DRX sur la Zone  $Z_{01}$ .

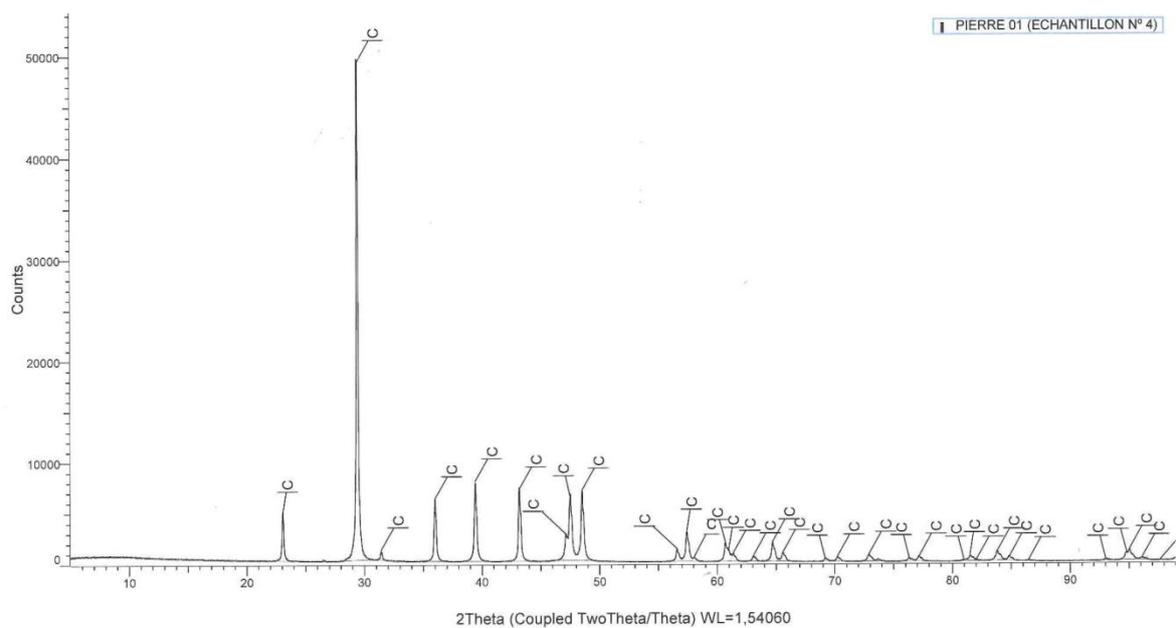


Fig.2.23. Analyse minéralogique par DRX sur la Zone Z<sub>02</sub>.

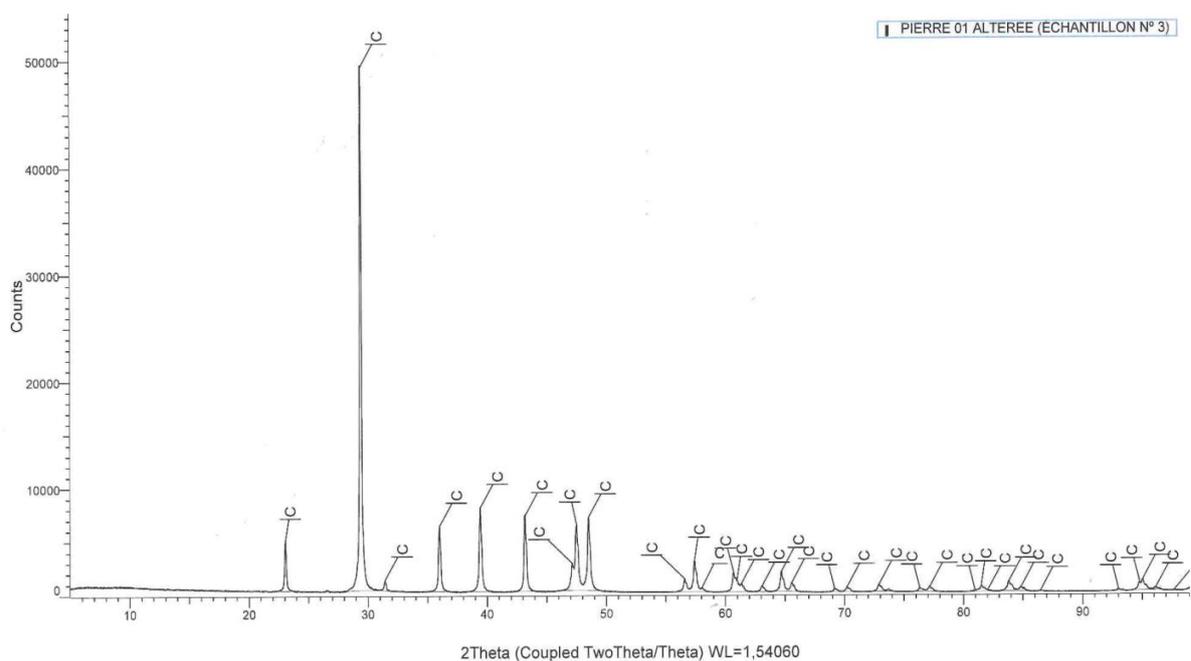


Fig.2.24. Analyse minéralogique par DRX sur la Zone Z<sub>03</sub>.

### 2.7.5 .Analyse chimique par fluorescence X :

L'analyse chimique par fluorescence X, est réalisée par la méthode de la perle au Borax les résultats sont présentés dans le tableau.2.1. Les résultats montre et confirme que nos enchantions sont composés principalement par la calcite, avec la présence en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui est un peu plus élevée dans le Z<sub>01</sub> et le Z<sub>03</sub>.

Tableau.2.1.Résultat de l'analyse chimique.

Oxyde	Z <sub>01</sub> en (%)	Z <sub>02</sub> en (%)	Z <sub>03</sub> en (%)
CaO	55,4	55,1	55,5
MgO	0,21	0,47	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74	0,03	1,08
SiO <sub>2</sub>	0,18	0,41	0,13
SO <sub>3</sub>	0,17	0,16	0,17
Na <sub>2</sub> O	0,14	0,13	0,12
SrO	0,08	0,08	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,01	0,04
ZnO	0,01	-	0,01
TiO <sub>2</sub>	-	-	-
MnO	-	-	-
Perte au feu (1000°C)	43,3 %	43,5%	42,6 %

### 2.7.6. Caractéristiques pétrophysique :

La porosité totale d'une pierre est définie comme le rapport du volume des vides sur le volume total de la pierre. Cette grandeur est exprimée en pourcentage.

$$N_{\text{tot}} = 100 \times \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}} = 100 \times \frac{(V_{\text{total}} - V_{\text{solide}})}{V_{\text{total}}}$$

Elle peut aussi s'exprimer en fonction de la densité apparente sèche  $\rho_a$  qui représente la masse des minéraux rapportée au volume total de la pierre et de la densité du squelette solide  $\rho_s$  qui représente la masse des minéraux rapportée au volume total des grains

$$N_{\text{tot}} = 100 \times \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)$$

La porosité totale et les différentes densités peuvent être mesurées par la méthode de la pesée hydrostatique qui est fondée sur le principe de la poussée d'Archimède sur un échantillon poreux saturé sous vide et immergé dans l'eau. Les pierres sédimentaires ne possédant pas ou peu de porosité occluse, la porosité accessible à l'eau sous vide correspond à la porosité ouverte du matériau. Les éprouvettes sont mises à sécher à l'étuve à 105°C pendant 24 heures jusqu'à un poids constant, puis pesées ( $M_s$ ). Une fois refroidies elles sont placées dans une enceinte reliée à une pompe à palette qui permet d'obtenir un vide primaire (environ 0,1 hPa) entretenu pendant 24 heures. Parallèlement, dans une seconde enceinte reliée à la première, et désaérée pendant 6 heures.

Ensuite, l'eau est admise dans la première enceinte où l'imbibition sous vide des éprouvettes a lieu. Le niveau d'eau est ajusté de sorte qu'il ne dépasse jamais la frange capillaire. Les éprouvettes restent alors immergées pendant une journée supplémentaire. Ensuite, une

pesée hydrostatique des éprouvettes saturées immergées dans l'eau ( $M_{hyd}$ ) est effectuée ainsi qu'une pesée à l'air des échantillons saturés essuyés avec un chiffon humide ( $M_{sat}$ ). La densité de l'eau étant égale à 1, les différentes densités et la porosité totale sont calculées de la façon suivante :

$$\rho_a = \frac{M_s}{\rho_{eau}(M_s - M_{hyd})}$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{\rho_{eau}(M_{sat} - M_{hyd})}$$

$$N_{tot} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{hyd}}$$

Les résultats sont représentés sur le tableau.2.2

Tableau.2.2.Résultats d'analyses petrophysique

	<b>Z<sub>01</sub></b>	<b>Z<sub>02</sub></b>	<b>Z<sub>03</sub></b>
<b>Masse volumique <math>\rho_a</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	01.56	01.94	<b>01.61</b>
<b>Porosité totale <math>P_t</math> en %</b>	28.10	10,33	<b>24.48</b>
<b>Absorption d'eau en %</b>	<b>17.60</b>	<b>05.23</b>	<b>20,11</b>

Les résultats montre que : pour les deux échantillons  $Z_{01}$  et  $Z_{03}$  les valeurs de la masse volumique sont faibles (1.56 et 1.61 respectivement) par rapport à  $Z_{02}$  qui est de l'ordre de 1.94 g/cm<sup>3</sup>; la porosité totale est de (28.1 et 24.48 respectivement pour  $Z_{01}$  et  $Z_{03}$ ) et l'absorption d'eau (17.60% et 20,11% respectivement pour  $Z_{01}$  et  $Z_{03}$ ) et qui sont plus élevée par rapport à  $Z_{02}$  qui est plus compacte caractérisée par des valeurs nettement inférieures qui sont 10.33 % pour la porosité et 05,23% pour l'absorption d'eau. D'après ce que nous avons vu sur la pétrographie la chimie et les caractéristiques petrophysique nous pouvons conclure que chacune des trois zones étudiées  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$  et  $Z_{03}$  représente une couche stratigraphique de formation géologique différente

**2.7.8. Mesure de la température et de l'humidité à l'intérieur de la mosquée :** Le thermohygro-bouton est fixé sur un pilier à l'intérieur de la salle de prière, (figure.2.25) ce dernier fait un contrôle de l'humidité et de la température chaque 02 heures sur une période de 12 mois de l'année 2018. Les résultats sont présentés sur la (figure.2.26) et la (figure.2.27).

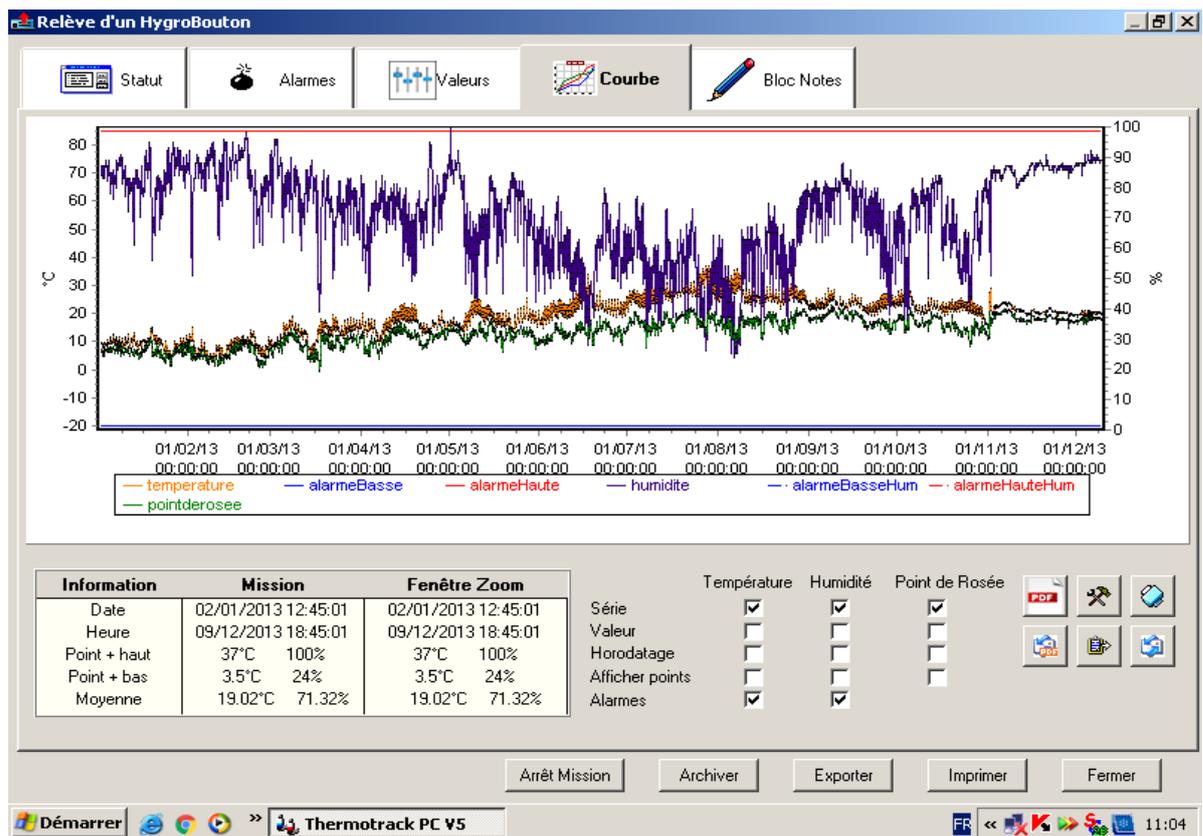
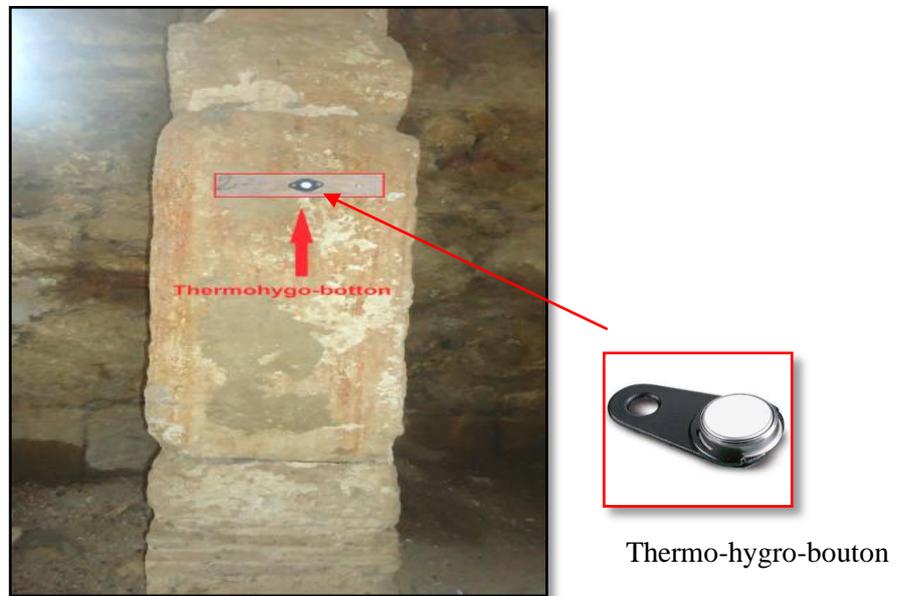


Fig.2.26.Résultats de prélèvement de thermo-hygro-bouton.

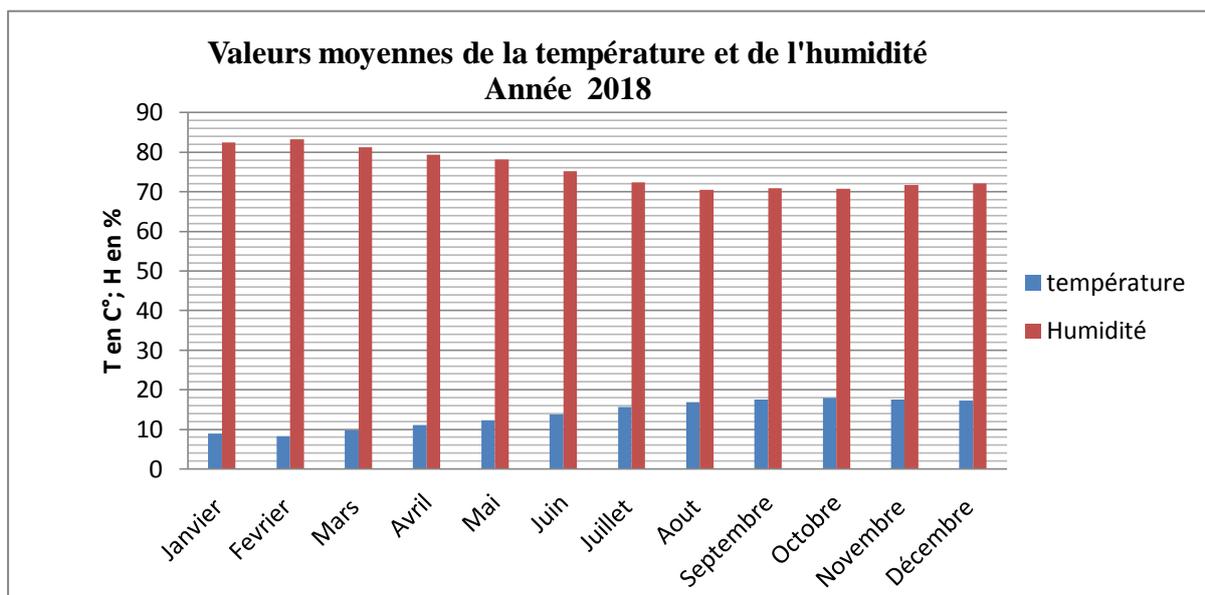


Fig.2.27. Valeurs moyennes de la température et de l'humidité, Année 2018.

Nous remarquons sur la (figure.2.27) que la valeur maximale et minimale de la température enregistrée est de 37.5 °C contre 3,5°C et de 100% contre 24 % d'humidité avec l'enregistrement de plusieurs points de condensation point de rosé (courbe de température et ces points de condensation affichés pour les mois de décembre, janvier, février et mars.

Donc nous pouvons conclure que la pierre de la mosquée de sidi Ghanem subit un régime de variation importante ce qui fragilise les matériaux et induit des dégradations et effondrement de la structure.

La composition lithographique seule ne peut pas expliquer la formation de cette patine car les deux zones  $Z_{01}$  et  $Z_{03}$  ont pratiquement une composition similaire sauf que la zone  $Z_{01}$  est exposée aux agents atmosphériques (humidité et température) beaucoup plus que la zone  $Z_{03}$ . Pour cela nous avons testé l'humidité et séchage pour la zone  $Z_{03}$  par une simulation de vieillissement par des cycles de (humidification / séchage) et voir l'influence de cette séquence sur la zone  $Z_{03}$ .

## 2.8. Essai de vieillissement :

L'échantillon a subi des cycles imbibition-séchage avec utilisation d'eau pure afin de voir l'effet de la simple eau pure sans aucun polluant ajouté (eau distillée).

L'imbibition est réalisée avec de l'eau distillée jusqu'à saturation complète de l'échantillon à pression atmosphérique et le séchage est réalisé dans une étuve à 50°C, le temps de

séchage est d'environ 24 heures, les résultats sont montrés sur les (figures.2.28, 2.29 et 2.30). de l'échantillon pierre (P<sub>A</sub>) des deux faces

Nous remarquons qu'après 50 cycles d'imbibition - séchage, les taches de rouilles commencent à apparaître et après 100 cycles la corrosion devient de plus en plus importante qui touche la partie inférieure c-a-d la zone Z<sub>03</sub>

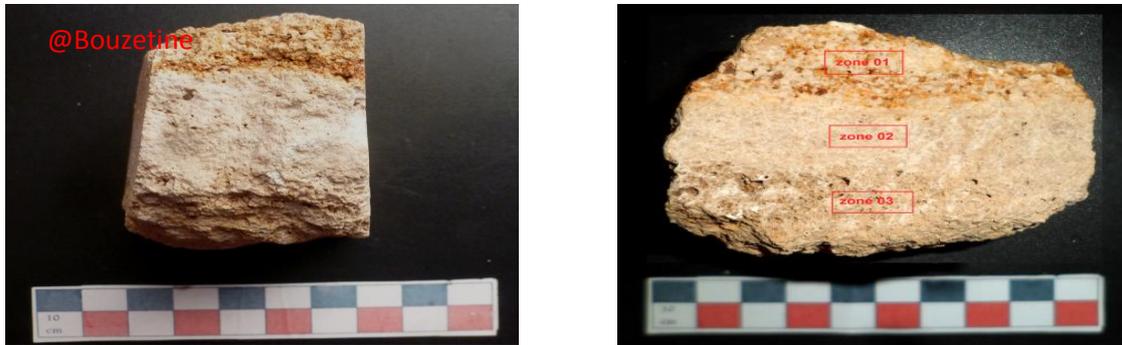


Fig.2.28.Echantillon de départ.



Fig.2.29.Echantillon après 50 cycles.

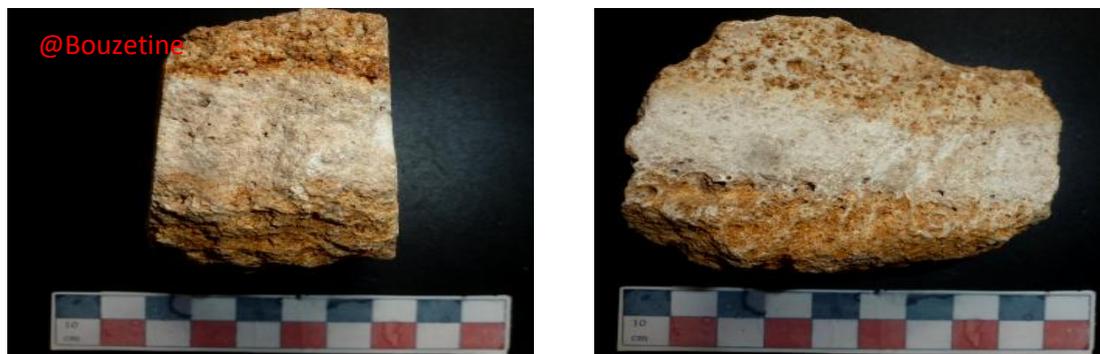


Fig.2.30 : L'échantillon après 100 cycles.

### 2.8.1. Résultats et discussion :

L'apparition, la répartition et la croissance de la corrosion sur la pierre mise en œuvre dans l'édification de la mosquée de Sidi Ghanem dépend de la nature même de la pierre un paramètre intrinsèque liée à la formation géologique et à la composition lithographique de cette dernière ; traduit par teneur variable en oxyde de fer qui se transforme en hydrate ferrique qui forme un complexe de la rouille ; cette formation de la rouille est observée sur la zone  $Z_{01}$  au départ à cause de son contact avec l'air humide et la température c'est-à-dire à l'atmosphère le facteur externe qui favorise cette réaction, la zone  $Z_{02}$  ne présente pas de signe de corrosion car sa teneur en oxyde de fer est presque nulle, la zone  $Z_{03}$  ne présente aucun signe de corrosion à cause de la compacité élevée de la zone  $Z_{02}$  qui n'a pas permis à l'eau de la traverser pour arriver à la zone  $Z_{03}$ , mais par la suite de son exposition à l'humidité et au séchage, la circulation libre de l'eau dans le réseau poreux de la zone  $Z_{03}$  a conduit au même phénomène de corrosion.

## 3. Les travaux de sauvegarde

### 3.1 Stabilisation du terrain par la chaux :

Utilisée depuis des millénaires, cette technique consiste à mélanger la terre avec un liant, qui en modifie les propriétés mécaniques. L'action de la chaux sur l'argile la fait passer d'un état plastique à un état pulvérulent, ce qui en facilite le compactage et donc la stabilisation. Une fois le sol compacté, des réactions chimiques se poursuivent pendant des années en libérant des particules qui jouent le rôle de liant et agglomèrent les composants du sol, (figure.2.31).



Fig.2.31. Stabilisation du terrain par la chaux.

### 3.2 Protection des puits de fouilles contre l'effondrement :

Les fouilles archéologiques opérées dans le sol de la mosquée, ont engendrées des puits, profonds de 2,00 mètres et larges de 2,50 et plus par endroit ils découvrent toute la longueur du mur. Ces puits ont été nettoyés et stabilisés par la mise en place d'un coffrage en bois pour renforcer les parois afin d'éviter leurs effondrement qui aggraverai l'instabilité de la structure, figure.(2.32 et 2.33).

Ces opérations ont touché tous les puits de fouille à l'intérieur de la salle de prière, mais il était préférable d'utiliser des châssis en aluminium et des plaques de verre transparents et épais afin de laisser les fondations et la stratification visible par les visiteurs et les futures études sur cette mosquée.



Fig.2.32.Protection par des panneaux en bois du puit Sud.



Fig.2.33.Protection du puit central de la salle de prière.

### 3.3 Travaux d'étanchéité :

Des travaux d'étanchéité de la toiture ont été entrepris, sur les parties endommagées de cette dernière, (figure.2.34).



Fig.2.34.Réfection de la toiture endommagée.

### 3.4 Réfection des maçonneries endommagées :

Réfection d'une maçonnerie en adobe endommagée par une maçonnerie en brique pleine, reliées par un mortier de chaux, (figure.2.35).



Fig.2. 35. Maçonnerie refaite par la brique pleine et le mortier de chaux.

### 3.5. Consolidation des maçonneries:

Les maçonneries fissurées ont été consolidées par un mortier de chaux, les pierres manquantes ont été remplacées par d'autres pierres de même nature qui sont très abondantes sur le site, (figure.2.36).

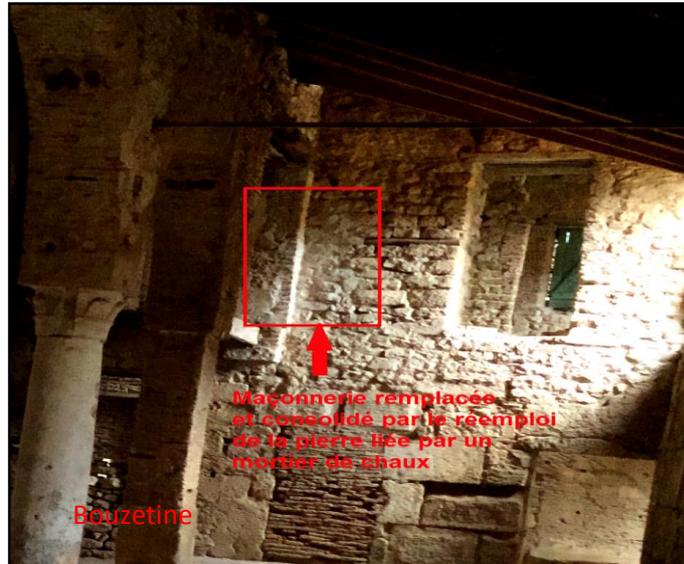


Fig.2.36.Consolidation des parties endommagées par la pierre et le mortier de chaux.

### 3.6. Mise en place des portes et des fenêtres :

L'opération de mise en place des portes et des fenêtres vise à empêcher les eaux de pluies de pénétrer à l'intérieure de la salle de prière ainsi que les différents oiseaux comme les pigeons qui ont un effet néfaste sur le monument, (figure.2.37).



Fig.2.37.Mise en place des portes et des fenêtres.

### **3.7. Opération de désherbage :**

Une opération de désherbage a été réalisée sur le site et au périmètre de la mosquée afin d'éliminer les végétaux supérieures, un revêtement en gravier 15/25 mm a été appliqué tout autour du périmètre extérieur de l'enceinte afin de ralentir le développement de ces dernières, (figure.2.38).



Fig.2.38.Opération de désherbage et d'entretien du site.

Malgré les multiples interventions menées par le bureau d'étude pour conserver et protéger la mosquée de Sidi Ghanem, il reste encore des travaux à faire. Nous avons dans la suite de ce travail proposé quelques recommandations qui complètent les travaux réalisés afin de mieux protéger cette mosquée.

### **4. Recommandations :**

#### **4.1 Stabilisation de la structure :**

On retrouve dans la mosquée de Sidi Ghanem 45 piliers et colonnes tous différents les uns aux autres.

La fixation d'un élément « passerelle » sur toute une travée accrochées aux différents piliers et colonne par des éléments de profilé métallique ancrés de plein dans le corps de la colonne. Sous le phénomène de poids de la passerelle, les effets de traction qui engendrent les profilés métalliques, et l'utilisation de la passerelle comme circulation horizontale, entraînent des micros déplacements fréquents qui causent des déséquilibres des structures piliers et colonnes. La disparition de la majorité des tirants, qui ont pour rôle, le maintien de la stabilité face à l'écartement.

Pour stabiliser la structure actuelle il faut éliminer cette passerelle en remettant en place tous

les tirants manquants ou endommagés, (figure.2.39).

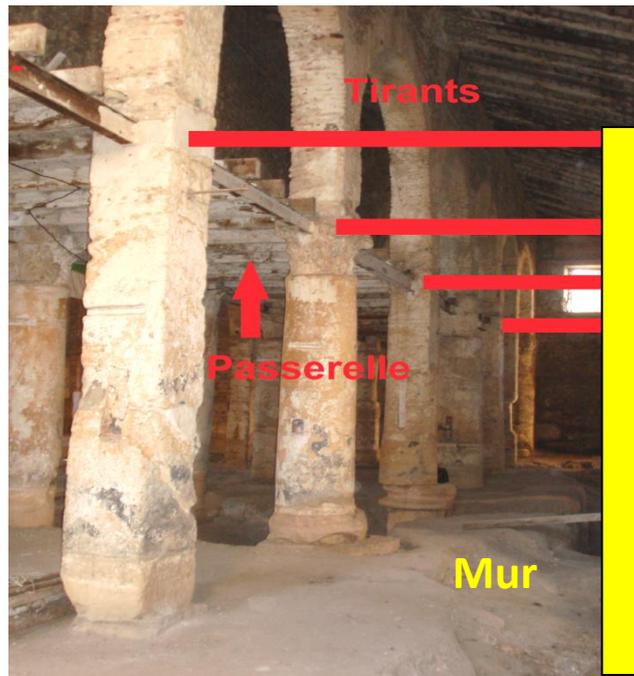


Fig.2.39.La passerelle et une partie des tirants manquants.

#### 4.2. Lutte contre les remontées capillaires par une barrière étanche

L'idée est de créer une coupure de capillarité, chimique ou mécanique, une quinzaine de centimètres au-dessus du sol. Elle doit être continue d'un bout à l'autre des murs. La méthode chimique consiste à injecter dans une série de forages un produit hydrophobe à base de gels acrylamides, de résines époxydes, de silicates de sodium ou de potassium, de silicones... Selon l'épaisseur des murs, l'injection s'effectue d'un seul côté ou des deux, (figure.2.40).

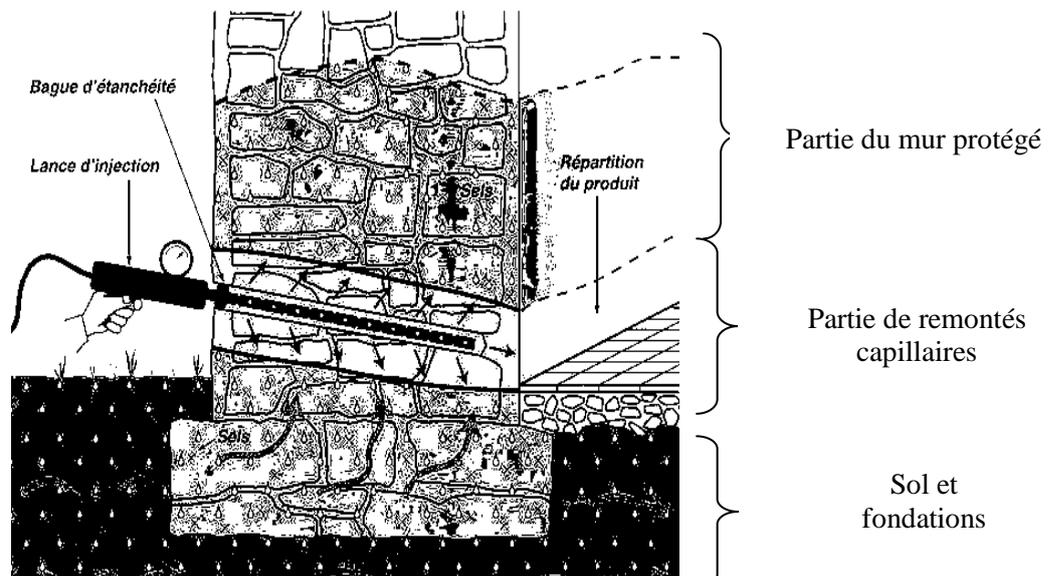


Fig.2.40.Schéma de procédé de traitement des remontées capillaires par une barrière étanche.

#### 4.3. Les infiltrations des eaux:

L'hydrofugation a pour but d'empêcher le passage de l'eau liquide à travers la surface de la pierre. Elle doit être envisagée uniquement sur la maçonnerie subie des dégradations causées de façon certaine par les eaux. Il est vrai que la présence d'eau est le principal facteur de dégradation des pierres car elle transporte les sels solubles, permet les colonisations biologiques, le gel, les dissolutions sous les pluies et les ruissellements...

Les produits hydrofuges modernes ne sont pas des bouche-pores mais agissent en modifiant les propriétés superficielles des minéraux de la pierre. Ce sont des polymères de la famille des silicones ou des résines acryliques fluorées. Ils rendent leur surface non mouillante en diminuant l'énergie de surface et la tension superficielle. Les produits sont très dilués (en phase aqueuse ou solvantée), et la proportion de matière introduite dans la porosité du matériau est faible, inférieure à 10%.

#### 4.4. Le traitement biocide :

Malgré la présence des colonisations de champignons et des lichens, (figure.2.41), aucun traitement n'a été appliquée afin d'éliminer ces microorganismes néfaste pour la pierre. Nous recommandons un rapide traitement biocide, Les produits les plus employés sont des sels d'ammonium quaternaire (Bromblet et all). Ils ne laissent pas de sels solubles résiduels. Les tests d'efficacité sont réalisés systématiquement en laboratoire pour sélectionner le produit le plus performant au cas par cas. L'eau de Javel, l'eau oxygénée qui ont été employées dans le passé ne sont plus préconisées car leur utilisation présente de graves inconvénients (production de sels solubles, de taches...).



Fig.2.41. Colonisation des micro-organismes à l'intérieur de la salle de prière.

Après la sélection du produit adéquat on précède comme suit :

- Eliminer le maximum de dépôts par brossage à l'eau chaude si possible,
- Réaliser le traitement par temps sec pour éviter une dilution dans l'eau de pluie,
- Respecter les taux de dilutions indiqués par le fabricant,
- Effectuer le traitement par pulvérisation ou au pinceau, pendant 2 à 3 jours consécutifs à raison d'une application par jour,
- laisser agir le produit au moins 4 à 5 semaines pour une action complète,
- vérifier que les recouvrements sont bien desséchés avant de les éliminer par brossage, sinon renouveler le traitement.

## 5. Conclusion :

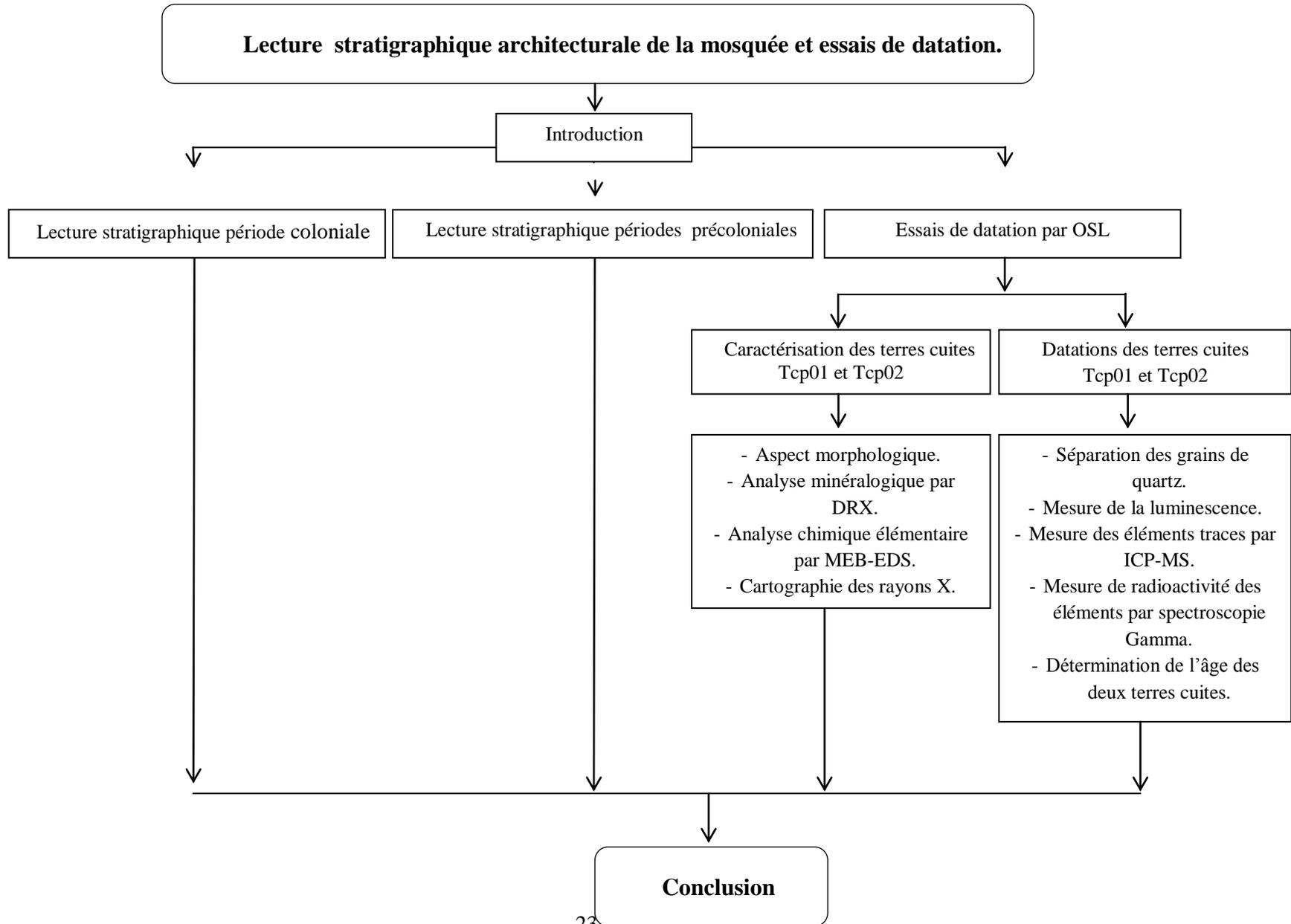
D'après le constat sur l'état de conservation de la mosquée de Sidi Ghanem nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La mosquée se trouve dans un état de conservation médiocre, les mesures préventives prises ne couvrent pas tous les aspects de la conservation, notamment les remontées capillaires qui induit la dégradation de la pierre calcaire, absence des traitements biocides qui favorise le développement des micro-organismes qui trouve un climat très favorable en présence des remontées capillaires.
- L'altération identifiée sur la pierre de la mosquée de Sidi Ghanem, est une altération chromatique, formée par hydrations de l'oxyde de fer en hydrate ferrique composé complexe de la rouille ; Cette dernière est provoqué par la combinaison de deux facteurs : le premier facteur intrinsèque qui est composition lithographique de la roche c'est-à-dire la teneur en oxyde de fer, le deuxième extrinsèque qui est les conditions environnementale (l'eau sous ses formes et la température). La profondeur ou l'épaisseur de la patine dépend des caractéristiques pétrophysique de la roche a savoir la compacité, l'absorption et la circulation de l'eau dans le réseau poreux de la pierre.

Ajoutant à tous ces points, un point très important qui est la stabilité de la structure, les éléments porteurs tel que les colonnes et les piliers ne sont pas renforcés et leurs stabilité n'est pas assurée jusqu'à ce jour malgré le tremblement de terre qui a frappé la wilaya de Mila le 07 Aout 2020. Pour cela nous recommandons vivement de prendre en charge cet aspect qui permettra à cet édifice de continuer à exister comme il était depuis des millénaires.

## **Chapitre 03**

*Lecture stratigraphique architecturale de la mosquée  
et essais de datation.*



## 1.Introduction :

L'analyse stratigraphique appliquée à l'architecture, au travers des empreintes matérielles inscrites dans les maçonneries, permet de documenter et d'étudier les différentes périodes constructives de l'histoire du bâtiment. Le processus constructif, avec ses différentes actions de construction, de démolition ou de transformation, laisse une série de traces reconnaissables par des yeux entraînés à les identifier et à les comprendre. En même temps que l'étude stratigraphique de l'architecture permet de reconnaître les différentes phases constructives, elle favorise aussi la connaissance ainsi que la reconnaissance des matériaux et des techniques constructives employés dans l'architecture <sup>257</sup>.

Les matériaux, les techniques constructives, la couleur, la composition et la finition caractérisent chacune des unités stratigraphiques. Celles-ci sont délimitées par un périmètre que les relations suivantes pourraient lier :

1. Contemporanéité concerne deux unités de maçonnerie réalisées dans le même chantier de construction. Les relations de contemporanéité sont celle de *est lié à* –deux murs réalisés conjointement p.ex. – ou *égal à*–deux unités de maçonnerie réalisées en même temps sans qu'ils n'établissent de contact physique.

2. Antériorité/postériorité définit une relation entre deux unités réalisées durant deux phases successives. Les relations d'antériorité/postériorité sont *s'adosse à/est adossé sur par* – l'unité qui s'adosse est postérieure à l'unité à laquelle elle s'adosse – ; *couvre/est couvert par*– l'unité qui couvre est postérieure à celle qui est couverte (badigeon qui couvre un mur p.ex.) – ; *coupe/est coupé par*– l'unité qui est coupée est antérieure à l'unité en interface qui coupe (l'action d'un percement ou démolition est postérieure au mur que l'on perce ou démolit) – ; *remplit/est rempli par*– l'unité qui remplit est postérieure à celle qui est rempli par (ouverture obstruée p.ex.) <sup>248</sup>.

Après avoir identifié les relations stratigraphiques entre les différentes unités, on établit la séquence stratigraphique dans laquelle seront ordonnées les unités depuis la plus ancienne jusqu'à la plus récente.

L'étude stratigraphique donne toujours une chronologie relative dans laquelle les unités sont entre elles dans une relation d'avant et après, dans notre travail nous avons tenté après

---

<sup>257</sup>MILETO Camilla; L'analyse stratigraphique de l'architecture et son application à l'architecture traditionnelle. Méthode Rehabimed

<sup>258</sup>CHERGUI Samia ; « Essai stratigraphique de deux demeures du fahs algérois, », Al-Sabîl : Revue d'Histoire, d'Archéologie et d'Architecture Maghrébines n°2, Année 2016.

l'identification de l'unité stratigraphique la plus ancienne de faire des datations directes par OSL, ce qui permettra d'avoir une date plus au moins proche à l'édification de la mosquée, le reste des unités stratigraphiques qui suivent vont être étudiées suivant l'approche matériaux et techniques de leur mise en œuvre dans le deuxième chapitre de cette partie pratique.

## 1. L'analyse stratigraphique de la mosquée de Sidi Ghanem :

### 2.1. Période coloniale :

En premier temps nous avons fait une comparaison entre l'état actuel de la mosquée et son état avant l'intervention des occupants français, cette comparaison est réalisée sur une base documentaire : plans, schémas et photographies suivi d'une analyse stratigraphique.

Le plan, (figure.3.1) et les photos réalisés par Delamare lors de son inventaire des monuments en Algérie en 1840, 1841 et 1842 et le plan réalisé par le génie militaire français, (figure.3.2), nous donne des précieuses informations sur l'état de la mosquée avant son aménagement en hôpital militaire en 1937, environ un siècle après le travail de Delamare.

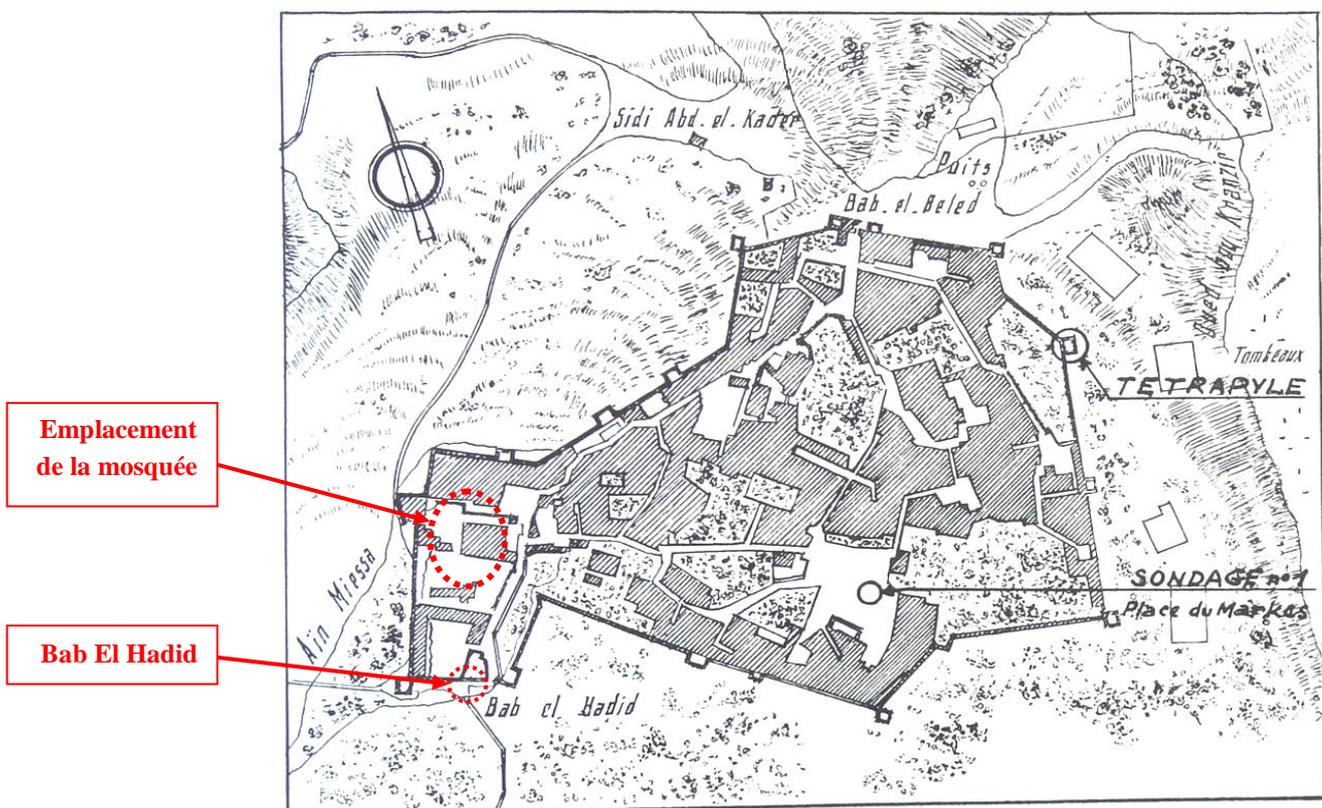


Fig.3.1. plan de masse de l'enceinte de la vieille ville de Mila réalisée par Delamare montrant l'emplacement de la mosquée de Sidi Ghanem et Bab el Hadid <sup>259</sup>

<sup>259</sup>Delamare A. H. A. , Exploration scientifique de l'Algérie pendant les années 1840, 1841, 1842, Edition Paris, 1850.

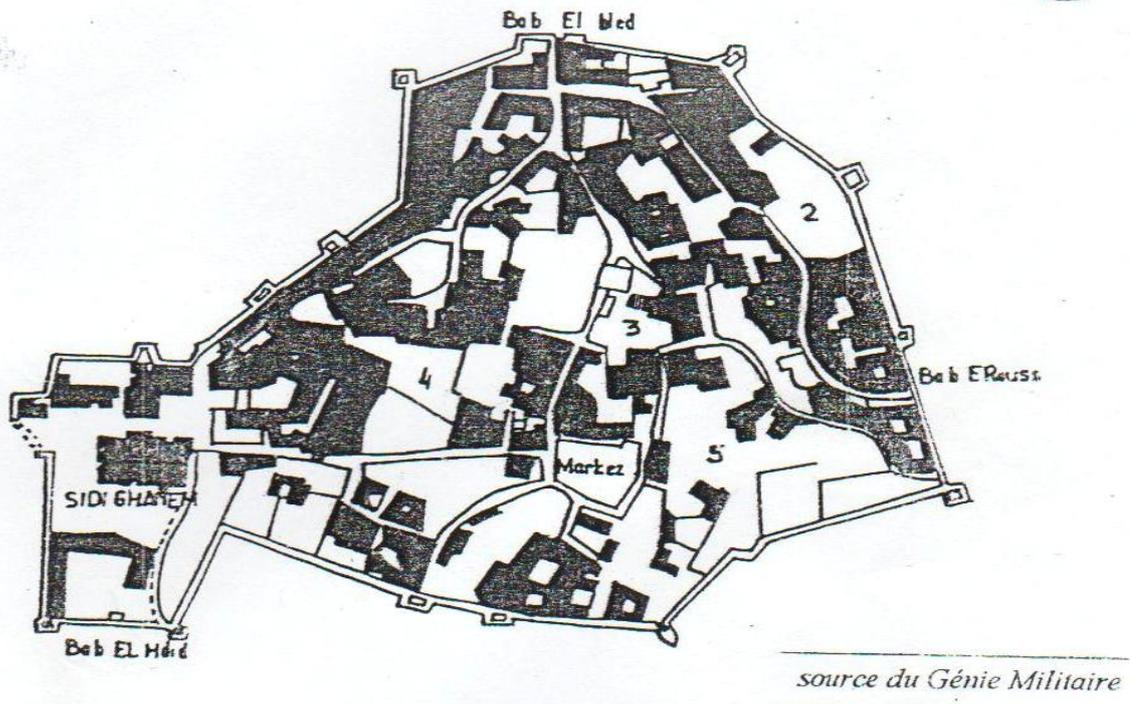


Fig.3.2.Schéma de l'enceinte de la vieille ville de Mila montrant l'emplacement de la mosquée de Sidi Ghanem et Bab el Hadid en 1937<sup>260</sup>.

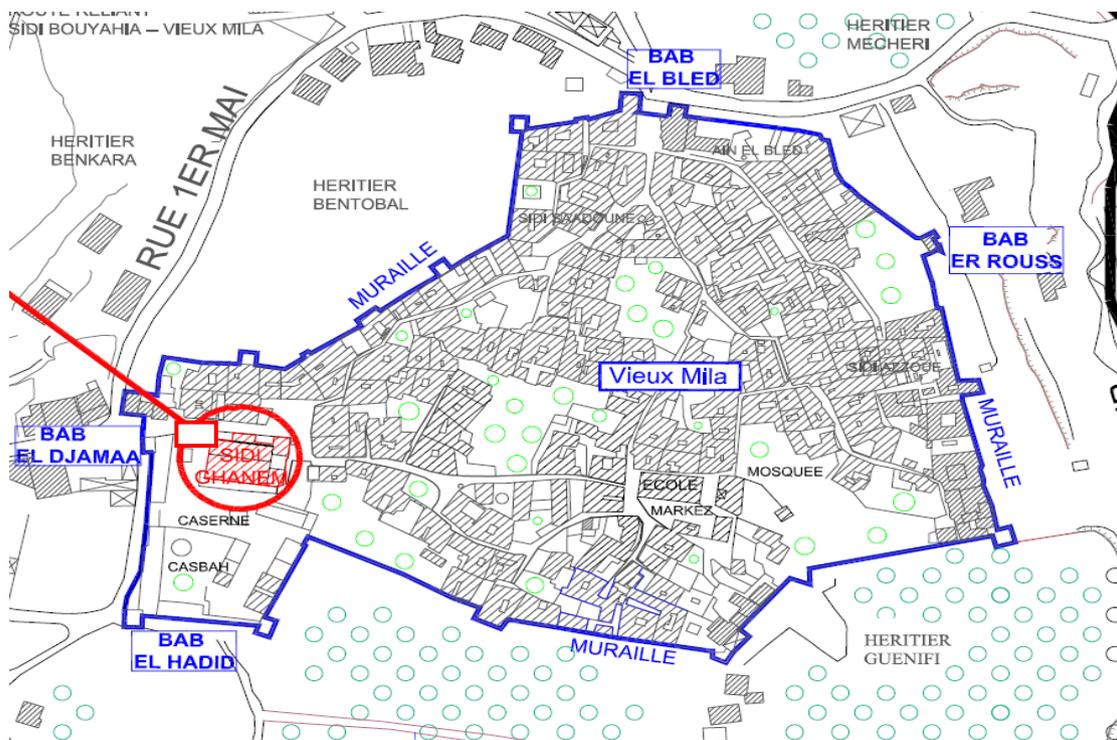


Fig.3.3. Plan actuel de la vieille ville de Mila montrant l'emplacement de la mosquée de Sidi Ghanem et Bab el Hadid<sup>261</sup>.

<sup>260</sup> Reboud. A op cit., page 28.

<sup>261</sup> Badjadja. A , op cit., page 8.

Par comparaison entre les schémas de l'enceinte (Delamare 1840, génie militaire de 1937, bureau d'études art et patrimoine de 2012 et la photo satellite, (figure.3.1), (figure.3.2) et (figure 3.3) l'emplacement de la mosquée Sidi Ghanem est parfaitement localisé sur le schéma de Delamare donc il s'agit sans doute de la mosquée de Sidi Ghanem.

Par comparaison entre le plan de la mosquée de Delamare, la (figure 3.4) et la (figure 3.5) qui représente un zoom sur la mosquée telle qu'elle est représenté dans le schéma du génie militaire, nous constatons directement les points suivants :

### 2.1.1. Le minaret :

L'emplacement du minaret de la mosquée de Sidi Ghanem, se trouve approximativement sur l'angle nord -est et nous pouvons confirmer ceci avec la photographie de Delamare en 1840 lorsque il à dessiner la mosquée et son minaret figure.3.4, on voit l'arc de Bab El Hadid en arrière plan.

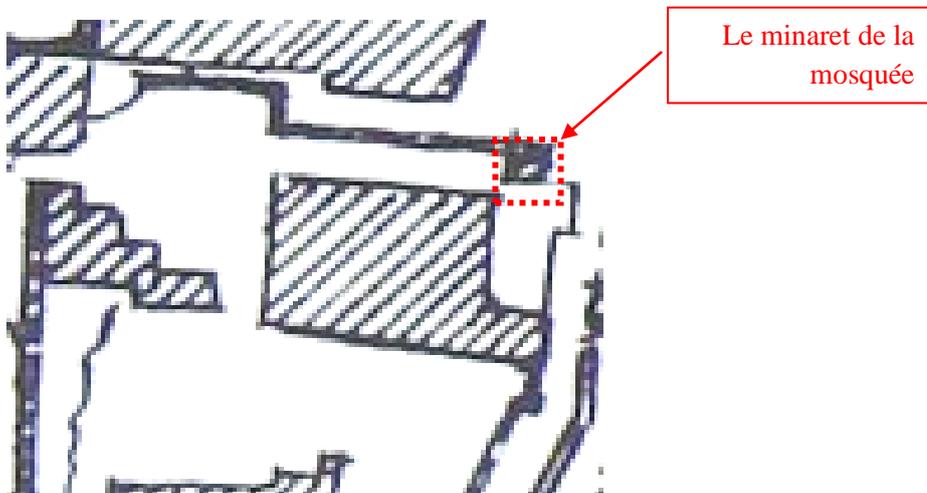


Fig.3.4.Zoom sur le plan de masse de la mosquée de Sidi Ghanem de 1840.

Cette hypothèse du minaret est confirmée par le fait que Delamare a fait son inventaire en 1840 et Reboud la mentionnée 1879, « *son ancienne mosquée ornée de colonnes, son minaret de style mauresque tombant en ruine* »<sup>262</sup>, donc le minaret a été détruite entre 1840 et 1879. (figure 3.5).

<sup>262</sup> Delamare A. H. A op cit. planche 110

<sup>250</sup> Reboud. A op cit. page 37.

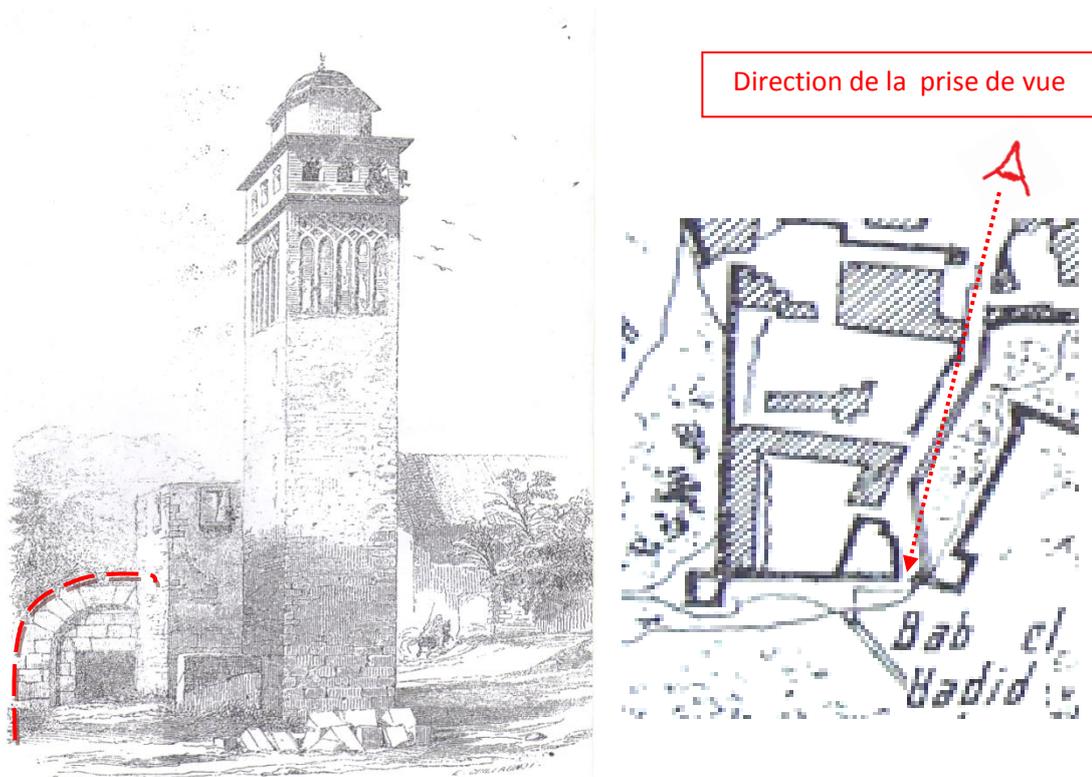


Fig.3.5. Photographie montrant le minaret de la mosquée de sidi Ghanem par Delamare et Bab El Hadid

263

### 2.1.2. Les deux constructions :

Par comparaison entre le plan de Delamare, (figure.3.6) et le plan de génie militaire, (figure.3.7) nous observons deux constructions qui n'existaient pas sur le plan de Delamare, la première se trouve sur l'angle Nord-est de la grande salle près du minaret, tandis que la deuxième se trouve adossé sur le mur nord de la grande salle.

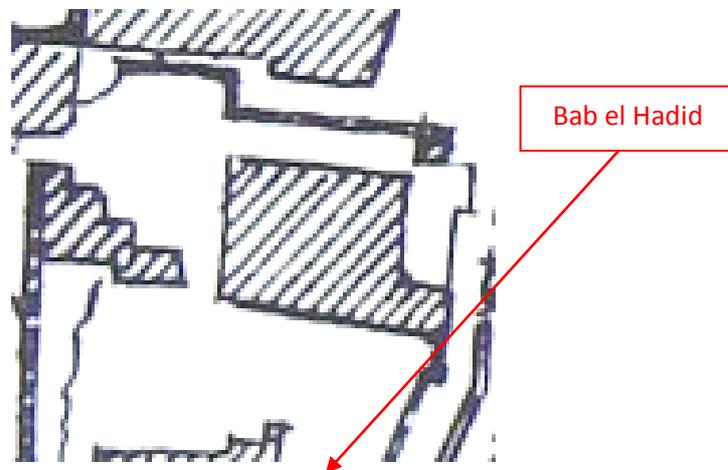


Fig.3.6.Zoom sur le plan de la mosquée de Sidi Ghanem de 1840.



Fig.3.7. Zoom sur le plan de la mosquée de Sidi Ghanem de 1937.  
 Si nous comparons le plan actuel, (figure.3.8) de toiture de la mosquée et celui du génie militaire nous pouvons conclure qu'il n'y a pas de changement structurel de la mosquée depuis 1937 jusqu'à nos jours.

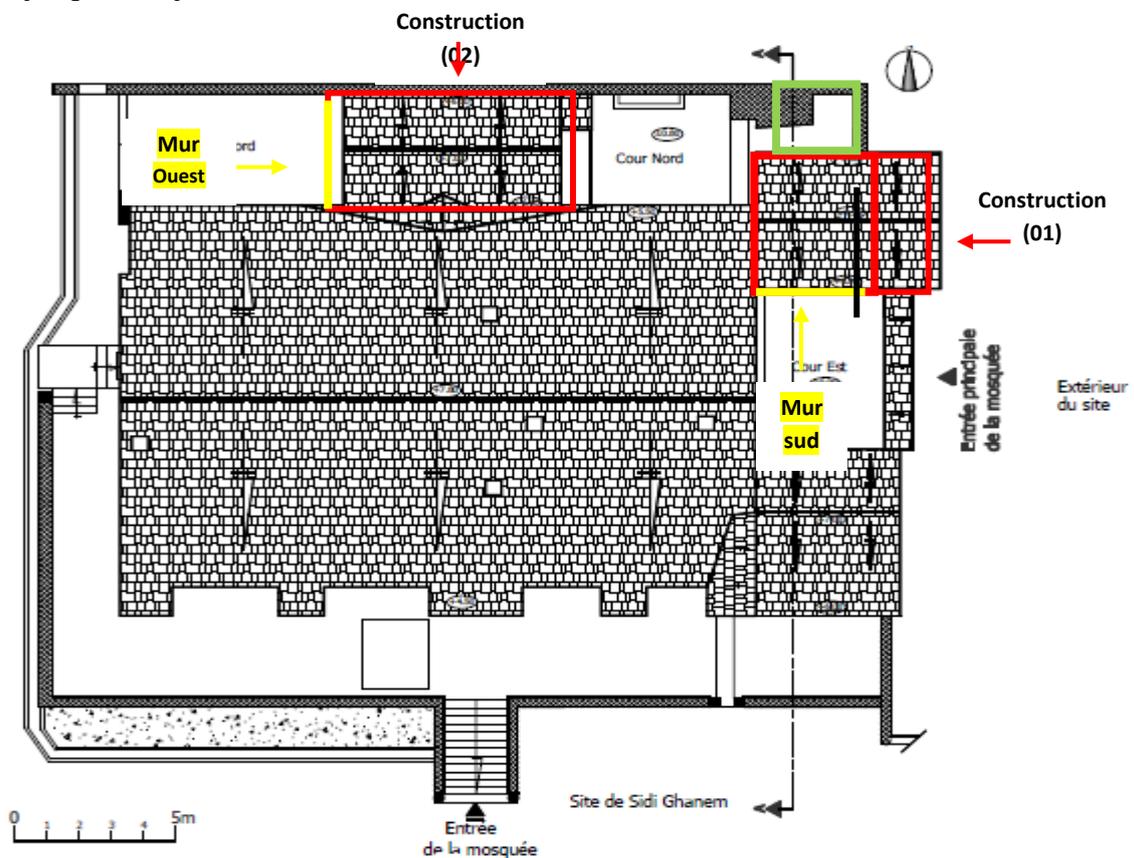


Fig.3.8 : plan de toiture actuel de la mosquée<sup>264</sup>.

<sup>264</sup> Abd Elhamid Badjadja, op cit.,1 page 9.

### 2.1.3 Étude stratigraphique des deux constructions de l'époque coloniale :

#### - La première construction :

Pour le mur sud de la première construction(en jaune), (figure.3.9), nous remarquons ce mur vient d'être adossé sur le mur Est de la grande salle, le premier est construit par une maçonnerie de moellons de dimensions et de formes irrégulières alors que le mur Est de la grande salle est construit par une maçonnerie avec de grand appareil au soubassement jusqu'à 1,5 mètre et il continu avec des moellons taillés de forme plus au moins rectangulaire de dimension moyenne ; ce qui confirme ce qui à été constaté précédemment.

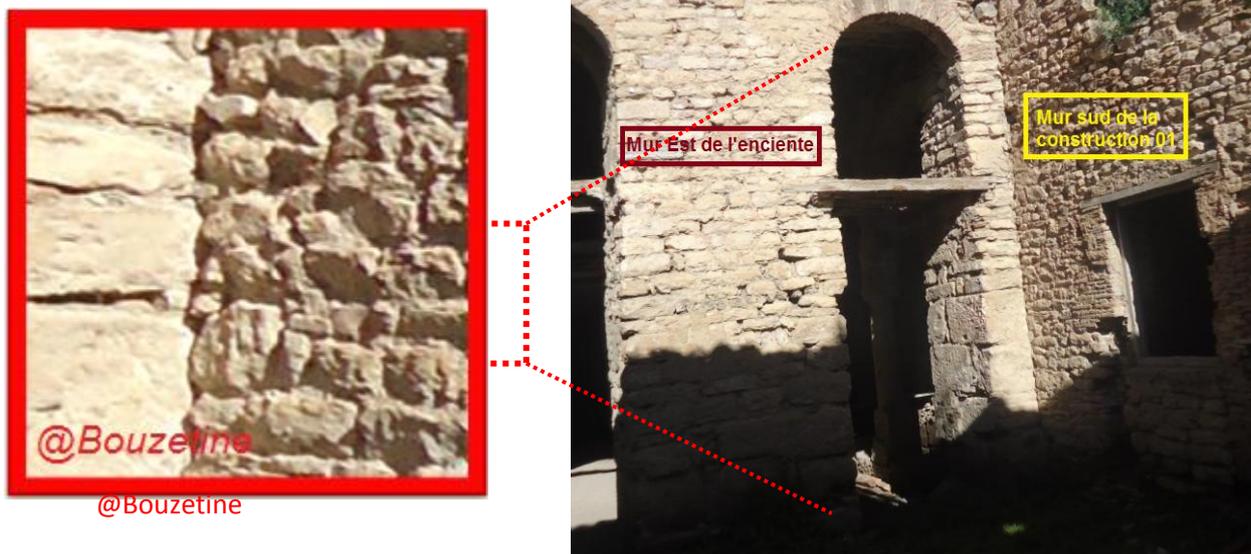


Fig.3.9. Détail montrant la maçonnerie de la construction (01) et le mur Est de la grande salle.

#### - La deuxième construction :

Sur le mur nord de l'enceinte la deuxième construction de la période coloniale, (figure.3.10)



Fig.3.10 : détail montrant la maçonnerie de la construction (02) et le mur Ouest de la grande salle.

Si nous projetons ces points sur le plan de masse actuel, (figure.3.11), nous obtiendrons le schéma de la (figure.3.12)

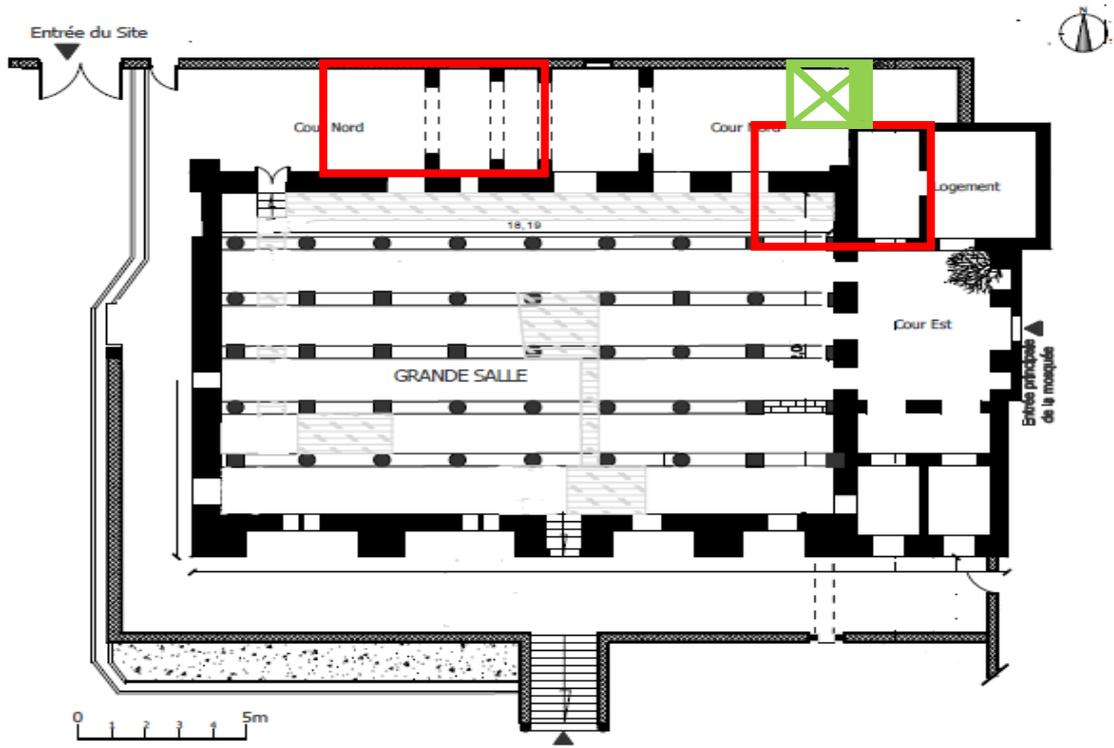


Fig.3.11. Plan de masse actuel de la mosquée.

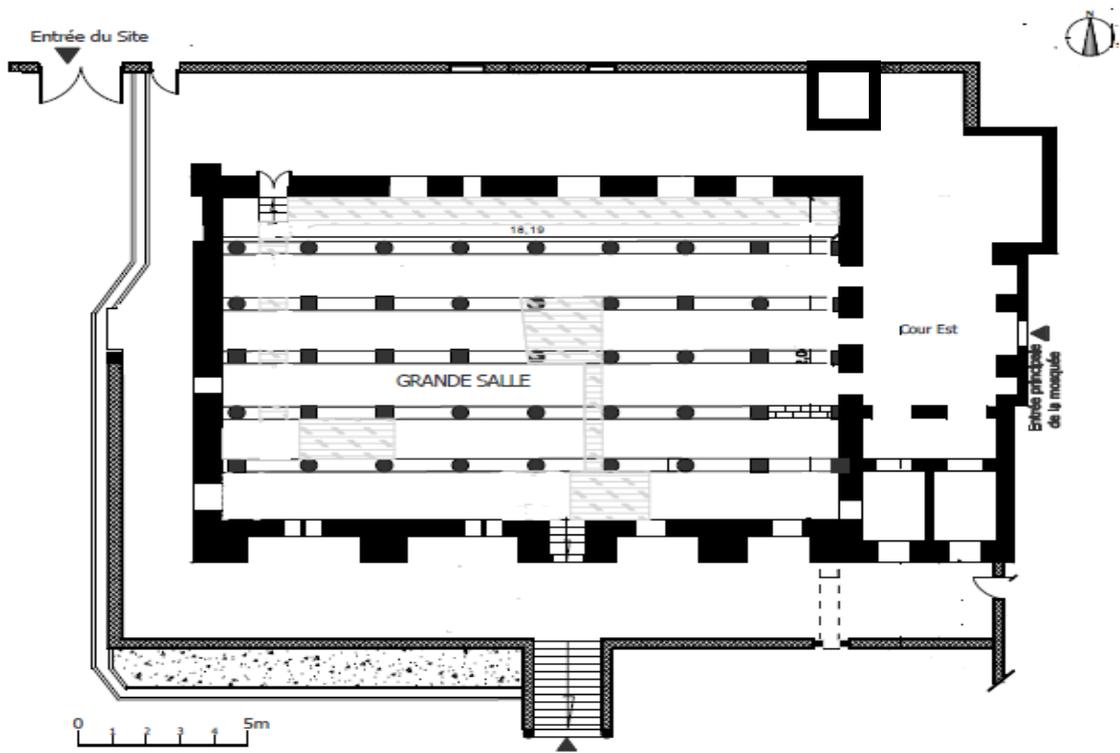


Fig.3.12. Plan de masse de la mosquée avant l'aménagement des français (Auteur)

#### 2.1.4 La salle de prière :

À l'intérieur de la salle de prière, (figure.3.13), un étage à été aménagé au moyen d'un plancher en bois avec ossature métallique posé sur les piliers de la salle de prière, (figure.3.14),

pour gagner la hauteur des murs en adobe ont été construits sur les arcades avec des hauteurs progressives vers le centre pour permettre la mise en place d'une toiture moderne avec la tuile mécanique.

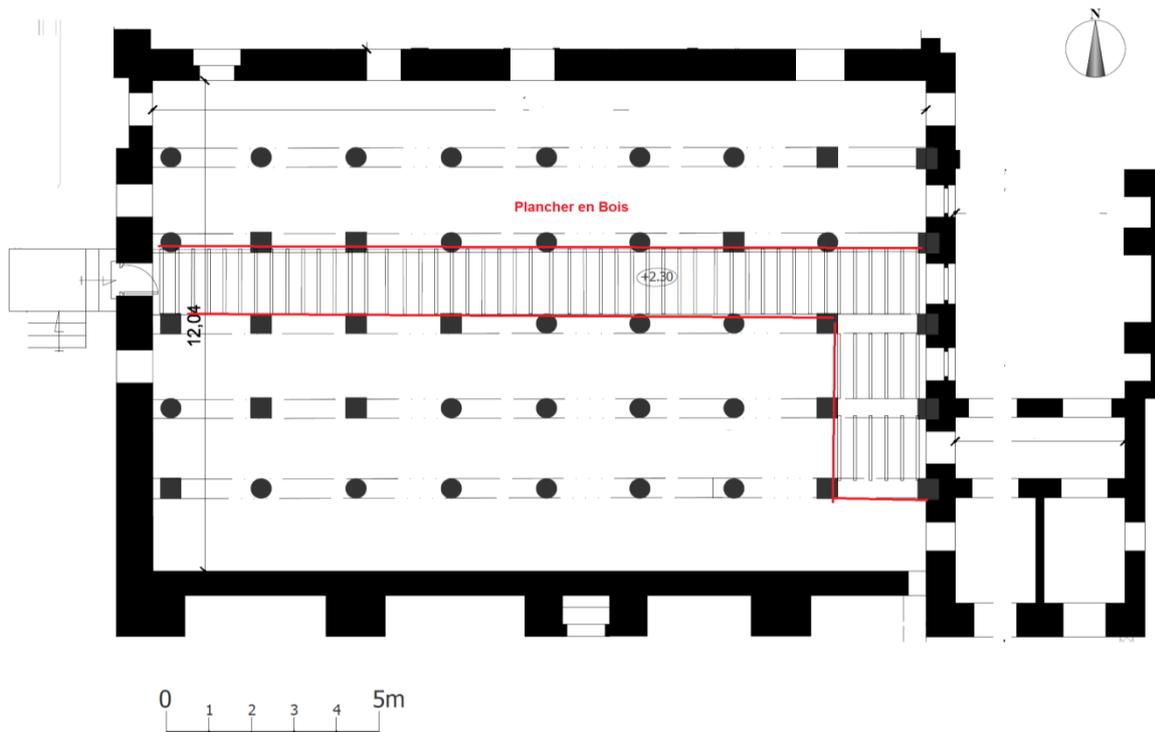


Fig.3.13. Plan du premier étage.

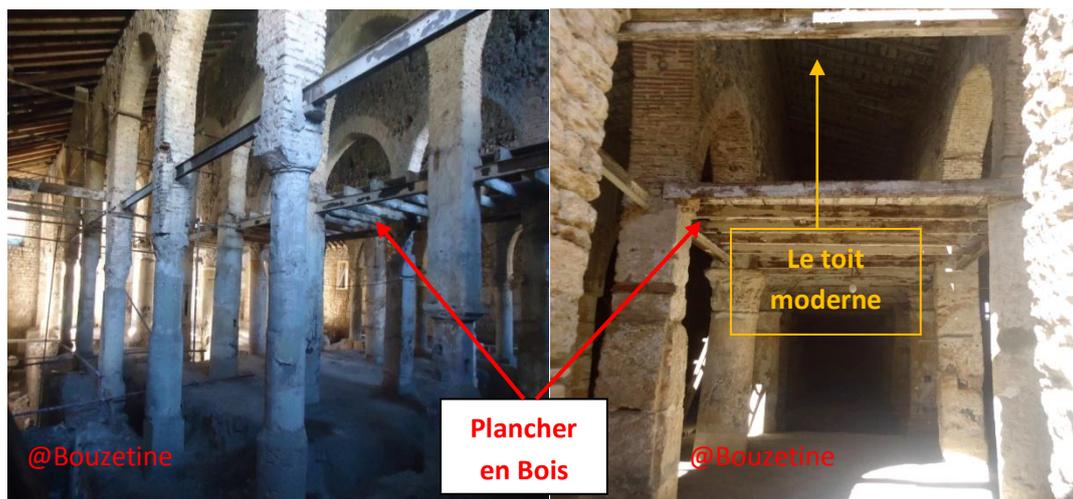


Fig.3.14. Photographies montrant le plancher et le toit moderne qui supporte les tuiles ; L'analyse stratigraphique nous montre la présence de deux unités stratigraphiques, (figure.3.15) :

UST1 : maçonnerie composée de moellons de tailles moyennes et de formes arrondies liés entre eux par un mortier de chaux et dans d'autres endroits en brique cuite revêtue par un enduit de chaux ou la hauteur de cette maçonnerie atteint les sommets des arcs figure .

UST2 : maçonnerie qui vient d'être posée sur la première maçonnerie, faite de brique en terre crue mélangée à la paille et liée avec un mortier de plâtre, figure.(3.16).

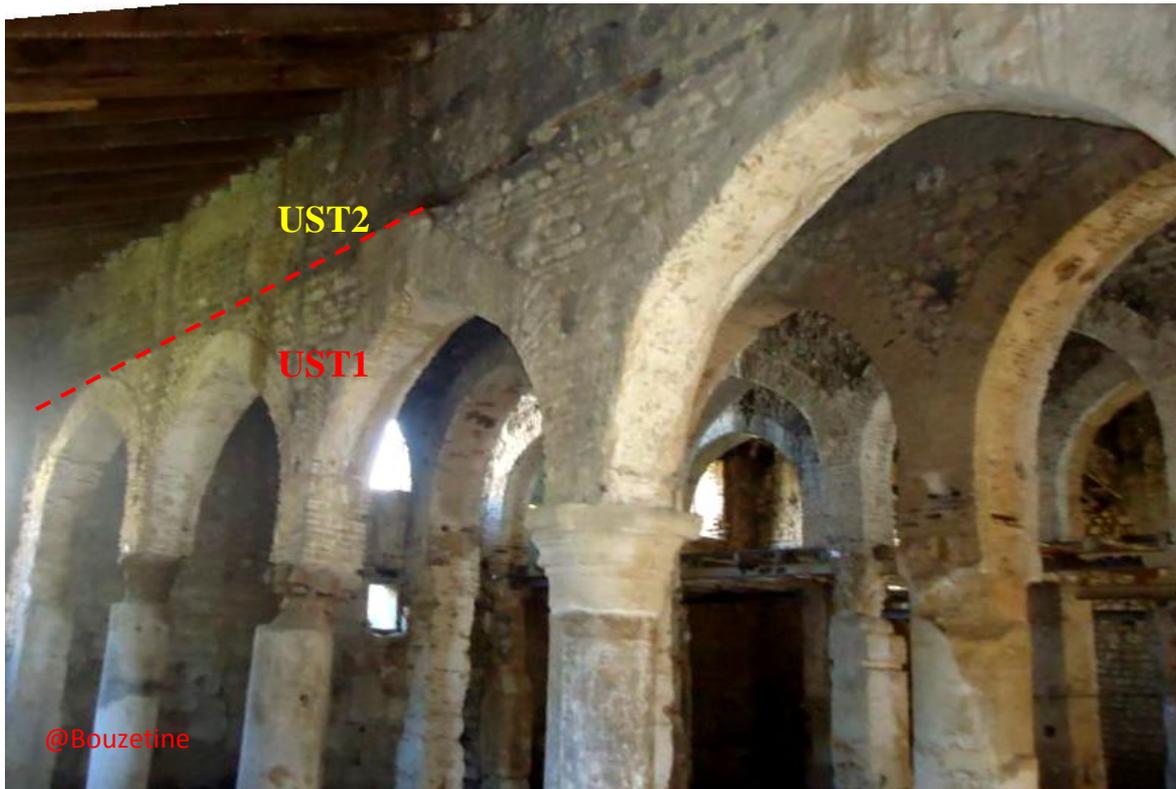


Fig.3.15. Analyse stratigraphique à l'intérieur de la salle de prière.



Fig.3.16. Détail des unités stratigraphiques UST1 et UST2.

La hauteur des murs en adobe ont été construits sur les arcades avec des hauteurs progressives vers le centre pour permettre la mise en place d'une toiture moderne avec la tuile mécanique, figure.(3.17).

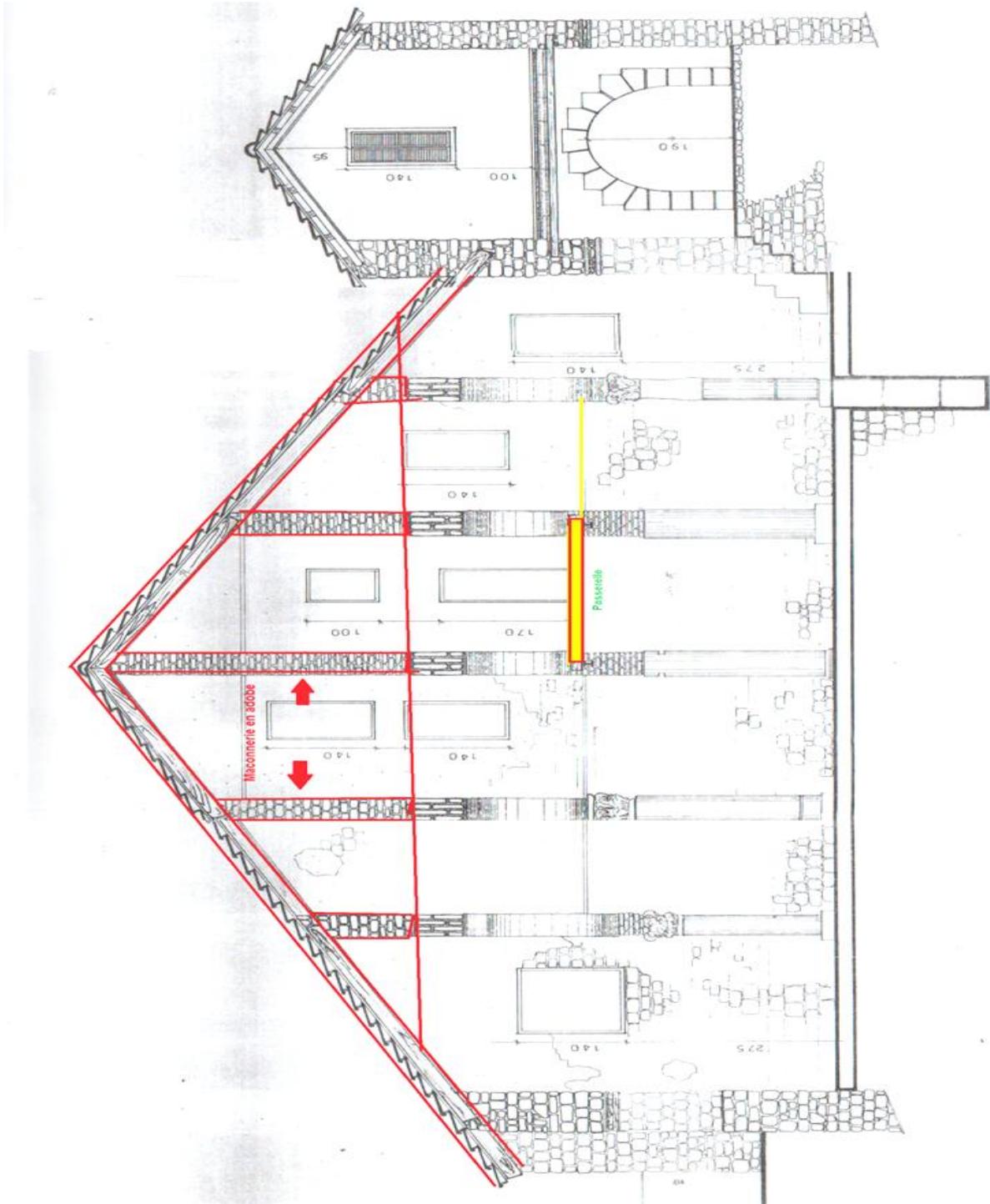


Fig.3.17. salle de prière, montrant la modification de la toiture.

Nous sommes arrivés à déterminer la structure de la mosquée avant l'aménagement des français, (figure.3.18).

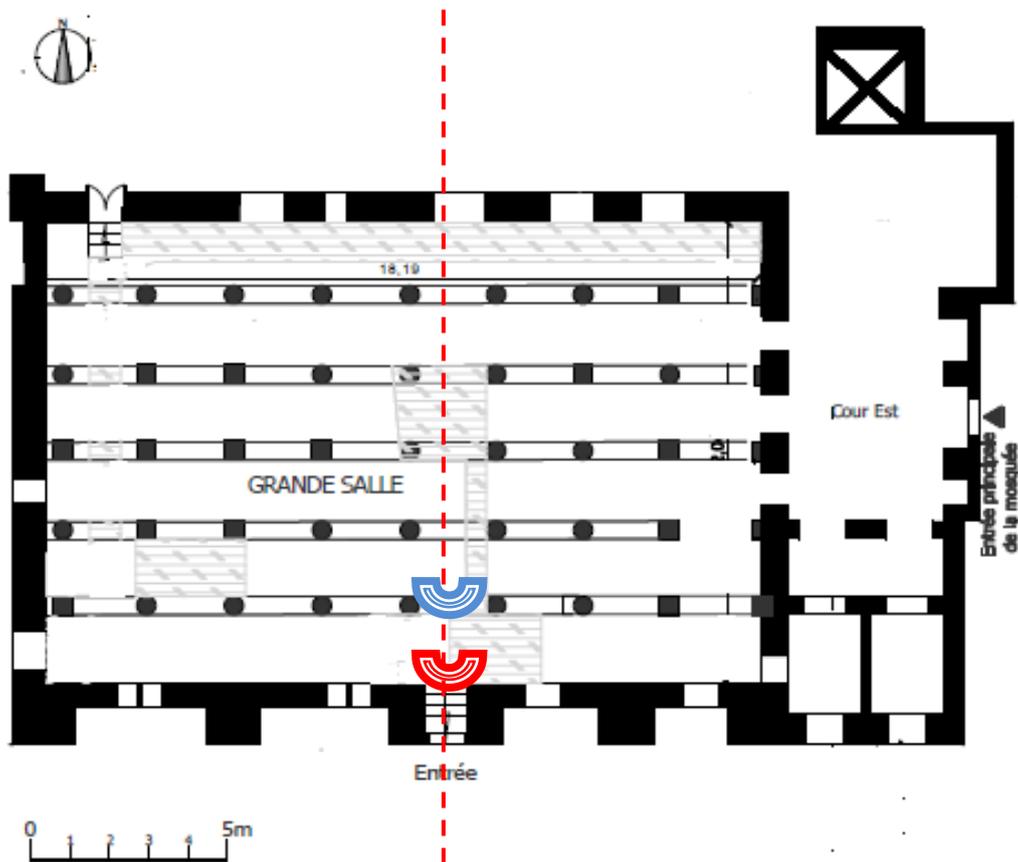


Fig.3.18. Plan de la mosquée avant l'aménagement coloniale.

Maintenant nous allons trouver la position du mihrab, les portes et les fenêtres :

#### 2.1.4.1. Le mihrab :

Nous remarquons que sur l'axe de la 4<sup>ème</sup> travée et dans le mur Sud, figure.3.19 se trouve une porte unique dans son genre que l'on trouve nulle part dans la mosquée, par sa décoration en arc brisé fait en brique cuite similaire aux arcades de la salle de prière et de sa position, au milieu du mur de la Qibla qui est dirigé vers le Sud, sur le même axe et est distant d'une nef de que l'ancien mihrab ne peut être que le nouveau Mihrab ; ce mihrab qui a été démolie en partie en laissant la place à une porte, (figure.3.20) et (figure.3.21).

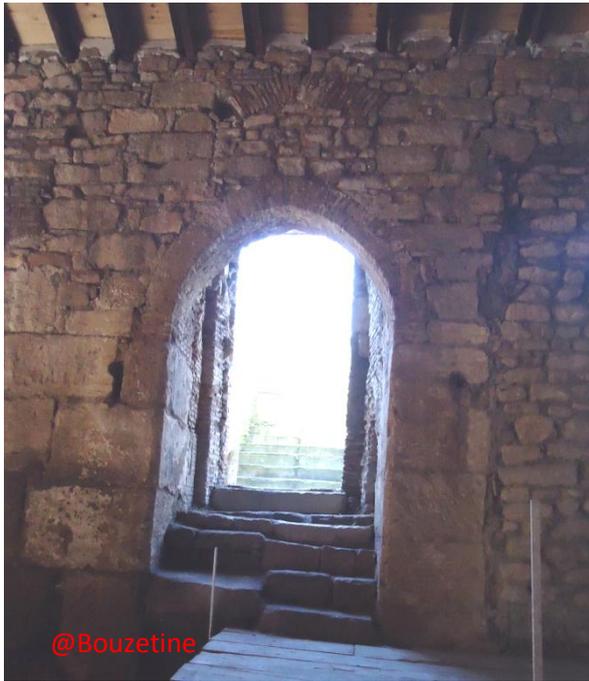


Fig.3.1. Vue intérieure et extérieure du mihrab.

D'après l'analyse stratigraphique ; arc brisé avec des retombées symétriques sur les gros blocs de pierre de tailles, la présence des pierres d'angles sur les deux cotés ne laisse pas un doute que cet emplacement à été laissé ouvert volontairement pour se servir du Mihrab lors de la construction de l'enceinte.

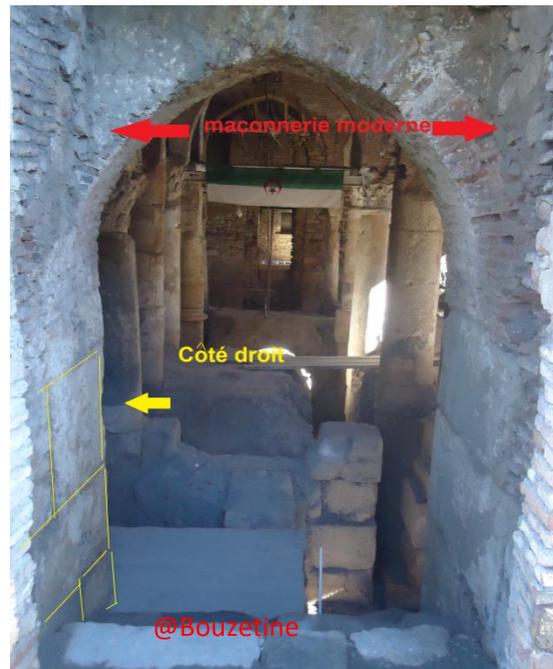
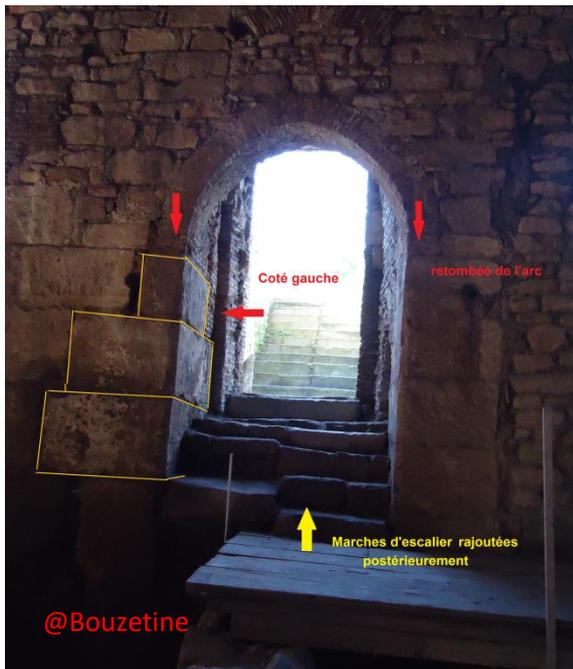


Fig.3.20. Le nouveau mihrab au centre du mur Sud.



Fig.3.21.Mihrab vu de l'extérieur avec la présence d'une maçonnerie moderne.

#### 2.1.4.2. Les portes et les fenêtres :

Sur l'emplacement du nouveau mihrab une petite fenêtre ou nous voyons clairement le linteau curviligne en brique cuite, (figure.3.22), deux portes sur les deux cotés sont bouchées par des moellons plus au moins rectangulaires liés entre eux avec du ciment moderne ainsi (figure 3.23 et 3.24).

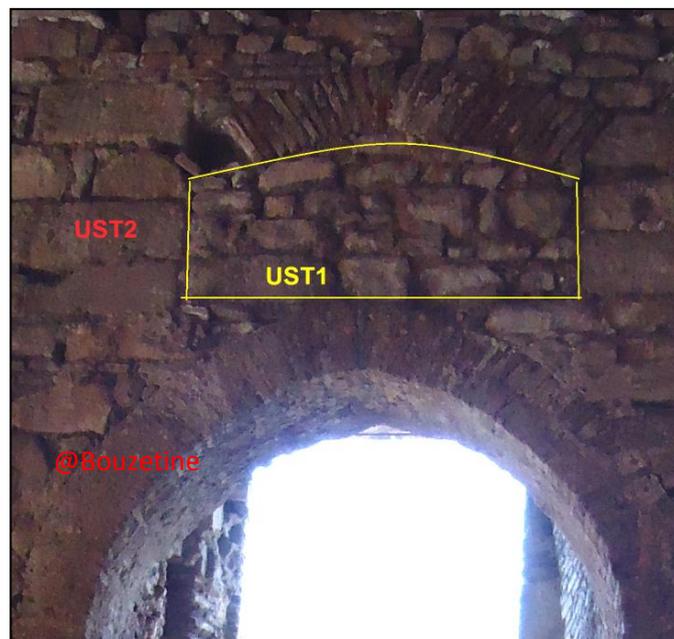


Fig.3.22.Petite fenêtre au-dessus du Mihrab bouchée par une maçonnerie en moellons.

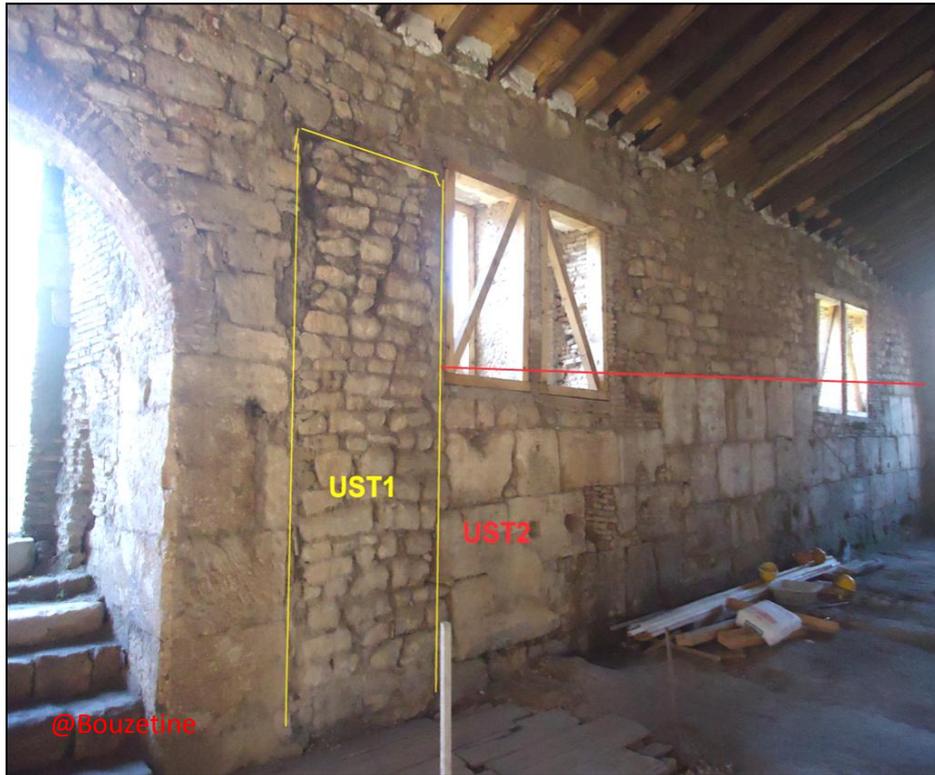


Fig.3.23. Porte à droite du Mihrab bouchée par une maçonnerie de moellons.

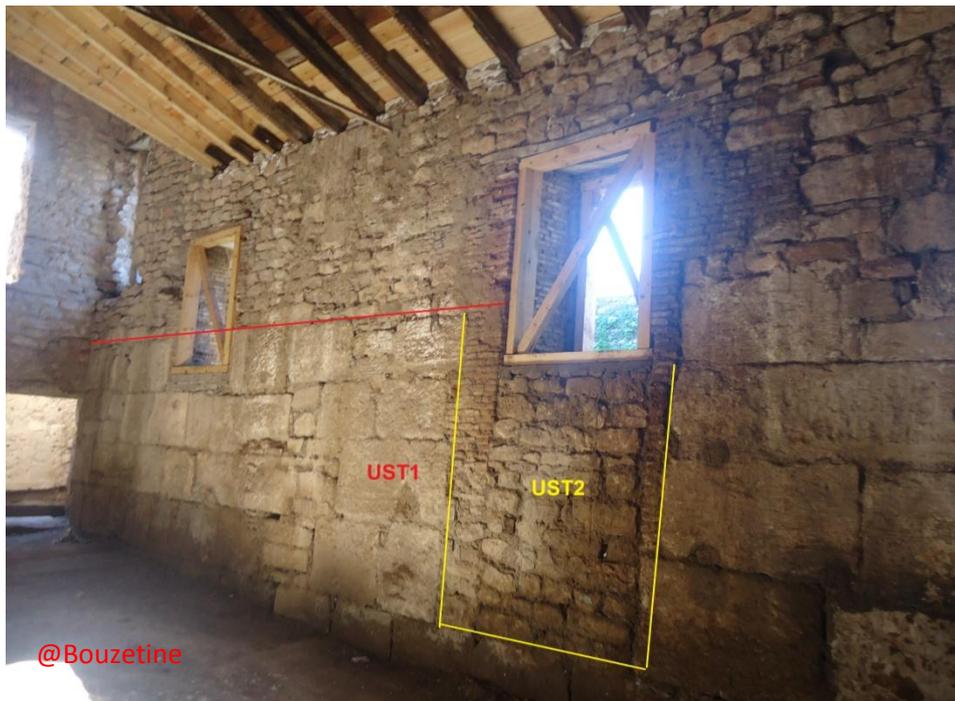


Fig.3.24. Porte à gauche du Mihrab transformée en fenêtre et bouchée une maçonnerie de moellons.

## 2.2. Etude stratigraphique précoloniale

### 2.2.1. La construction ancrée au mur Est :

Cette construction apparaît sur le plan de Delamare 1840, elle est construite probablement avant la période coloniale, (figure.3.25).

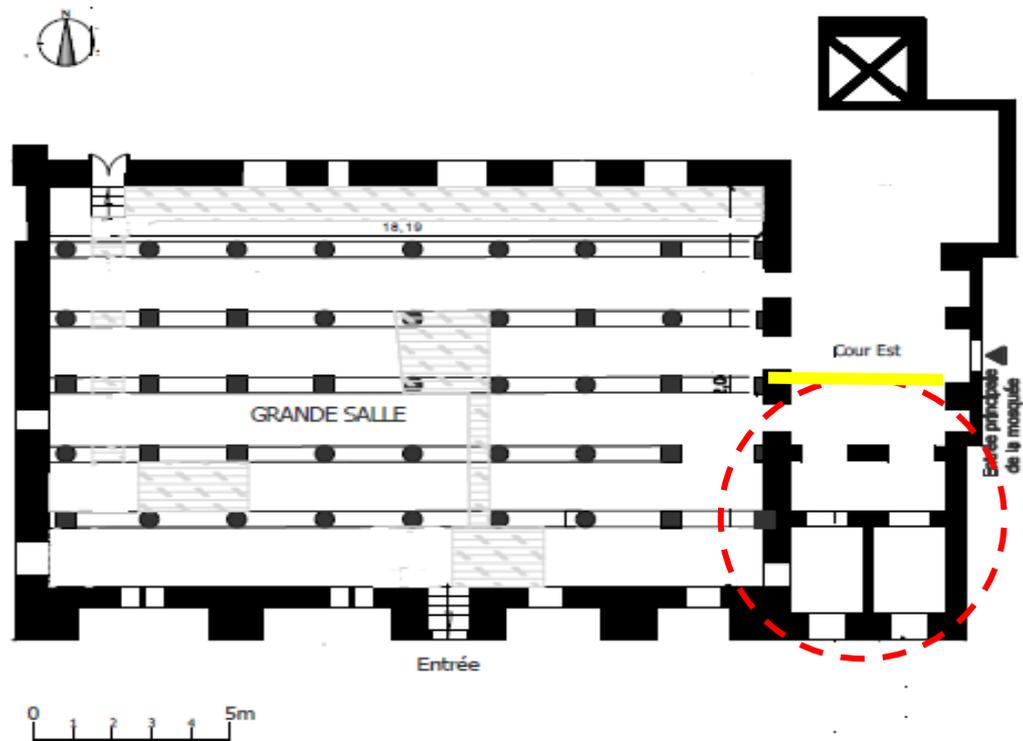


Fig.3.25. La position de la construction.

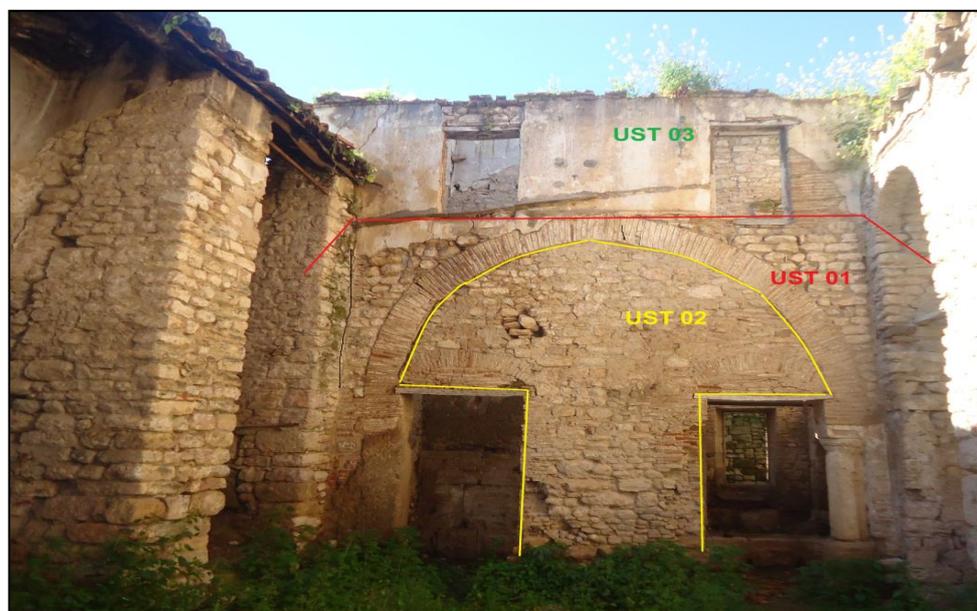


Fig.3.26. Le mur nord de la petite bâtisse.

Sur le mur Nord de cette petite bâtisse nous constatons qu'il y a trois unités stratigraphiques (figure.3.26)

**UST 01** : elle représente l'unité la plus ancienne elle est composée d'un grand arc en brique pleine dont les retombées de ce dernier sont deux petits piliers, la maçonnerie est réalisée par des moellons plus au moins taillés de forme rectangulaire et de taille voisine, ces moellons sont de nature, de forme, de taille et du même mode de construction que le mur Est (à droite de la figure) de la grande salle et le mur de la façade principale dont nous voyons bien qu'ils sont construits dans la même période, figure.3.27.



Fig.3.27. Détail de l'unité stratigraphique N°01.

**UST 02** : elle représente l'unité qui suit, cette maçonnerie vient de remplir le vide sous l'arc en laissant deux portes dont les linteaux en bois sont bien conservés, cette maçonnerie est faite par un amalgame de pierres de formes et de tailles très variables, (figure.3.28).



Fig.3.28. Détail de l'unité stratigraphique N°02.

**UST 03** : elle est la partie la plus récente de cette façade, elle représente l'aménagement des français du 1937, (figure.3.25), pour gagner la hauteur dont le plancher est bien visible avec deux fenêtres, cette maçonnerie est faite par la brique pleine liée et couverte par mortier de

ciment moderne et une couche de peinture blanche (figure.3.29).



Fig.3.29.Détail de l'unité stratigraphique N°03.

Sur le mur sud de cette bâtisse nous remarquons qu'il n'y a pas de continuité entre le mur sud de la salle de prière qui est fait en grand appareil ou soubassement jusqu'à une hauteur de 1.60 mètre et il continue vers le haut avec des moellons travaillés de forme rectangulaire alors que celui de la bâtisse le mur en *opus mixtum* combinant des parties réalisées en briques cuites avec des parties réalisées en moellons bruts, en cailloux et en blocs composé de dimensions diverses, (figure.3.30).

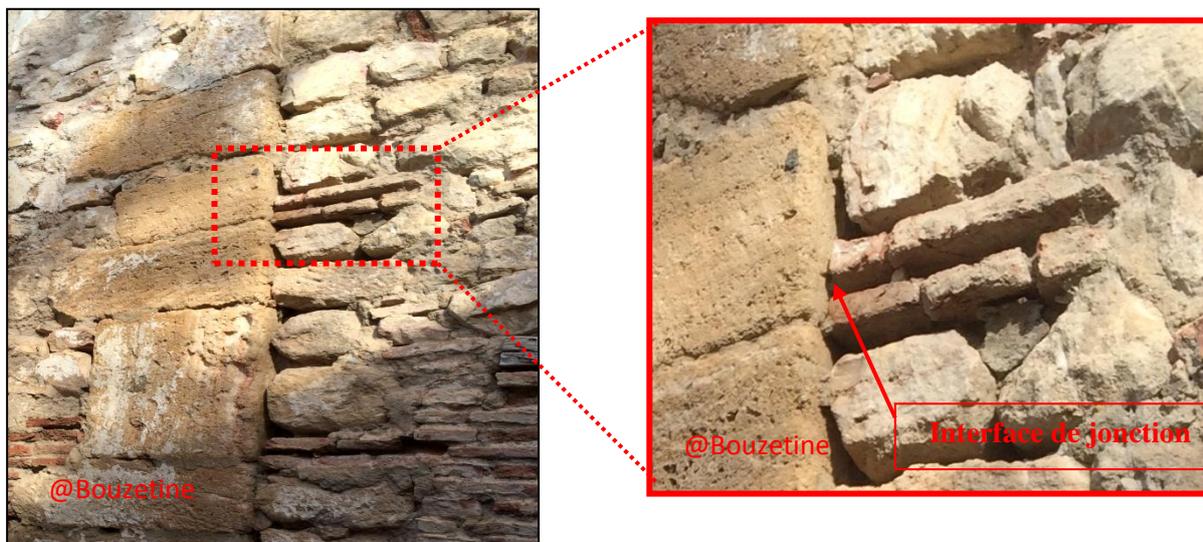


Fig.3.30.Mur de la bâtisse adossé au mur sud de la salle de prière.

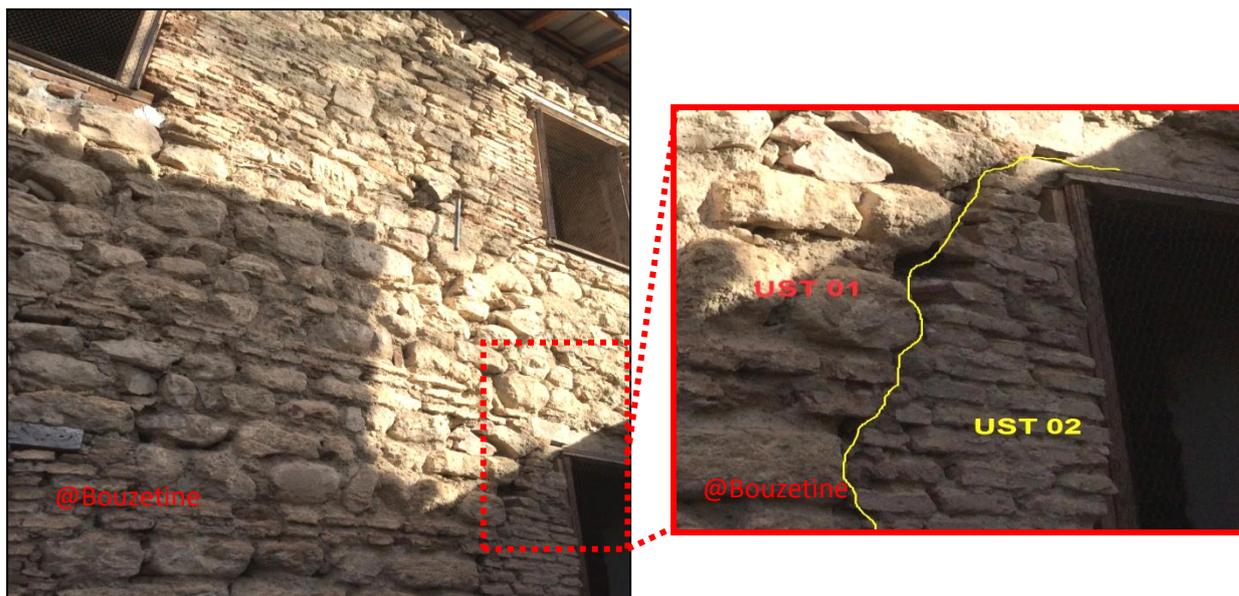


Fig.3.31.Détails des unités stratigraphiques du mur sud de la petite bâtisse.

Sur ce mur nous remarquons aussi qu'il y a une stratification, car nous voyons qu'elles ont été percées sur ce mur ou les cadres de ces dernières est plus large, une maçonnerie en brique cuite et du liant à base d'un ciment moderne vient de remplir le vide entre le mur et les fenêtres, cette modification est probablement faite dans la période d'occupation de la bâtisse par les soldats français, (figure.3.31).

## 2.2.2 .La grande salle (salle de prière) :

### 2.2.2.1. Le mur Sud :

Le mur Sud à de l'intérieur est construit de grand appareil de pierres de taille parallélépipédique de réemploi et de dimensions variables de 60X60 cm jusqu'à 80X 60cm, empilées en *opus quadratum* jusqu'à une hauteur de 1,70 mètre ; Puis il continue jusqu'au plancher avec des moellons de formes pseudo rectangulaires de dimensions variable, (figure.3.32).



Fig.3.32. Vue de l'intérieure du mur Sud

A l'extérieur ce mur est construit avec des blocs de pierres équarries mais de dimension plus grandes qu'à celle de l'intérieur qui peut atteindre 100x 60 cm, avec un revêtement du mortier à base de ciment moderne, (figure.3.32).



Fig.3.32.Mur Sud vue de l'extérieure.

#### 2.2.2.2. Le mur Ouest

Le mur Ouest constitue avec le mur sud deux unités stratigraphiques contemporaines c'est-à-dire construite en même temps, ce se voit clairement sur l'angle Sud-ouest que le mur Ouest représente une continuité logique du mur sud de point de vue liaison, matériaux et mode constructif, (figure.3.33).

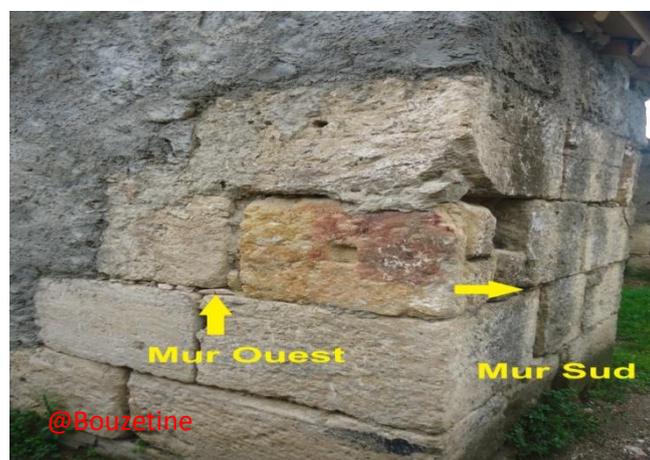


Fig.3.33.L'angle sud-ouest qui en présence de pierres d'angle qui affirme les contemporanéités des deux murs.

### 2.2.2.3. Le mur Nord :

Le mur Nord lui aussi est lié au mur Ouest, mais ne nous le voyons pas sur l'angle Nord- Ouest parce qu'il y a un élément de soutènement qui à été construit avec du béton moderne pour assurer la stabilité de ce mur, en plus ce dernier est totalement revêtu d'un mortier de ciment moderne, (figure.3.34).

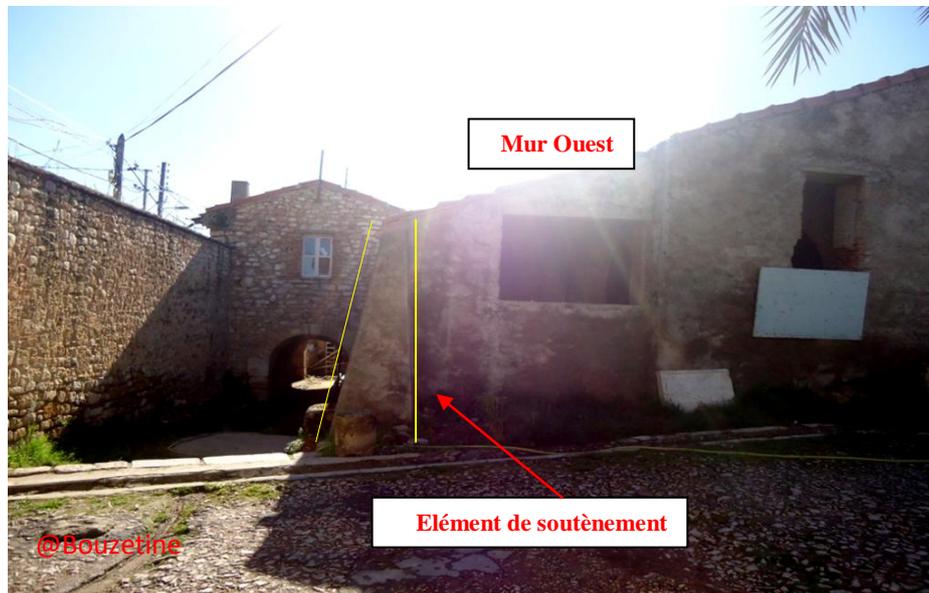


Fig.3.34.Vue de l'angle Nord-Ouest de la salle de prière.

A l'intérieur le mur Nord et Est ont le même mode constructif que le mur Ouest et le mur Sud et constitue une continuité logique de construction d'une enceinte.

D'après tout ce que nous venons de voir dans ce chapitre et le chapitre précédent, le plan de la salle de prière qui est organisé en six nefs et huit travées semble être le résultat d'une extension d'un plan précédent qui comprenait quatre nefs et sept travées. Cette hypothèse est conforté par :

- La présence des traces de l'ancien mihrab sur la première rangée de colonnes qui sont posées sur le mur antique qui est parallèle au mur sud de l'enceinte.
- La présence d'un autre mur en moellons perpendiculaire et adossé sur le mur antique sud et parallèle au mur Ouest de l'enceinte.
- Un autre mur en moellons contemporain et perpendiculaire au premier mur en moellons qui continue de l'angle Nord ouest jusqu'à la façade Est.

C'est vrai que l'analyse stratigraphique nous ne donne pas une date de construction de l'édifice ni la chronologie absolue des modifications (extension, démolition ...ect). C'est pour cette raison que nous avons choisi de compléter notre étude stratigraphique et de confirmer nos

hypothèses par des méthodes archéométriques de datation qui donnent des dates relativement absolues .

Nous avons choisi deux échantillons de terre cuite utilisée dans la construction des arcades, Tcp<sub>01</sub> et Tcp<sub>02</sub>, (figure.3.35) ces deux échantillons vont être caractériser analyse chimique, minéralogique, pétrographique et examen microscopique par le MEB avant de les dater par OSL , datation optiquement stimulée.

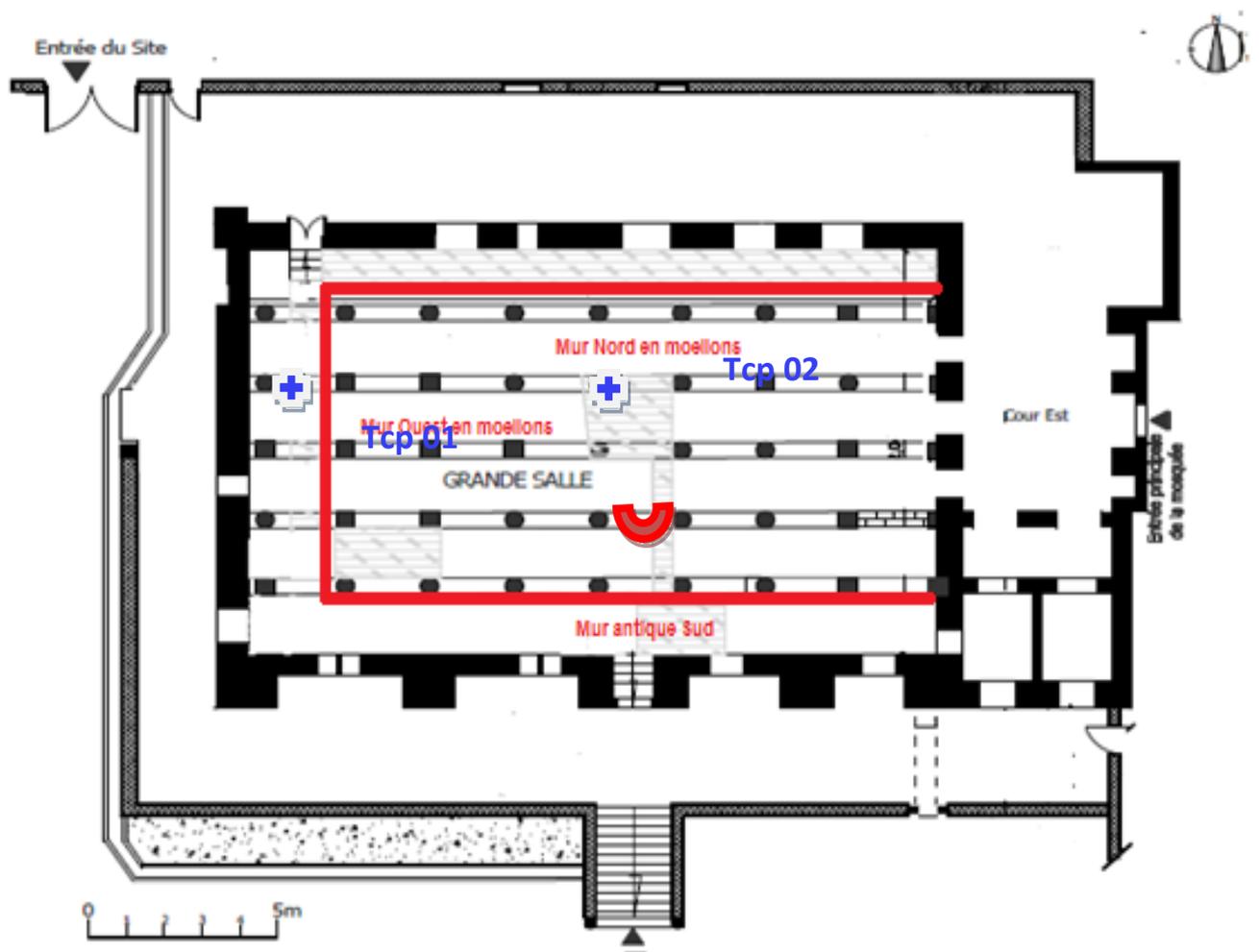


Fig.3.35 : Localisation des prélèvements des échantillons Tcp01 et Tcp02 dans un plan de masse.

## **2. datation par OSL en grain unique :**

### **2.1.introduction**

De nombreuses études au cours des dernières années mettent en évidence l'importance de l'interdisciplinarité pour l'analyse du patrimoine culturel, et plus particulièrement la mesure du temps par luminescence optiquement stimulée OSL.

Cette méthode de datation permet d'accéder à la dernière l'exposition à la lumière d'une brique avec les minéraux, des cristaux de Quartz de préférence, prélevés dans sa partie interne. Si l'on prélève les Quartz en surface, on parvient à dater l'insertion de la brique dans la maçonnerie et donc l'édification du mur, et non plus la seule production du matériau (VIEILLEVIGNE et al. 2006)<sup>265</sup>.

Dans ce travail nous avons dater la fabrication des briques en terre cuite utilisées dans la construction des arcs par la méthode de grain unique de l'échantillon TC<sub>P01</sub> qui se situe sur la deuxième nef et la quatrième travée et le TC<sub>P02</sub> qui se situe sur la première nef et la huitième travée à l'intérieur de la salle de prière de la mosquée) afin d'avoir une chronologie d'édification et de modification structurelle dans cette dernière.

### **3.2. Principe de la méthode :**

Au cours du temps les matériaux sont continuellement irradiés par les radionucléides naturels, principalement l'uranium, le thorium et leurs descendants et l'isotope radioactif du potassium le <sup>40</sup>K. Des minéraux tels que le quartz agit comme dosimètre, en enregistrant la quantité de rayonnement à laquelle il à été exposé. Le quartz est capable de stocker à l'intérieur de sa structure cristalline une faible proportion de l'énergie fournie par le rayonnement (les électrons piégés) dû à la désintégration des éléments radioactifs contenus dans le minéral lui-même et dans son environnement, et du rayonnement cosmique. Cette énergie s'accumule au fur et à mesure que l'exposition à la désintégration radioactive se poursuit à travers le temps. À une date ultérieure, elle sera libérée, sous forme de lumière (luminescence) lors d'une exposition à la lumière, dans ce cas, le signal de luminescence dans le grain du quartz s'efface (blanchiment optique) jusqu'à ce qu'il soit réduit à zéro. Une fois que ces grains de quartz sont cachés dans la pâte céramique des briques ou des mortiers à l'abri de la lumière du jour, les électrons s'accumulent à nouveau sous l'effet de la radioactivité naturelle, (figure.3.36).

---

<sup>265</sup>Emmanuelle Vieillevigine; Laurence Bourguignon, Illuminada Ortega and Guibert – Analyse croisée des données chronologiques et des industries lithiques dans le grand sud-ouest de la France (OIS 3)- Revue d'archéologie préhistorique 2008, pages 145-166.

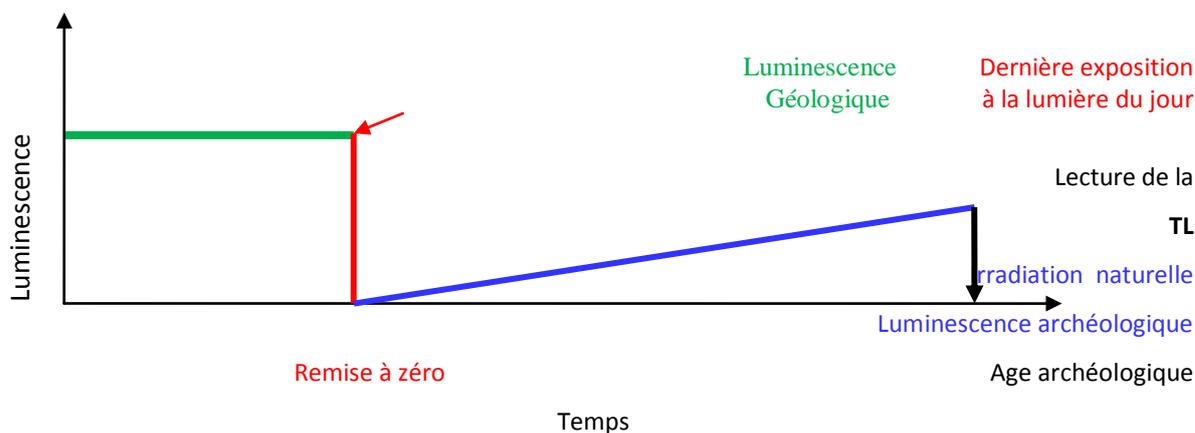


Fig.3.36. Evolution de la luminescence avec le temps <sup>266</sup>.

Pour produire le signal de luminescence, les électrons piégés et stockés dans le Quartz peuvent être libérés en laboratoire en l'exposant à la lumière (luminescence stimulée optiquement, OSL). La lumière émise lors du retour à l'équilibre, est proportionnelle au nombre de paires d'électrons-trous créées, lui-même proportionnel à la dose reçue.

Pour calculer un âge, deux grandeurs doivent être déterminées :

- La dose équivalente (ou paléodose), qui correspond à la quantité d'énergie par unité de masse stockée par le Quartz depuis sa dernière exposition à la lumière ;
- la dose annuelle, qui représente la quantité d'énergie par unité de masse accumulée en une année par le Quartz.

L'âge est déterminé en divisant la dose équivalente par la dose annuelle <sup>267</sup> :

$$\hat{Age}(a) = \frac{\text{Dose équivalente en (Gy)}}{\text{Dose annuelle (Gy/an)}}$$

### 3.3. Caractérisation des deux terres cuites :

#### 3.3.1. Aspect et morphologie :



Fig.3.37. Vue macroscopique des deux terres cuites à gauche TCP01 et TCP02 à droite.

<sup>266</sup> Emmanuelle Vieilleigne; The potential of optically stimulated luminescence for medieval building; A case study at Termez, Uzbekistan, Radiation Measurements 41(7): P.991-994 · August 2006.

<sup>267</sup> McKeever S.W.S. et Chen R., 1997 Luminescence models, Radiation Measurements, Vol. 27 (5/6), 625-661.

A l'œil nu les deux tessons présentent une différence de couleurs le premier ayant une couleur rouge brique avec la présence des grands vides entre les feuillets ou les couches lié à la mise en forme du matériau ; Tandis que le deuxième possède une structure plus compact avec un mélange de couleurs entre le rouge pale et le jaune, (figure.3.37) et (figure 3.38).

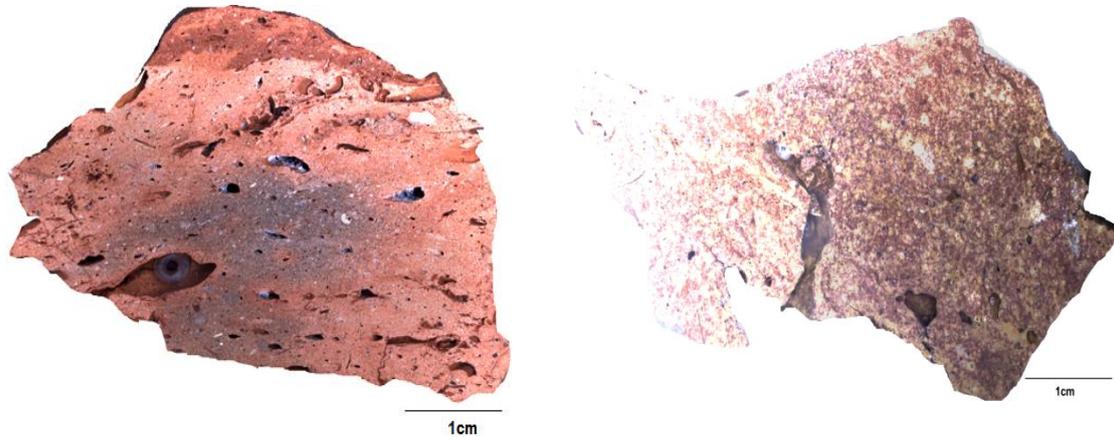


Fig.3.38. Vue macroscopique sur section polies des deux terres cuites à gauche TCP<sub>01</sub> et TCP<sub>02</sub> à droite.

Sous la loupe binoculaire la terre cuite Tcp<sub>01</sub> est composée d'une matrice rouge brique peu vitrifiée dans laquelle on observe des grains de quartz de taille allant jusqu'à 0,5mm avec la présence de plusieurs micropores. Tandis que terre cuite Tcp<sub>02</sub> apparaît plus vitrifiée et moins poreuse que la précédente avec un mélange de couleurs (rouge-marron et jaune) sans que les grains de quartz soient bien visibles au même grossissement, (figure.3.39).

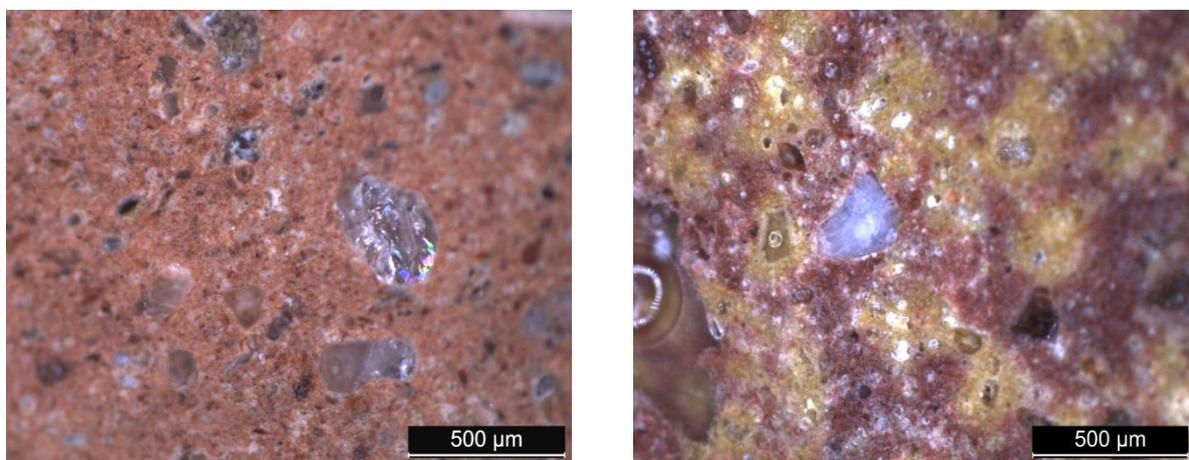


Fig.3.39. Vue à loupe binoculaire des deux échantillons Tcp<sub>01</sub> et Tcp<sub>02</sub>.

### 3.3.2. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X :

Le diffractogramme de la Tcp 01, figure.3.40 montre que l'échantillon est plus vitrifié donc plus bien cuit que le premier figure.3.41 composé de : L'Albite  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , L'anorthite  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , la diopside  $(\text{Ca,Cr})\text{MgSi}_2\text{O}_6$  et du Quartz  $\text{SiO}_2$ .

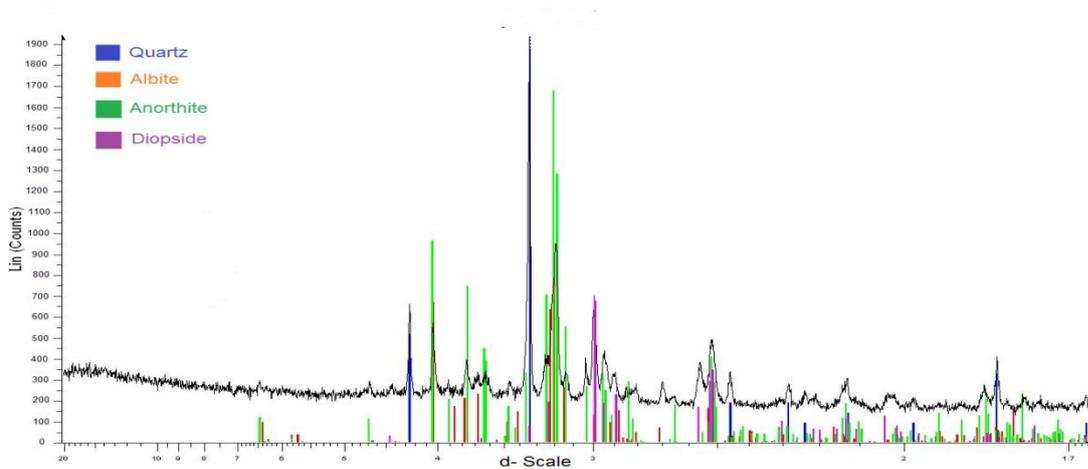


Fig.3.40. Diffractogramme de l'échantillon Tcp01.

Le diffractogramme de la Tcp 02 montre que l'échantillon est composée principalement de : L'Albite  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  aluminosilicate de sodium, la calcite  $\text{CaCO}_3$  qui démontre l'insuffisance de la cuisson soit par température soit par cycle et finalement le quartz  $\text{SiO}_2$  (le minérale le plus important pour cette datation), (figure.3.41).

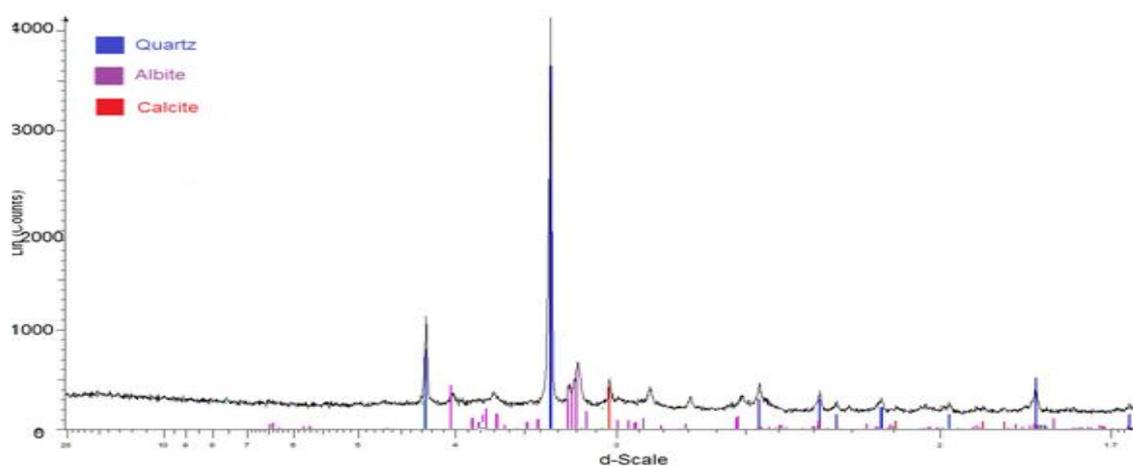


Fig.3.41. Diffractogramme de l'échantillon Tcp02.

### 3.3.4. Observation au MEB-EDS et cartographie X:

Pour la terre cuite TCP<sub>01</sub> en cartographie X, on voit bien la présence du quartz SiO<sub>2</sub> l'image en rouge indique la présence du silicium et en vert l'oxygène la composition de deux images donne du quartz, (figure.3.42.2) et (figure.3.42.3), à la microsonde X le gros grain sur l'image électronique qui a été analysé qualitativement (spectre 2) (figure.3.43.1) et (3.43) et quantitativement le tableau.3.1 confirme qu'il s'agit bien de cristaux de quartz de granulométrie hétérogène et de tailles pouvant atteindre 0.1 mm,

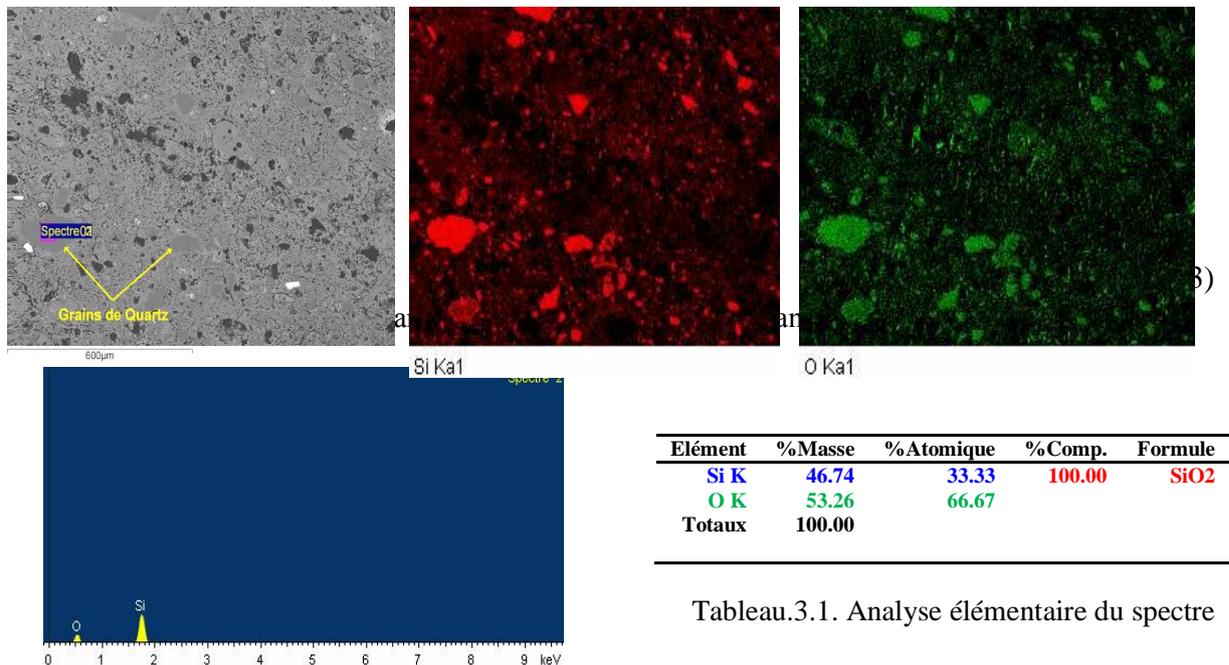


Fig.3.43. Spectre 02 du quartz.

Pour la terre cuite TC<sub>P02</sub> en cartographie X, on voit bien la présence du quartz SiO<sub>2</sub> l'image en rouge indique la présence du silicium et en vert l'oxygène la composition de deux images donne du quartz, (figure.3.44.2) et (figure.3.44.3) à la microsonde X le gros grain sur l'image électronique (figure.3.44.1) qui a été analysé qualitativement (spectre 2) figure 1.48 et quantitativement, tableau.3.2 confirme qu'il s'agit bien de cristaux de quartz de granulométrie très hétérogène et dont les tailles sont plus petites que l'échantillon TC<sub>p 02</sub> ou le plus grand grain ne dépasse pas 0.6 mm, on remarque également la présence des traces de soufre.

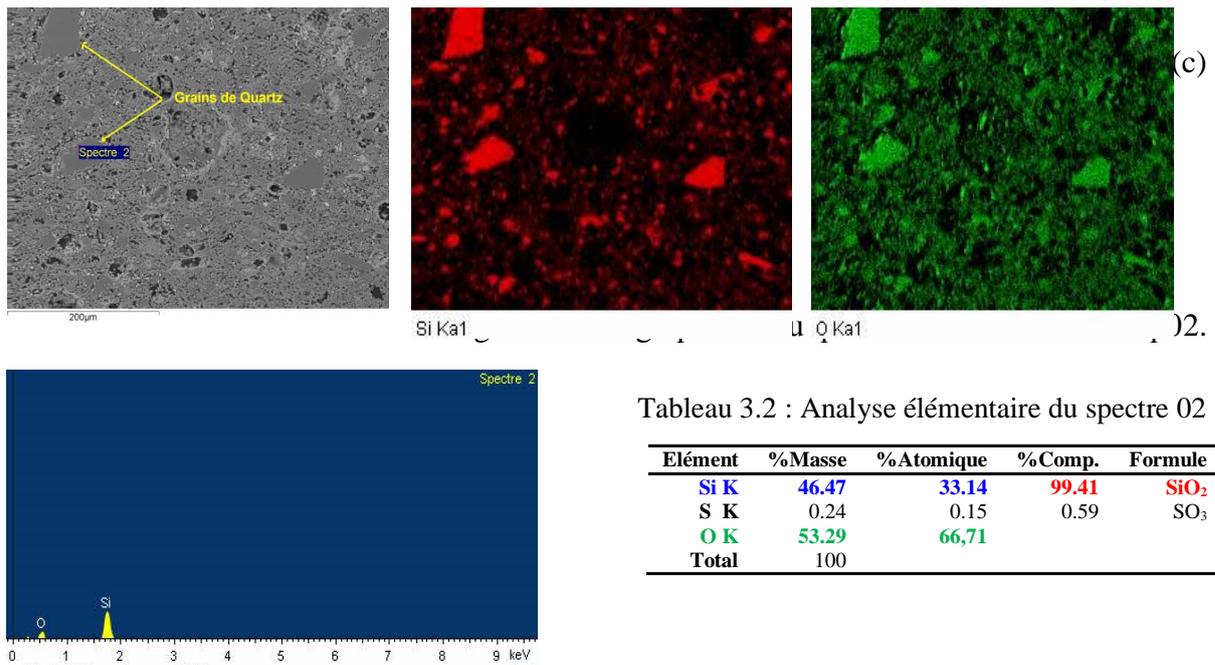


Fig.3.45 : Spectre 02 du quartz.

Tableau 3.2 : Analyse élémentaire du spectre 02

Elément	%Masse	%Atomique	%Comp.	Formule
Si K	46.47	33.14	99.41	SiO <sub>2</sub>
S K	0.24	0.15	0.59	SO <sub>3</sub>
O K	53.29	66.71		
<b>Total</b>	100			

### 3.4. Mesure de Thermoluminescence :

#### 3.4.1. Préparation des terres cuites :

Nous avons choisi d'utiliser la technique des petites inclusions de quartz (*quartz fine grain technique*) pour la datation des TCA. Pour cela, la fraction inférieure à 2 mm suit le protocole de traitement suivant<sup>268</sup> :

- Attaque par une solution diluée d'HCl (HCl 1M) pour éliminer les carbonates, suivie de plusieurs rinçages à l'eau ;
- Attaque par une solution d'eau oxygénée à 30% durant 48 à 72h afin d'éliminer les matières organiques ; suivie de plusieurs rinçages à l'eau.
- Tamisage sous eau à 40µm. La fraction de granulométrie supérieure à 40µm est conservée. Attaque par un mélange d'acides hexafluorosilicique (H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> 31%) et nitrique (HNO<sub>3</sub> 68%) (mélange des solutions concentrées dans un rapport volumique respectif 9 :1) durant 48 à 72h afin de dissoudre les feldspaths et les aluminosilicates du matériau.
- Rinçages à l'acide nitrique dilué, puis à l'eau et séchage.

<sup>268</sup>A.Timar-Gabor, J.-P. Buylaert , B. Guralnik , O. Trandafir-Antohti , D. Constantin, V. Anechitei-Deacu ,M. Jain, A.S. Murray, N. Porat ,Q. Hao, A.G. Wintle, <the importance of grain size in luminescence dating using quartz; Elsevier Radiation Measurements 106 (2017) pages 464.

- La fraction 3-12  $\mu\text{m}$  est sélectionnée par décantations successives dans des tubes à essais contenant de l'acétone. Elle contient quasi-exclusivement des cristaux de quartz. La poudre est stockée avant son étude OSL.
- Pour l'étude OSL, les poudres sont mises en suspension dans l'eau (4mg de poudre pour 1 mL d'eau) et des petits volumes standards sont pipetés en volumes équivalents (150 $\mu\text{l}$ ) à l'aide d'une micro-pipette puis déposés sur des coupelles inox de 8mm de diamètre interne. Les coupelles sont séchées à l'étuve et le matériau ainsi déposé de façon homogène en couche mince est prêt pour l'étude OSL.

NB : Pour chaque étape d'attaque et de rinçage, on respecte les délais de décantation des grains les plus fins que nous souhaitons conserver. Ainsi des grains de quartz de 3 $\mu\text{m}$  décantent-ils naturellement à la vitesse de 3 cm par heure en solution aqueuse. En utilisant la vaisselle classique, on attend approximativement 2h après le début de chaque agitation/attaque pour éliminer la solution surnageante.

### 3.4.2 Mesure de la dose équivalente

#### 3.4.2.1. Instrumentation

Les mesures d'OSL sur le quartz des terres cuites architecturales ont été effectués en utilisant un appareil de lecture de luminescence de type FREIBERG modèle SMART, équipé d'une source d'irradiation bêta  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  avec un débit de dose de  $0.148 \pm 0.004$  Gy. Le système de stimulation qui a été employé pour les analyses est un laser produit par des diodes émettant à 525 nm avec une puissance maximale de 70 mW. Pour la stimulation utilisée dans le test IRSL, un laser de 300 mW de puissance émettant à une longueur d'onde de 850 nm est utilisé. Le système de détection inclus dans le lecteur de luminescence consiste en un tube photomultiplicateur Hamamatsu H7360-02 et un filtre Hoya U340, de 2.5 mm d'épaisseur. Les données de luminescence obtenues sont traitées par le logiciel ANALYST 4.31.9 (Düller, 2015)<sup>269</sup>.

Les mesures de spectrométrie gamma à bas bruit de fond ont été réalisées à l'aide d'un détecteur Germanium de haute pureté. Il s'agit d'un détecteur puits refroidi à l'azote liquide en forme de U de marque Eurisys Mesures, modèle EGPC 200 P17. Le volume actif du détecteur est de 200  $\text{cm}^3$  et les dimensions du puits sont de 17mm de diamètre et 50mm de profondeur. Le détecteur est situé dans une enceinte de plomb cylindrique dont l'épaisseur est en tous points supérieure ou égale à 15cm. Des anneaux de plomb de basse et très basse activité ainsi que des anneaux de cuivre électrolytique enveloppent le détecteur. Le signal issu de germanium est traité par un analyseur 8000 canaux. Les données spectrales sont acquises et traitées par le logiciel GENIE2000 (Canberra/Myrion Technologies) puis retraitées par un classeur Excel dédié.

---

<sup>269</sup> Duller Geoff, Luminescence Dating: Guidelines on using luminescence dating in archaeology, Aberystwyth University, September 2008

### 3.4.2.2. Détermination de la dose archéologique:

Pour la mesure de la dose archéologique, nous avons utilisé la technique des petites inclusions de quartz (*quartz fine grain technique*), dans la mesure où les fragments de brique présentaient une pâte céramique très fine (Blain et al., 2007)<sup>270</sup>. Cette technique est selon nous l'une des moins consommatrices de matière et aussi la plus précise pour la datation de ce type de matériau. La technique consiste à utiliser les quartz de dimensions telles que les particules alpha provenant de la pâte céramique traversent les cristaux. La granulométrie choisie a été 3-12 µm approximativement.

#### Protocole de mesure

Le protocole qui a été employé pour la détermination de la dose équivalente beta des briques est issu des travaux de Ian Bailiff (Bailiff and Holland,<sup>271</sup> 2000 ; Bailiff, 2007<sup>272</sup>). C'est un protocole dérivé du SAR (Single Aliquot Regenerative), procédure très universellement utilisée pour la datation des dépôts sédimentaires, comme décrit par Murray et Wintle (Murray & Wintle, 2000<sup>273</sup> ; Wintle et Murray, 2006<sup>274</sup>). Il est important de préciser que sur une même aliquote les mesures de l'OSL naturelle sont directement comparées à celles de l'OSL des doses de régénération, ce qui permet de déduire une dose équivalente à partir d'une seule prise d'essai. Cependant, il est nécessaire de préciser que cette technique suppose une multiplication des prises d'essai afin d'évaluer expérimentalement l'incertitude statistique de la mesure de dose archéologique. A la différence du protocole SAR classique, le protocole mis en œuvre pour les briques tient compte du fait que les matériaux ont été fortement chauffés dans le passé et qu'inévitablement il y a une variation progressive de la sensibilité à l'irradiation au cours des mesures, liée au remplissage progressif des pièges très profonds par des électrons issus des pièges « optiques » ou photo-sensibles (voir par exemple un article de synthèse sur les modèles physiques utilisés en datation par luminescence, McKeever et Chen, 1997)<sup>275</sup>.

---

<sup>270</sup> Blain S, Guibert P, Bouvier A, Vieilleigne E, Bechtel F, Sapin C, Baylé M, 2007. TL-dating applied to building archaeology: The case of the medieval church Notre-Dame-sous-Terre (Mont-Saint-Michel, France). *Radiation Measurements* 42: 1483-1491.

<sup>271</sup> Bailiff IK, Holland N, 2000 Dating bricks of the two last millennia from Newcastle upon Tyne: a preliminary study, *Radiation Measurements* 32, pp 615- 619.

<sup>272</sup> Bailiff, I.K., 2007, Methodological developments in the luminescence dating of brick from English late-medieval and post-medieval buildings. *Archaeometry* 49, 827-851. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-754.2007.00338.x>

<sup>273</sup> Murray, A.S., Wintle, A., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 523–538.

<sup>274</sup> Wintle AG and Murray AS, 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* 41(4): 369–391, DOI 10.1016/j.radmeas.2005.11.001.

<sup>275</sup> McKeever S.W.S. et Chen R., 1997, Luminescence models, *Radiation Measurements*, Vol. 27p 56

Le tableau.3.3, décrit le protocole utilisé. La mesure du signal résiduel à toutes les étapes du protocole permet de mettre en évidence une éventuelle évolution du niveau zéro de l'OSL au cours de la mesure. De même l'évolution du signal test,  $T_n$  ou  $T_i$ , permet de corriger les changements de sensibilité du matériau.

Les doses de régénération en étapes 1 et 5 pour l'étude des préchauffages ou en étapes 2 et 5 pour le protocole de mesure des doses équivalentes étant les mêmes il est possible de vérifier l'adéquation des corrections de sensibilité en cours de mesure (test de recyclage). L'OSL issue de la dose test à l'étape 0, a été utilisée comme référence pour un test dit de « recouvrement » destiné à vérifier que la mesure de la dose est bien conforme à celle qui a été administrée (test de recovery). Enfin plusieurs températures de préchauffage sont possibles échelonnées généralement entre 180 et 240°C. La mise en œuvre d'un préchauffage a pour objectif de réduire au maximum l'influence de composantes thermiquement instables sur les signaux naturels, régénérés et tests.

#### **3.4.2.3. Détermination de la température de préchauffage**

Pour chaque échantillon, la détermination préalable des meilleures conditions de préchauffage est nécessaire. Des tests ont été effectués pour des températures de préchauffage distinctes (180, 200, 220 et 240°C), sur 12 disques. Nous avons utilisé 3 disques pour la même température de préchauffage afin de tester la reproductibilité des observations. Le tableau 1.4 , présente les résultats obtenus. Dans ce travail nous avons retenu la température de préchauffage qui produit les moindres évolutions du rapport de recyclage (déterminé entre l'étape 1 et l'étape 5 du protocole SAR), autrement exprimé, nous utilisons les conditions de préchauffage du matériau qui induisent les moindres perturbations de la sensibilité du matériau tout en permettant l'effacement des composantes thermiquement instables. Nous avons finalement opté pour les conditions suivantes :

- 200°C pour (TCP02)
- 210°C pour (TCP01)

#### **3.4.2.4. Facteur d'efficacité alpha**

Le facteur d'efficacité alpha n'a pas été mesuré ici mais posé égal à  $0.03 \pm 0.01$ , ce qui correspond à des valeurs usuelles de ce paramètre pour l'OSL des quart

#### **3.4.2.5. Détermination des doses équivalentes**

Le même protocole que celui présenté au tableau.3.5, a été utilisé, mais avec des préchauffages de température définis (210°C pour (TCP<sub>01</sub>) et 200°C pour (TCP<sub>02</sub>). Nous avons cependant modifié les doses de régénération de façon à les adapter à la valeur de la dose équivalente que nous avons pu estimer plus précisément avec les mesures

Tableau.3.3 Protocole de mesure de la dose archéologique des grains fins extraits des terres cuites architecturales pour une prise d'essai (disque contenant un dépôt en couche mince de grains fins de quartz).

Etape	Opération	Grandeur mesurée	
Mesure du signal naturel			
Etape 0	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub> (10 secondes à la température de préchauffage T <sub>p</sub> )		
	Lecture signal OSL Nat à 125°C durant 40s	L <sub>n</sub>	
	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub>		
	Lecture signal OSL résiduel à 125°C durant 40s	RL <sub>n</sub>	
	Irradiation par dose test D <sub>0</sub> (2.98 Gy)		
	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub> (10 secondes à la température de préchauffage T <sub>p</sub> )		
	Lecture signal OSL test à 125°C durant 40s	T <sub>n</sub>	
	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub>		
	Lecture signal OSL résiduel à 125°C durant 40s	RT <sub>n</sub>	
Mesures des signaux d'OSL régénérés (étapes i = 1 à 5)			
Etape i	Irradiation par une dose de régénération D <sub>i</sub> = { 2.98 ; 5.96 ; 8.94 ; 0 ; 2.98, 11.92 } Gy pour les tests de préchauffage D <sub>i</sub> = { 1.49 ; 2.98 ; 4.47 ; 0 ; 2.98, 5.96 } Gy pour la mesure des doses équivalentes		
	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub> (10 secondes à la température de préchauffage T <sub>p</sub> )		
	Lecture signal OSL Nat à 125°C durant 40s	L <sub>i</sub>	
	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub>		
	Lecture signal OSL résiduel à 125°C durant 40s	RL <sub>i</sub>	
	Irradiation par dose test D <sub>0</sub>		
	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub> (10 secondes à la température de préchauffage T <sub>p</sub> )	T <sub>i</sub>	
	Lecture signal OSL test à 125°C durant 40s		
	Préchauffage 10s@T <sub>p</sub>		
	Lecture signal OSL résiduel à 125°C durant 40s	RT <sub>i</sub>	

Tableau.3.4. Détermination des conditions de mesure de la dose archéologique des TCA sur la base des rapports de recyclage de l'OSL.

Echantillon	Température de préchauffage (C°)	180°C	200°C	220°C	240°C
TCP02	<i>Recycling ratio</i>	0.96 ± 0.06	0.95 ± 0.09	1.04 ± 0.11	1.24 ± 0.15
TCP01	<i>Recycling ratio</i>	1.21 ± 0.14	0.88 ± 0.14	1.13 ± 0.13	1.32 ± 0.10

Tableau.3.5. Détermination des doses équivalentes des TCA. Le rapport de recyclage a été réévalué à partir des mesures SAR. Le tableau présente la moyenne et l'écart-type sur la moyenne de ce rapport, données qui sont donc évaluées à partir d'un plus grand nombre d'aliquots que lors de l'étude des conditions de préchauffage. Les valeurs mesurées, proches de 1, confirment a posteriori le bien fondé des choix de préchauffage.

Echantillon	Nb de disques utilisés pour la mesure de la dose équivalente	Quantité de matière moyenne déposée dans les disques	Recycling ratio	Dose équivalente (Gy)
(TCP02)	19	0.3mg	0.972±0.038	3.65±0.08
(TCP01)	16	0.1mg	1.064±0.036	2.52±0.14

### 3.4.3. Dose annuelle d'irradiation

La dose annuelle d'irradiation correspond à la dose absorbée par les minéraux luminescents à partir desquels sont déterminées les doses archéologiques. Il s'agit donc des petites inclusions de quartz dans le cas des terres cuites, et des grains individuels de quartz dans le cas des mortiers de chaux.

#### 3.4.3.1. Les composantes de la dose annuelle

L'irradiation naturelle provient des particules alpha, béta, photons gamma et rayons cosmiques qui cèdent tout ou partie de leur énergie au matériau à dater. En raison du parcours très différent de ces diverses particules et rayonnements dans la matière (20µm pour les alphas, 2 mm pour les betas, 30 cm pour les gammas, plusieurs mètres pour les cosmiques) nous distinguons plusieurs composantes :

La composante alpha a pour origine les désintégrations de l'uranium et du thorium : l'irradiation alpha provient de l'environnement immédiat des grains luminescents mais aussi des grains de quartz lorsque ceux-ci contiennent des traces non négligeables de radioéléments.

La composante béta, issue des désintégrations de K, U et Th, provient essentiellement de l'environnement des grains de quartz, sur un rayon d'environ 2mm. Si les grains sont loin d'une discontinuité d'irradiation (plus de 2 mm des interfaces entre deux matériaux de construction par exemple), la dose béta provient exclusivement de l'échantillon à dater, la brique. Si les grains luminescents eux-mêmes contiennent des radioéléments, une part faible de l'irradiation peut provenir aussi de cette source.

La composante gamma provient des radioéléments K, U et Th, présents dans l'échantillon à dater et dans son environnement.

La composante cosmique très pénétrante, est atténuée par les éléments architecturaux ou les matériaux d'enfouissement qui font écran à leur parcours vers l'échantillon.

La dose annuelle est donc la somme de ces diverses contributions, selon :

$$\dot{d} = k \cdot \dot{d}_\alpha + \dot{d}_\beta + \dot{d}_\gamma + \dot{d}_{\text{cosm}}$$

Le facteur k, est le facteur d'efficacité des particules alpha comparativement aux beta et gamma. D'une manière générale ce facteur est très petit, ce qui signifie que la dose égale, les particules alpha fournissent un signal d'OSL qui est une fraction k (de l'ordre de quelques %) du signal fourni par les béta ou gamma. L'origine de cette différence est liée à la nature des particules alpha, comparativement aux betas et aux électrons secondaires de haute énergie générés par les interactions de la matière avec les gammas ou les rayonnements cosmiques, et leur capacité d'ionisation du matériau irradié. Il est déterminé expérimentalement par des expériences d'OSL comparatives entre des irradiations alpha et beta calibrées (voir par exemple Aitken, 1985).<sup>276</sup>

### 3.4.3.2. Mesures radiochimiques

On détermine la composante alpha et beta à partir de mesures radiochimiques des échantillons à dater par spectrométrie gamma à bas bruit de fond (Guibert et al., 2009b)<sup>277</sup>. Des mesures complémentaires éventuelles par ICP MS sont réalisées sur les grains luminescents qui permettent la mesure de dose archéologique, lorsqu'on estime que ces grains contiennent des radioéléments en quantité notable (De Corte et al., 2006<sup>278</sup> ; Vandenberghe et al., 2008<sup>279</sup> ; Guibert et al., 2009a<sup>280</sup> ; Urbanová et al., 2018<sup>281</sup>). En travaillant sur les petites inclusions de quartz comme nous l'avons fait ici sur les deux échantillons de brique, TCP<sub>02</sub> et TCP<sub>01</sub>, il n'est cependant pas nécessaire de mesurer leurs teneurs en radioéléments car nous supposons dans ce cas vérifiée l'hypothèse de continuité radiochimique et d'irradiation alpha entre les grains fins et leur environnement local.

<sup>276</sup> Aitken M.J., 1985. Thermoluminescence dating. Academic Press, London, p359

<sup>277</sup> Guibert, P., Lahaye, C., Bechtel, F., 2009b. The importance of U-series disequilibrium of sediments in luminescence dating: a case study at the Roc de Marsal cave (Dordogne, France). *Radiat. Meas.* 44, 223-231

<sup>278</sup> De Corte F., Vandenberghe D., Buylaert J.-P., Van den Haute P., Kučera J., 2006. Relative and k<sub>0</sub>-standardized INAA to assess the internal (Th, U) radiation dose rate in the "quartz coarse-grain protocol" for OSL dating of sediments: Unexpected observations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 564, 743–751.

<sup>279</sup> Vandenberghe D., De Corte F., Buylaert J.-P., Kučera J., Van den Haute P., 2008. On the internal radioactivity in quartz. *Radiation Measurements* 43 (2008) 771 – 775.

<sup>280</sup> Guibert, P., Bailiff, I.K., Blain, S., Gueli, A.M., Martini, M., Sibilia, E., Stella, G., Troja, S.O., 2009a. Luminescence dating of architectural ceramics from an early medieval abbey: the St-Philbert intercomparison (Loire-Atlantique, France). *Radiat. Meas.* 44 (5-6), 488-493.

<sup>281</sup> Urbanová P., Michel A., Cantin N., Guibert P., Lanos P., Dufresne P., Garnier L., 2018. A novel interdisciplinary approach for building archaeology: The integration of mortar "single grain" luminescence dating into archaeological research, the example of Saint Seurin Basilica, Bordeaux. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 20, 307-323.

### 3.4.3.3. Composante environnementale de la dose annuelle

Afin de déterminer la composante environnementale de l'irradiation, nous effectuons généralement des mesures sur site, aux points précis de prélèvement, par gammamétrie (à l'aide d'une sonde sensible au rayonnement gamma et cosmique) et par dosimétrie par luminescence à l'aide de pastilles d'alumine frittée en conditions réductrices ( $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$ ) qui ont une très haute sensibilité à l'irradiation. Dans ce travail il n'a pas été effectué de telles mesure et nous avons simplement proposé une estimation plausible de cette composante compte tenu de la position des échantillons dans la structure architecturale et des matériaux environnants qui sont connus pour disposer plutôt d'une faible radioactivité (marbre et calcaire). La valeur choisie est :  $0.60 \pm 0.20$  mGy/an rend compte de ce niveau de radioactivité. Elle contient également un terme cosmique que nous évaluons à environ 0.2 mGy/an.

### 3.4.3.4. Le rôle de l'humidité

Nous devons souligner que les mesures en laboratoire sont effectuées sur des échantillons secs, et nous devons tenir compte de l'humidité des matériaux en situation « archéologique », c'est-à-dire estimer la teneur en eau moyenne depuis la mise en place des matériaux pour déterminer la dose annuelle d'irradiation. Les échantillons de TCA ont été prélevés sur des structures en élévation et ils étaient secs au moment de leur prise en charge au laboratoire. Nous avons considéré que cet état sec était aussi l'état archéologique.

### 3.4.3.5. Résultats des évaluations de la dose annuelle

Les mesures de radioéléments des briques par spectrométrie gamma à bas bruit de fond sont présentées au tableau.3.6.

Tableau.3.6. Humidité et teneurs en radioéléments des échantillons de brique. L'incertitude correspond à un écart-type.

Echantillon	H <sub>2</sub> O (%)	U( <sup>238</sup> U) (ppm)	U( <sup>226</sup> Ra) (ppm)	U( <sup>210</sup> Pb) (ppm)	Th (ppm)	K (%)
(TCP02)	0.0	2.16 ± 0.19	2.34 ± 0.04	2.74 ± 0.43	8.41 ± 0.12	1.29 ± 0.03
(TCP01)	0.0	2.01 ± 0.17	2.07 ± 0.03	1.84 ± 0.35	7.93 ± 0.11	1.35 ± 0.02

Pour les séries de l'uranium on distingue trois ensembles de mesure selon la nature des émetteurs gamma :

U(<sup>238</sup>U) est la teneur en uranium déterminée à partir de <sup>234</sup>Th et <sup>235</sup>U isotopes respectivement en équilibre et en rapport constant avec <sup>238</sup>U ;

U(<sup>226</sup>Ra) est la teneur équivalente en uranium déterminée à partir de <sup>214</sup>Pb et <sup>214</sup>Bi, dans les conditions d'équilibre entre <sup>226</sup>Ra et <sup>222</sup>Rn (conteneur étanche, attente de l'équilibre pour la mesure) ;

$U(^{210}Pb)$  est la teneur équivalente en uranium déterminée à partir de  $^{210}Pb$ .

Ces trois mesures de l'uranium permettent d'évaluer l'état d'équilibre de la chaîne de l'uranium, ce qui donne quelques indices sur d'éventuelles évolutions de la radioactivité du matériau en raison de l'apport ou du l'appauvrissement de certains éléments solubles ou mobiles.

Par exemple,  $U(^{210}Pb)$  est un indicateur de l'activité moyenne du radon-222 dans l'échantillon depuis 30 ans (le radon est un élément appartenant à la série des gaz inertes chimiquement : il est relativement peu lié au matériau qui le génère). Une valeur plus faible de  $U(^{210}Pb)$  que  $U(^{226}Ra)$  est interprété comme un départ de radon continu dans l'élément de maçonnerie concerné, à l'inverse une valeur plus importante, signifie dans le bilan un apport de radon provenant des éléments voisins. Ici,  $^{210}Pb$  et  $^{226}Ra$  sont assez proches, aux incertitudes de mesure près. Celles-ci sont assez élevées néanmoins pour  $^{210}Pb$  avec le détecteur puits réservé aux faibles quantités de matière. Elles ne montrent pas de déséquilibre très prononcé et nous pouvons considérer que le radon formé reste confiné dans le matériau.

Par ailleurs on constate un bon accord entre  $U(^{238}U)$  et  $U(^{226}Ra)$ , indication de l'absence d'altération héritée de la matière première et absence d'altération du matériau survenue au cours de l'enfouissement ou de l'exposition de la maçonnerie à des conditions environnementales plutôt agressives.

Enfin globalement, les deux échantillons ont une composition radiochimique très proche, ce qui pourrait indiquer une ou des sources d'argile assez homogènes pour la fabrication de ces briques. Il ne s'agit ici que d'un indice et d'autres éléments de caractérisation sont évidemment nécessaires pour préciser l'existence ou non de plusieurs sources de matière première.

La conversion teneur/dose annuelle est effectuée à partir des coefficients de conversion calculés et publiés par Guérin et al., 2011. Par rapport à la présentation originale des auteurs nous les avons modifiés pour tenir compte des scénarios de potentiel déséquilibre des séries de l'uranium des échantillons. Ainsi, nous avons regroupé des radioéléments en filiation radioactive selon la nature de l'isotope parent et des hypothèses d'altération. Ainsi nous supposé que la différence d'activité entre le radium-226 et l'uranium-238 pouvait être lié à une altération de la concentration en uranium. Cela conduit à regrouper les isotopes allant de  $^{238}U$  à  $^{234}U$  et de  $^{235}U$  à  $^{231}Th$ . L'activité de ces isotopes est caractérisée par celle de  $^{238}U$  ou de  $^{235}U$ . L'activité de  $^{230}Th$  est associée à  $^{226}Ra$  pour la série de  $^{238}U$  et au fragment  $^{231}Pa...^{207}Pb$  pour la série de  $^{235}U$ . Cette table différencie également l'activité de  $^{226}Ra$  et celle de  $^{210}Pb$ . Si nous

supposons la mobilité du radon-222, son activité moyenne est représentée par celle de  $^{210}\text{Pb}$ . Du point de vue de la cinétique du déséquilibre nous avons supposé que celui-ci a été constant durant toute la durée « archéologique » qui nous intéresse (tableau.3.7).

Tableau.3.7.Doses spécifiques annuelles issues de Guérin et al., 2011<sup>282</sup> (en mGy/an). Nous différencions différents fragments des séries U pour tenir compte du scénario de déséquilibre en uranium des échantillons (déséquilibre constant dans le temps ayant pour origine la mobilité de l'élément U et celle du radon-222).

élément	Unité de concentration	Série d'isotopes concernés	Alpha	Béta	Gamma
U( $^{238}\text{U}$ )	Ppm	$^{238}\text{U} \dots ^{234}\text{U}$ et $^{235}\text{U} \dots ^{231}\text{Th}$	0.5706	0.056	0.0017
U( $^{226}\text{Ra}$ )	Ppm	$^{230}\text{Th} \dots ^{226}\text{Ra}$ et $^{231}\text{Pa} \dots ^{207}\text{Pb}$	0.6961	0.0041	0.002
U( $^{210}\text{Pb}$ )	Ppm	$^{222}\text{Rn} \dots ^{206}\text{Pb}$	1.5283	0.0855	0.1079
Th	Ppm	$^{232}\text{Th} \dots ^{208}\text{Pb}$	0.7375	0.0277	0.0479
K	%	$^{40}\text{K} \dots ^{40}\text{Ar}, ^{40}\text{Ca}$	-	0.7982	0.2491

Les valeurs de dose annuelle et de ses composantes sont présentées tableau.3.8. La perte de précision la plus importante est liée à l'absence de mesures sur le terrain de la dose annuelle environnementale. Ce que l'on sait c'est que si l'environnement n'était constitué que de briques, la dose annuelle gamma maximale serait celle fournie par un milieu infini composé de briques de même composition, soit environ 1 mGy/an à laquelle viendrait s'ajouter la contribution cosmique, de l'ordre de 0.2mGy/an en tenant compte des effets d'écran des maçonneries en élévation. A priori les briques sont des éléments de maçonnerie minoritaires, aussi, même si nous ne connaissons ni la proportion des autres matériaux dans l'environnement des échantillons, ni leur radioactivité propre, ni les dimensions des briques, par comparaison avec d'autres sites construits comprenant des arases de briques ou des briques isolées dans un environnement calcaire, nous estimons que la valeur de  $0.6 \pm 0.2$  mGy/an est une valeur approchée réaliste.

<sup>282</sup> Guérin, G., Mercier, N., Adamiec, G., 2011. Dose-rate conversion factors: update..Ancient TL, 29, 5-

Tableau.3.8. Composantes de la dose annuelle et dose annuelle totale.

Echantillon	$\dot{d}_\alpha$ (mGy/an)	$\dot{d}_\beta$ (mGy/an)	$\dot{d}_{env}$ (mGy/an)	Dose annuelle totale ( $\dot{d}$ ) (mGy/an)
(TCP02)	0.40 ± 0.14	1.60 ± 0.05	0.60 ± 0.20	2.60 ± 0.25
(TCP01)	0.34 ± 0.12	1.55 ± 0.04	0.60 ± 0.20	2.49 ± 0.24

### 3.5. Datation des échantillons

Le tableau.3.9, présente pour chaque échantillon de terre cuite architecturale, la dose archéologique, la dose annuelle et l'âge en années par rapport à 2019 ainsi que le détail des incertitudes systématiques et statistiques. Nous donnons également l'âge calendaire des terres cuites architecturales selon le calendrier commun (CE : *selon le calendrier chrétien adopté en Europe*)<sup>283</sup>. L'incertitude correspond ici à un écart-type. Nous avons distingué les incertitudes systématiques et les incertitudes statistiques. Les incertitudes statistiques résultent de la précision individuelle des mesures ou des estimations. Dans ce travail la part des estimations dans les incertitudes statistiques est très importante et c'est essentiellement la méconnaissance de la dose annuelle environnementale qui joue un rôle important et dans une moindre mesure, l'incertitude sur la mesure de la dose équivalente de l'échantillon (TC<sub>P01</sub>), de relativement faible sensibilité et qui a fourni très peu de quartz de la dimension requise. D'autre part la quantité de matière introduite dans les coupelles, 0.1mg environ, est extrêmement faible et rend compte de la rareté de ces minéraux à notre disposition (habituellement les quantités disponibles sont de l'ordre de 0.5 à 1 mg).

L'incertitude systématique résulte des incertitudes de calibration des systèmes de mesure, en particulier de celles des sources radioactives installées sur les machines d'OSL. L'incertitude de calibration, implique une incertitude qui varie proportionnellement à l'âge et de la même manière pour l'ensemble des échantillons étudiés avec le même équipement. L'incertitude globale est la somme quadratique des incertitudes systématiques et statistiques, que nous supposons bien évidemment indépendantes (CEA 1978).

Tableau.3.9. Résultats de datation par OSL des deux terres cuites architecturales provenant de la mosquée Sidi Ghanem.

Echantillon	Dose archéologique (Gy)	Dose annuelle (mGy/an)	Âge (années)	Incertitude. (années)	Date (années)
TCP02	3.65±0.08	2.60 ± 0.25	1403	78	616±70 Ap-JC
TCP01	2.52±0.14	2.49 ± 0.24	1012	80	1007±80 Ap-JC

<sup>283</sup> CEA (collectif anonyme), 1978 - Statistique appliquée à l'exploitation des mesures, t.1, Ed. Masson,

Les résultats obtenus par la datation OSL en grain unique sur les terres cuites architecturales de la mosquée de sidi Ghanem montre que ces dernières à la période médiévale avec certaines incertitudes pour le premier échantillon T<sub>cp</sub>02 est daté en 616 Ap-JC plus au moins 78 ans, qui correspond à un intervalle de fabrication de cette brique situé entre [538 - 694] Ap-JC car (1<sup>ier</sup> hégire correspond à 622 après J-C)<sup>284</sup>, si nous projetons ces dates sur le calendrier hégirien nous obtenons l'intervalle de [-84 et 72] H, (fig.3.46), les dates avant l'Installation de la dynastie de *banū umayya* ou les Omeyyades [661 - 750] Ap-JC (Andrew Marsham,2009)<sup>285</sup> car sous la règne de ces derniers qui commence les conquêtes vers la rive sud de la méditerranée et du moyen orient et notamment sous le commandement de *Oqba ibn Nāfi* [670-674] puis *Abou Mouhadjer dinar* [674-681] puis de nouveau *Oqba ibn Nāfi* [681-683] qu'a eu les l'invasions du Maghreb jusqu'à l'océan atlantique (Edward Gibbon et François Guizot, 1819)<sup>286</sup>, donc nous pouvons admettre que l'intervalle entre [670 - 694] Ap-JC soit [48 - 72] H, comme intervalle logique est acceptable de la fabrication de la terre cuite T<sub>CP</sub><sub>02</sub> et l'édification de la partie primitive de la mosquée si on considère la durée entre la fabrication de cette terre cuite et son insertion dans la maçonnerie est très négligeable.

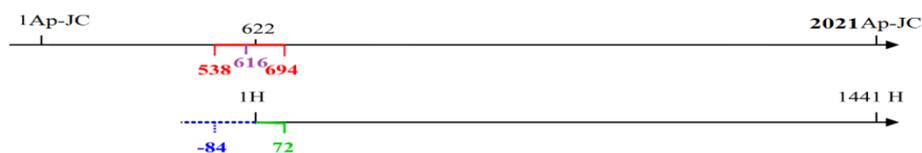


Fig.3.46 Chronologique de l'édification de la mosquée

Pour la deuxième terre cuite T<sub>cp</sub> 01, elle est fabriquée entre [927- 1087] ap-JC qui correspond à [305-465] H entre la dynastie Zirides ou *banū Zīrī* [972-1014] ap-JC qui correspond à [350-393] et la dynastie de *Banū Ḥammād* ou Hammadides [1019 -1152] Ap-JC qui correspond à [397-530] (*Abou Zeïd Abdelrahman ibn Mohammed ibn Khaldoun al-Hadrami*)<sup>287</sup>, l'hypothèse la plus probable est celle que la mosquée à été agrandi par les Hammadides vu que des éléments de décor d'inscription coufique qui ressemble à celui trouvé par Golvin à la Qala'a de *Banū Ḥammād* ou la ville de Mila a connue un développement considérable pour cela nous pouvons admettre que l'intervalle [1019-1087] Ap-JC qui correspond à [397-465] H comme intervalle de modification de cette mosquée(extension) figure.(3.47).

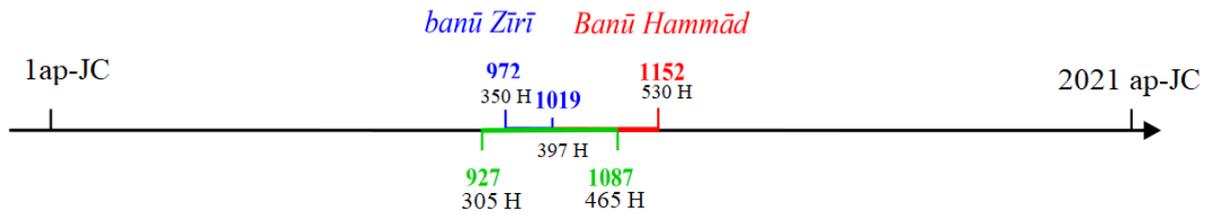


Fig.3.47. chronologique de modification de la mosquée.

---

<sup>284</sup> Hakim Mohammed Saïd, L'Hégire, Le Courrier de l'UNESCO: une fenêtre ouverte sur le monde, 1981, XXXIV, 8/9, p. 43

<sup>285</sup> Andrew M, *Rituals of Islamic Monarchy: Accession and Succession in the First Muslim Empire*, Édimbourg, Edinburgh University Press, 15 avril 2009, P99.

<sup>286</sup> Edward Gibbon et François Guizot (éditeur et réviseur), *Histoire de la décadence et de la chute de l'Empire romain, t. 10, Paris, Lefèvre, 1819, P 283.*

<sup>287</sup> Ibn Khaldoun, *Les prolégomènes d'Ibn Khaldoun*, vol. 2, p508

#### 4. Conclusion :

L'analyse stratigraphique architecturale de la mosquée est la comparaison des différentes cartes et plans montre que l'édifice actuel n'est pas été construit sous sa forme actuelle; nous pouvons citer les importantes modifications comme suit :

- Deux constructions greffées une sur le mur nord et l'autre située au nord-est de l'enceinte qui sont bien visibles sur la carte de la ville élaboré en 1937 par l'armée française et qui sont debout jusqu'à nos jours n'apparaissent pas sur la carte élaborée par Delamare de 1841, en plus l'étude stratigraphique de ces deux constructions montre qu'elles ont été construites ultérieurement à l'enceinte. Ces données permettent de dire que ces deux constructions ont été construites lors de réaménagement de la mosquée par les français.
- Le minaret est visible sur le plan de Delamare de 1841 est dessiné par ce dernier ne figure pas sur le plan de génie militaire français de 1937 ce qui nous conduit à dire que cette dernière a été démolie entre 1841 et 1937 par les français.
- La troisième construction greffée sur le Sud-Est est visible sur la carte de Delamare de 1840 donc elle est antérieure à la période coloniale.
- Les murs de l'enceinte montrent une continuité dans leur construction les uns par rapport aux autres ce qui montre leur authenticité, la toiture montre une modification par le rehaussement du centre par rapport aux extrémités et l'utilisation de la tuile mécanique moderne.

La présence d'un mihrab situé vers le sud caractéristique des mosquées médiévales sur la première ligne des colonnes sud donne un signe que l'enceinte actuelle résulte d'une extension d'une enceinte primitive comprenant quatre nefs et six travées reposant sur des éléments anciens. Ceci nous a conduit vers l'étude chronologique absolue par luminescence stimulée optiquement sur le quartz contenu dans les briques de terre cuite qui composent les arcs de l'enceinte actuelle et l'enceinte supposée primitive.

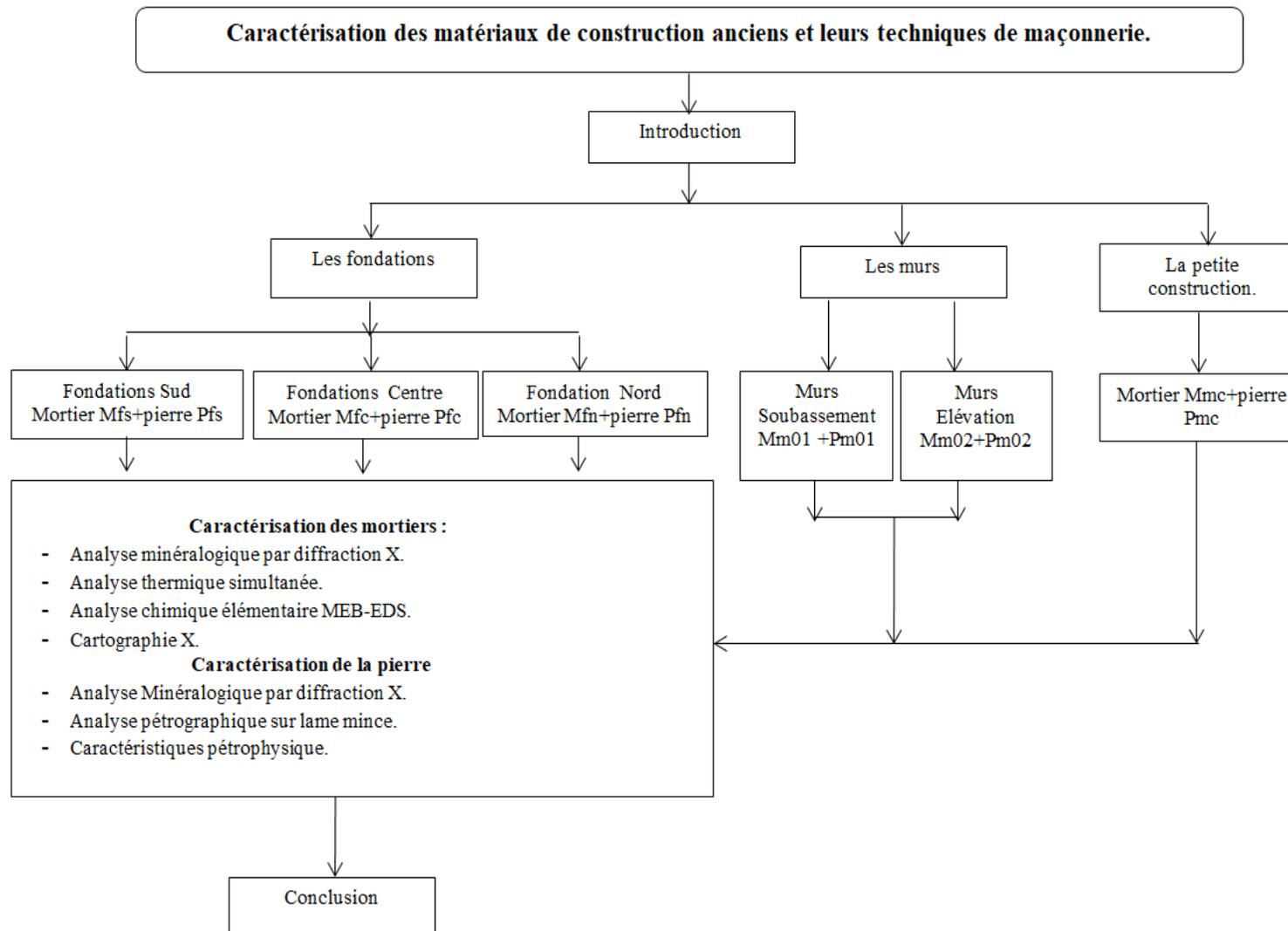
Les résultats obtenus par la datation OSL en grain unique sur les terres cuites architecturales de la mosquée de Sidi Ghanem montre que ces dernières remontent à la période médiévale. Le premier échantillon de l'enceinte primitive est daté en 616 Ap-JC plus au moins 78 ans, qui correspond à un intervalle de fabrication de cette brique situé entre [538 – 694] Ap-JC, si nous projetons ces dates sur le calendrier hégirien nous obtenons l'intervalle de [-84 – 72] H, (figure 1.37).

Donc nous pouvons admettre que l'intervalle entre [670 - 694] Ap-JC soit [48 - 72] H comme intervalle logique est acceptable à la fabrication de la terre cuite et l'édification de la partie primitive de la mosquée en considérant que la durée entre la fabrication de cette terre cuite et

son insertion dans la maçonnerie est très négligeable.

Pour la deuxième terre cuite de l'enceinte actuelle, elle est fabriquée entre [927- 1087] Ap-JC qui correspond à [305-465] H entre la dynastie Zirides ou banū Zīrī [972-1014] et la dynastie de Banū Ḥammād ou Hammadides [1019 -1152] ap-JC (Ibn Khaldoun) l'hypothèse la plus probable est celle que la mosquée à été agrandi par les Hammadides vu que des éléments de décor d'inscription coufique qui ressemble à celui trouvé par Golvin à la Qala'a de Banū Ḥammād ou la ville de Mila a connu un développement considérable. A cet effet pour cela nous pouvons admettre que l'intervalle [1019 -1087] ap-JC qui correspond à [397-465]H est la période de modification de la mosquée de Sidi Ghanem.

**Chapitre 04**  
*Caractérisation des matériaux de construction  
anciens et leurs techniques de maçonnerie*



## **1.Introduction :**

Ce cortège d'analyse nous à permet de mieux connaitre les matériaux de construction utilisée dans l'édification de cette mosquée pour chaque période chronologique et vérifier si notre découpage ou bien notre lecture de l'édifice par l'approche stratigraphique verticale de l'édifice est correcte et aussi connaitre les technique de maçonnerie et la méthode de mise en œuvre des mortiers par les civilisations qui se sont succédées dans cette ville millénaire.

Les résultats des caractéristiques de ces matériaux nous a apporté une vision plus claire sur la chronologie des constructions et l'aptitude de ces matériaux à résister aux temps et aux environnements.

Nous avons étudié dans ce chapitre les unités stratigraphiques abordés dans le chapitre précédent, l'étude est complétée par les analyses des matériaux de construction qui constituent les édifices de ces derniers (pierres et mortiers) ; des méthodes d'investigation modernes et précises ont été utilisées pour réaliser ces analyses. Les examens et analyses qu'on subit les échantillons prélevés des unités stratigraphiques sont les suivantes :

- Discription visuelle.
- Observation sous loupe binoculaire.
- Analyse minéralogique globale par diffraction des rayons X.
- Analyse minéralogique sous lames minces.
- Analyse thermique simultanée.
- Détermination des caractéristiques petrophysique (masse volumique, porosité et absorption d'eau).
- Analyse élémentaire MEB-EDS.
- Cartographie des rayons X.

## 2. Les fondations :

### 2.1. Les fondations de l'ancienne enceinte :

Comme nous avons vu, l'ancienne enceinte a utilisé les constructions antérieures comme fondation, exemple le mur sud supporte la première ligne de colonnes, le mur Ouest et Nord en moellons supportent la dernière ligne de colonnes coté Ouest et coté Nord respectivement, le reste de fondations supporte le reste des colonnes et piliers.

#### 2.1.1. Echantillonnage :

Nous avons réalisé des prélèvements sur les matériaux de constructions au niveau de ces fondations qui sont composés essentiellement par la pierre et le mortier, le tableau.4.1 donne leurs codifications et la figure 4.1 montre leurs emplacements.

Tableau 4.1 : Codification des prélèvements

Code	Mfs	Pfs	Mfc	Pfc	Mfn	Pfn
Prélèvement	Mortier fondation Sud	Pierre Fondation Sud	Mortier Fondation Centre	Pierre Fondation Centre	Mortier Fondation Nord	Pierre Fondation Nord
Code	Mm01	Pm01	Mm02	Pm02	Mmc	Pmc
Prélèvement	Mortier mur d'enceinte 01	Pierre mur d'enceinte 01	Mortier mur d'enceinte 02	Pierre mur d'enceinte 02	Mortier mur de la construction annexe	Pierre mur de la construction annexe

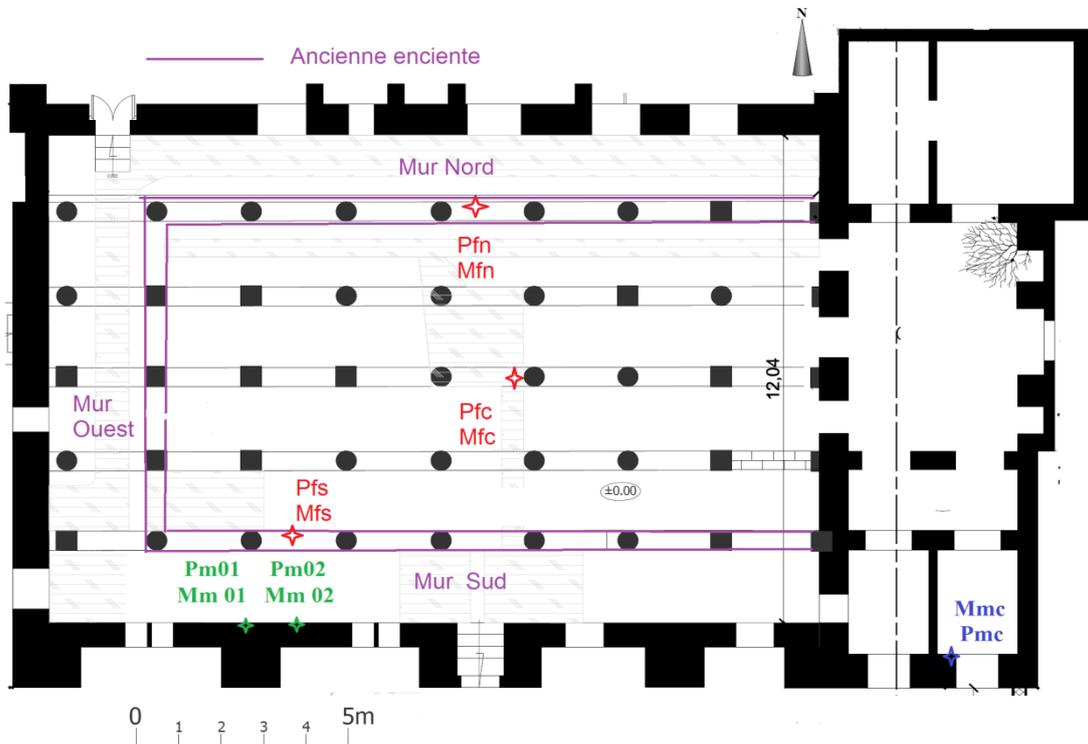


Fig.4.1. Emplacement des prélèvements dans un plan de masse.

## 2.1.2. Fondation Sud:

### 2.1.2.1. Description de la technique de maçonnerie :

Les fondations Sud de l'ancienne enceinte sont formées par un mur antique, construit selon la technique *Opus Quadratum* en grand appareil (figure.4.2) , composés de pierres de tailles parallélépipédiques parfaitement travaillées, équarries et bosselées mesurant (60 à 80 cm de longueur) en assise horizontale liée par une fine couche de mortier blanc.

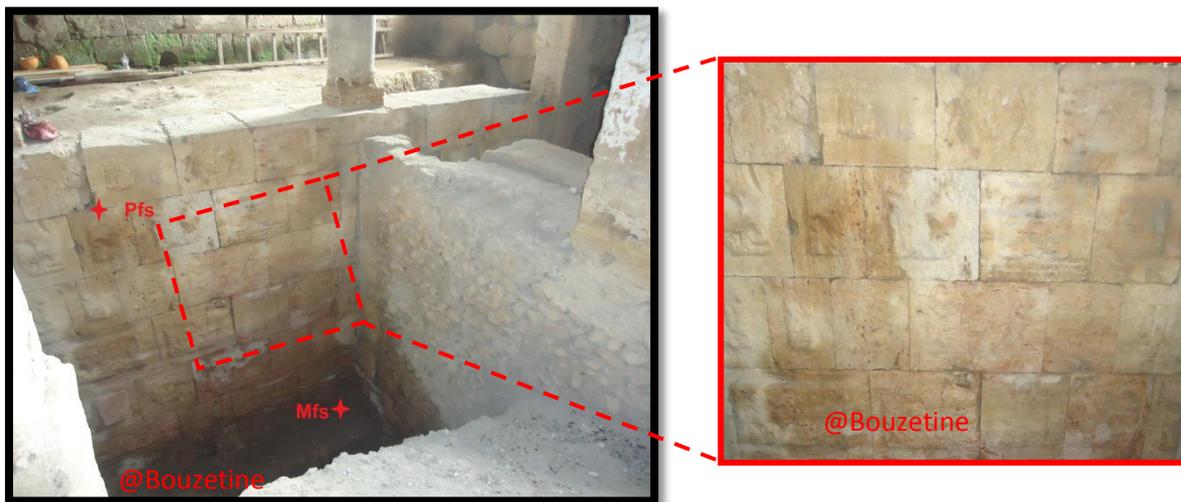


Fig.4.2. Technique de construction mur de fondation Sud.

### 2.1.2.2. Caractérisation de la pierre Pfs :

La pierre Pfs est une pierre compacte et très dure, avec une texture homogène est d'une couleur jaune rosâtre avec la présence de quelques micropores (figure.4.3).

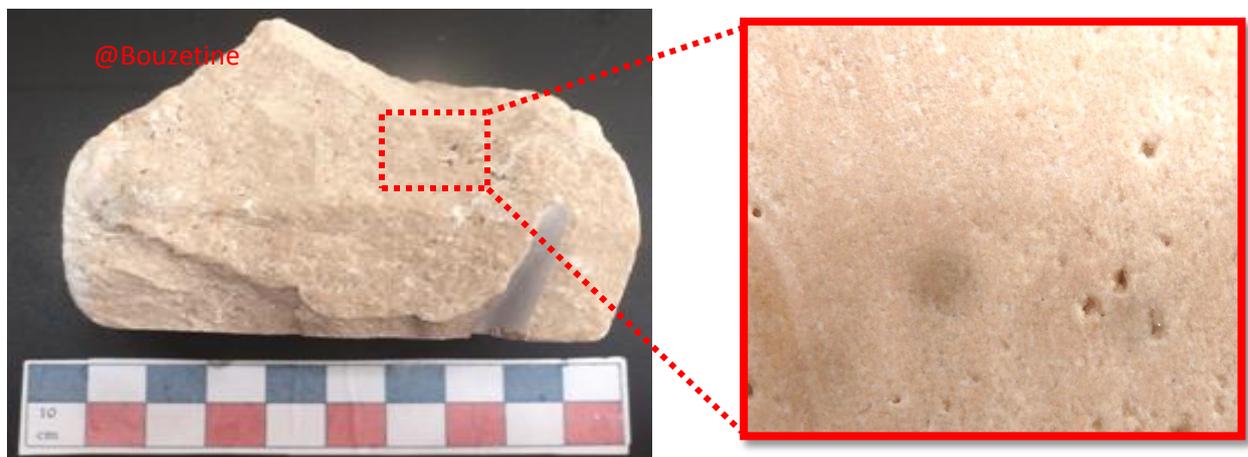


Fig.4.3. Section polie de la pierre Pfs.

### 2.1.2.2.1 Analyse Minéralogique par diffraction X :

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, montre la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  comme phase minérale unique comme le montre le diffractogramme de la (figure.4.4).

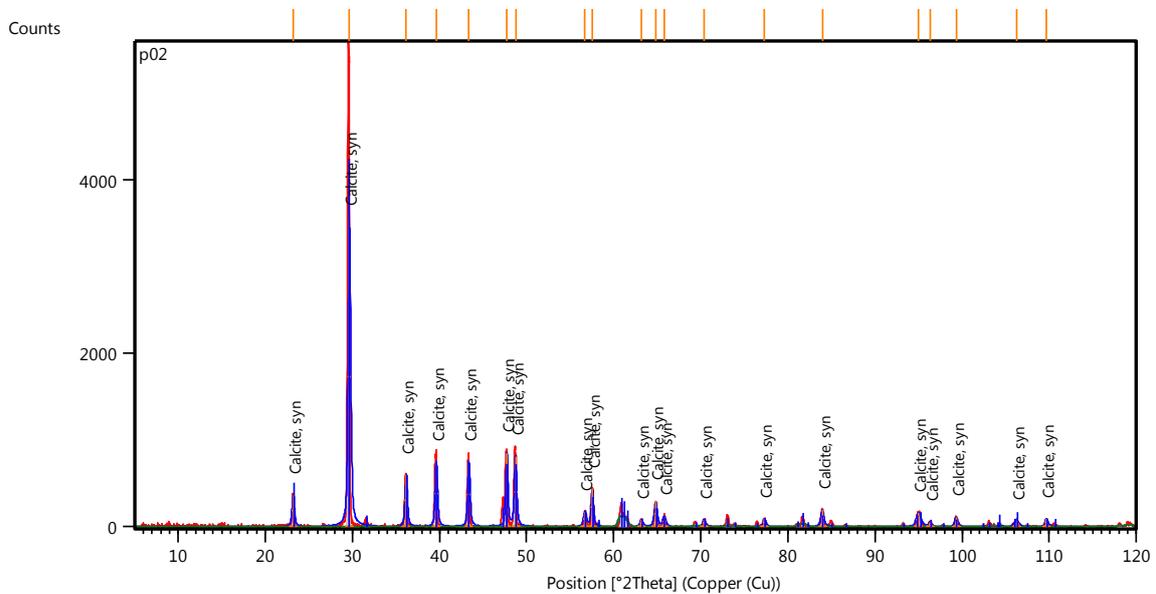


Fig.4.4: Diffractogramme de la pierre Pfs.

### 2.1.2.2.2 Analyse pétrographique sur lame mince:

Calcaire micritique fortement recristallisé de structure microsparithique.

Au microscope polarisant la roche apparait avec une matrice carbonatée de teinte sombre (figure.4.5). On remarque que cette matrice a subi une intense recristallisation en plus grands cristaux de calcite développant par endroit des amas irréguliers se présentant en lame mince sous l'aspect de taches claires. Ces amas sont formés par un assemblage de petits cristaux polygonaux de calcite de couleur blanchâtre agencée suivant une texture mosaïque.

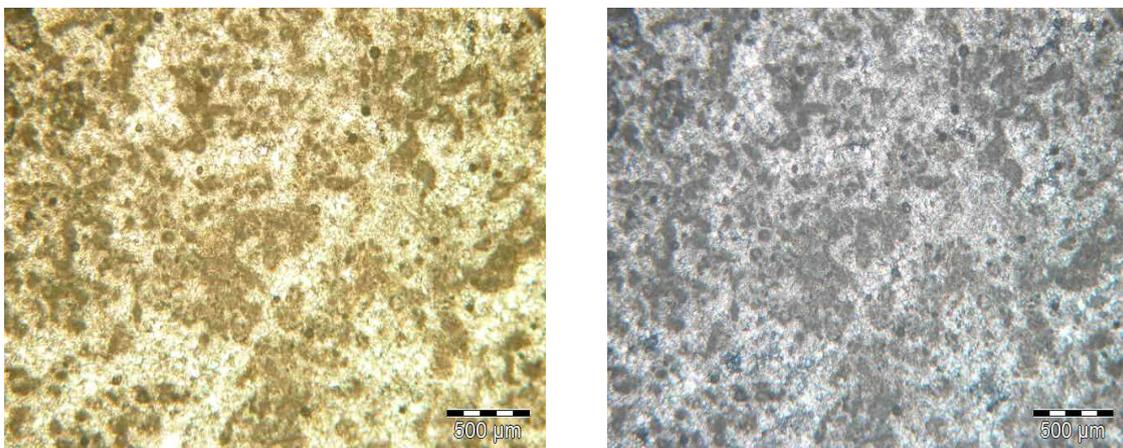


Fig.4.5. Vue au microscope polarisant de la pierre Pfs à gauche en LP, à droite en LPA.

### 2.1.2.2.3 Caractéristiques pétrophysique :

Les caractéristiques pétrophysique de la roche Pfs sont données dans le tableau.4.2.

Tableau.4.2 Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pfs.

Echantillon	Masse volumique apparente $\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse spécifique $\rho_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption d'eau $Ab_s$ %	Porosité totale $P_t$ %
Pfs	2.55	2,63	5.45	8.97

Nous remarquons que la pierre Pfs possède une masse volumique relativement élevée avec une porosité totale moyenne et une faible valeur d'absorption d'eau.

### 2.1.2.3. Caractérisation du mortier Mfs :

A l'œil nu, le mortier Mfs montre une couleur blanche avec la présence de quelques grains fins, sous la loupe binoculaire le mortier apparaît avec une couleur blanche translucide avec la présence de nodules de gypse de 0,5 mm environs, des masses rouge marron de nature argileuses de faible concentration et la présence de quelques pores avec des diamètres inférieurs à 0,1mm (figure.4.6).



Fig.4.6. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mfs.

### 2.1.2.3.1. Analyse minéralogique par diffraction X :

Le diffractogramme des rayons X, montre la présence dominante du gypse  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  associée au quartz  $SiO_2$  avec une faible proportion (figure.4.7).

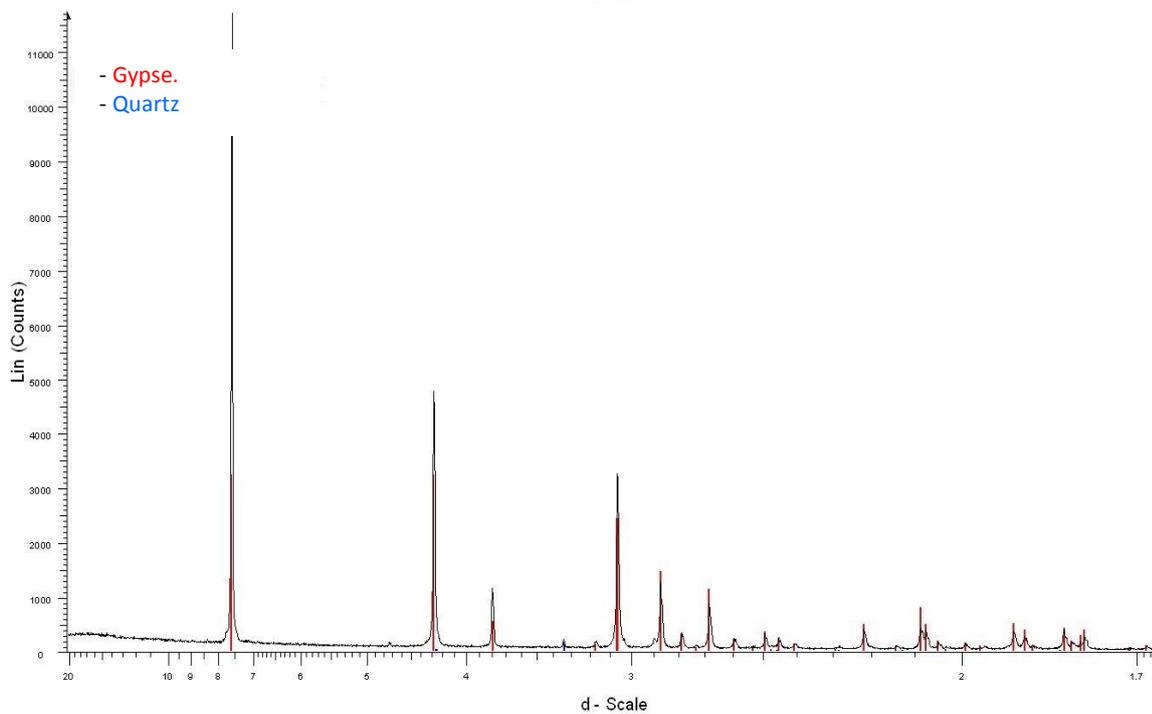


Fig 4.7. Diffractogramme des rayons X du mortier Mfs.

### 2.1.2.3.2. Analyse thermique simultanée ATS :

L'analyse thermique simultanée montre un pic endothermique intense environs de 100 °C est attribué au départ de 1,5 mole de molécules d'eau pour passer à l'hémihydrate  $\text{CaSO}_4, 0,5\text{H}_2\text{O}$  (courbe d'ATG)( figure 4.8), un deuxième pic endothermique moins visible (base large du pic) qui prend fin aux environs de 250 °C est attribué au départ de la demi-mole d'eau restante pour passer à l'anhydrite III ( $\text{CaSO}_4$ ).

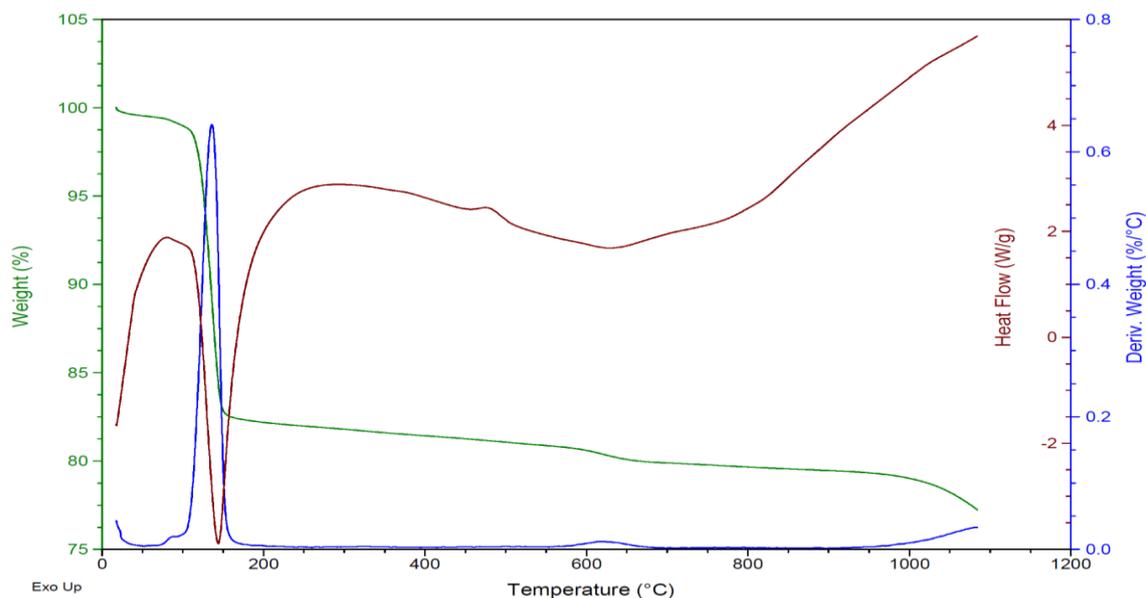


Fig.4.8. Analyse thermique simultanée du mortier Mfs.

### 2.1.2.3. 3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS

L'analyse élémentaire MEB-EDX, montre la forte présence des atomes de calcium, soufre et oxygène qui correspondent au gypse, elle montre aussi faibles teneurs en atomes de silicium et en aluminium avec des traces de fer, potassium, sodium, magnésium, phosphore, chlore et titanium (figure.4.9), ce qui confirme les résultats obtenus par diffraction des rayons X et par l'analyse thermique simultanée.

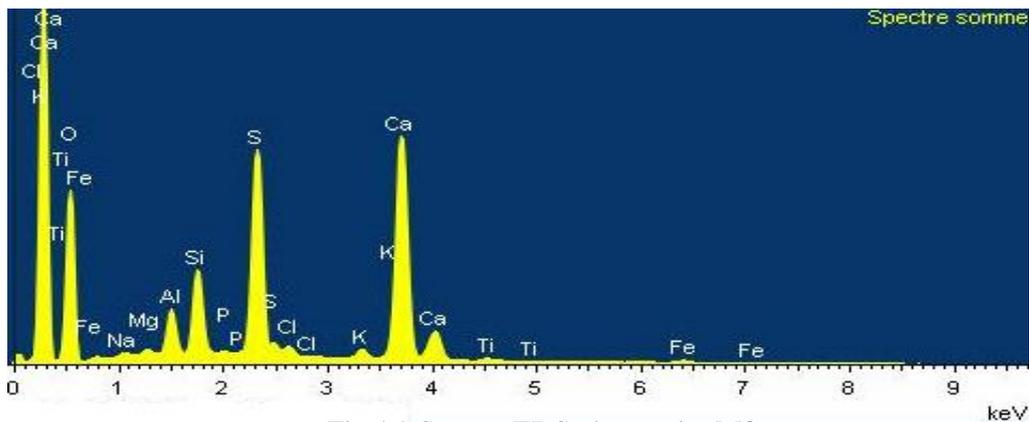


Fig.4.9.Spectre EDS du mortier Mfs.

### 2.1.2.3. 3. Cartographie X :

Les images de cartographie des rayons X confirment les résultats déjà obtenus par les autres méthodes de caractérisations, elles montrent la présence d'une matrice fine composée de gypse avec la présence de quelques grains de ce dernier avec des tailles importantes, elle montre également la présence du faible quartz et la présence d'un fragment composé de silicium, aluminium, potassium, magnésium et fer qui peut être une masse argileuse (figure.4.10).

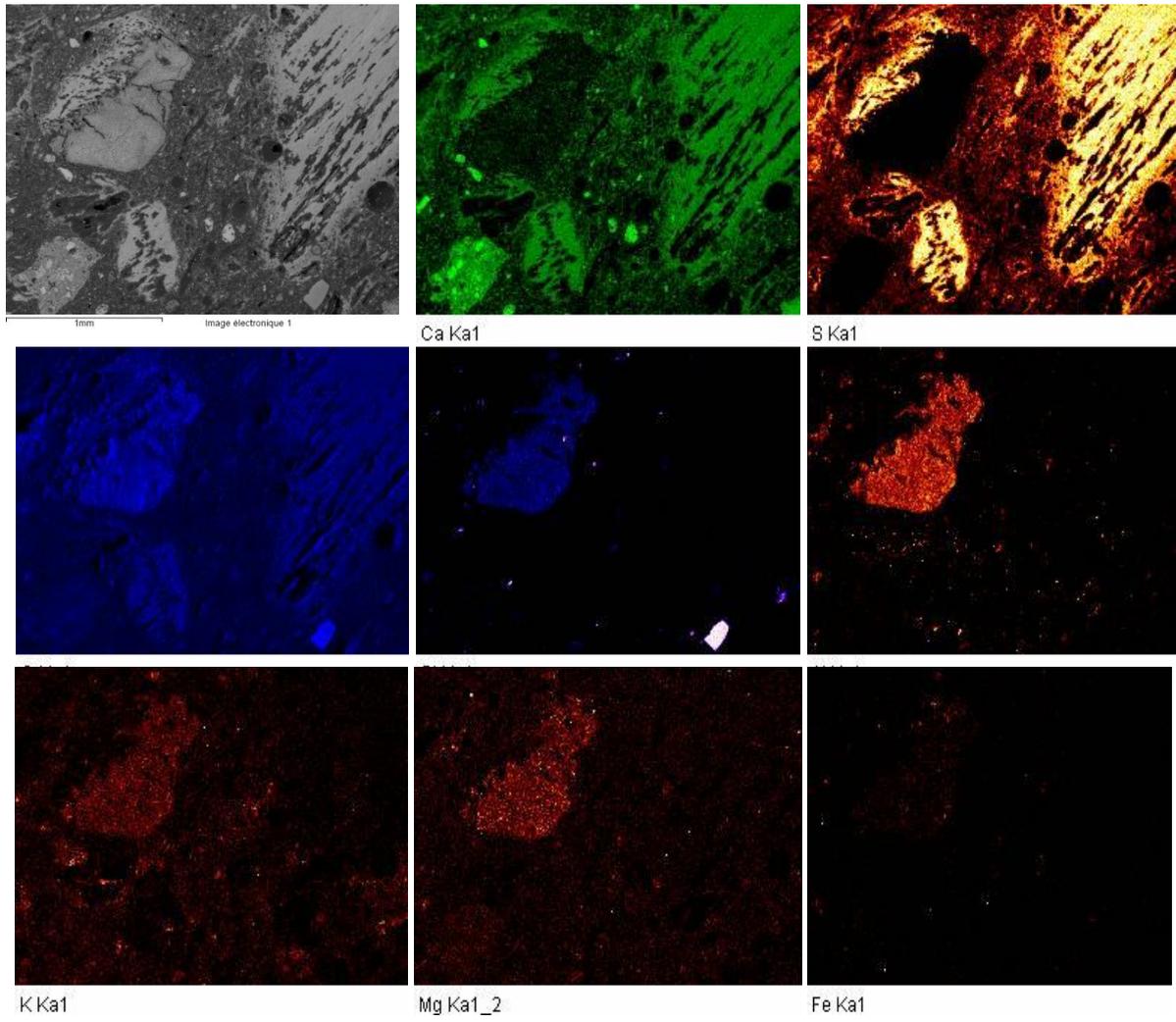


Fig.4.10.Cartographie X du mortier Mfs.

### 2.1.3. Fondation centre :

#### 2.1.3.1. Description de la technique de mise en œuvre :

Les fondations centre sont composées de monolithes de pierre, parallélépipédiques de réemploi, peu travaillés superposés les uns sur les autres et de tailles variables supportant des colonnes et des piliers (figure.4.11).



Fig.4.11. Technique de la mise en œuvre des fondations centre.

#### 2.1.3.2. Caractérisation de la pierre Pfc :

La pierre Pfc est une pierre compacte, dure avec une texture hétérogène et une couleur rosâtre un peu tachetée par des taches plus foncées (figure.4.12).

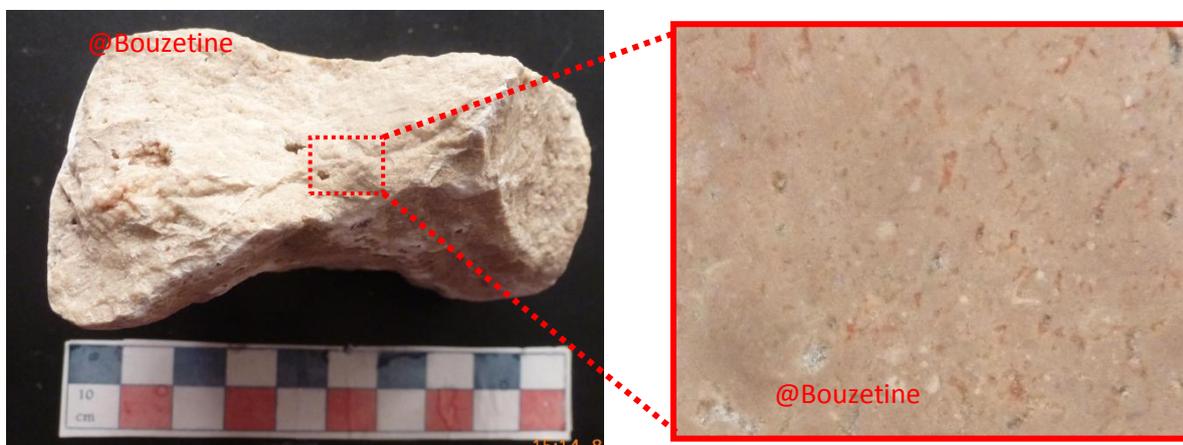


Fig.4.12. Section polie de la pierre Pfc.

### 2.1.3.2.1 Analyse Minéralogique par diffraction X :

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, montre la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  comme phase minérale unique (figure.4.13).

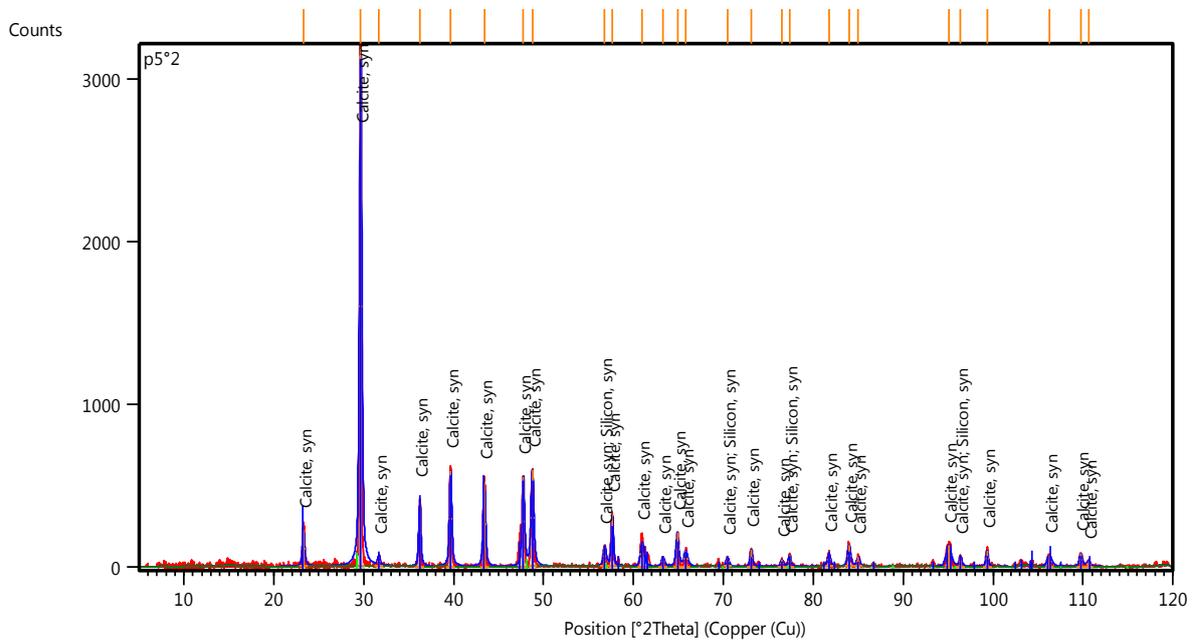


Fig.4.13. Diffractogramme de la pierre Pfc.

### 2.1.3.2.2. Analyse pétrographique sur lame mince :

Calcaire micritique fortement recristallisé de structure microsparithique.

La roche est représentée par une matrice calcaire micritique de teinte jaune- beige formée par un assemblage de cristaux crypto à microgrenus de calcite finement contaminé par des impuretés de pélitiques de nature argilo- ferrugineuses très fines. Par ailleurs dans ce font calcaire nous notons des empreintes sous forme de baguettes allongées et à section fusiforme à sphérique pouvant rapportées à d'anciens bioblastes rendues la plupart difficiles à déterminer en raison de leur recristallisation (figure.4.14).

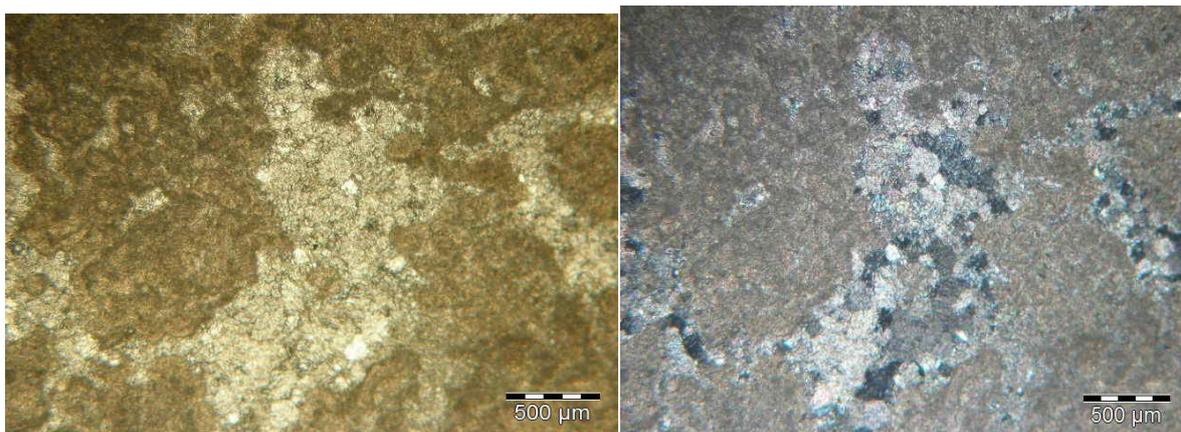


Fig.4.14. Vue au microscope polarisant de la pierre Pfc à gauche en LP, à droite en LPA.

### 2.1.3.2.3. Caractéristiques pétrophysique :

Les caractéristiques pétrophysique de la roche Pfc sont données dans le tableau.4.3.

Tableau.4.3.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pfc.

Echantillon	Masse volumique apparente $\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse spécifique $\rho_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption d'eau $Ab_s$ %	Porosité totale $P_{to}$ %
Pfc	2.40	2,52	7.11	10,02

Nous remarquons que la pierre Pfc possède une masse volumique moyenne avec une porosité totale moyenne et une valeur moyenne d'absorption d'eau.

### 2.1.3.3. Caractérisation du mortier Mfc :

A l'œil nu, le mortier Mfc montre une couleur blanche avec la présence de quelques grains fins de différentes couleurs : blanc, transparent orange et marron, sous la loupe binoculaire le mortier apparait avec une couleur blanche laiteuse avec la présence de grains de quartz en abondance avec des tailles très variables, des grains de calcite blancs à jaune de taille de dixième de millimètres et quelques grains de tuileau « brique pilée » peu abondante (figure.4.15).

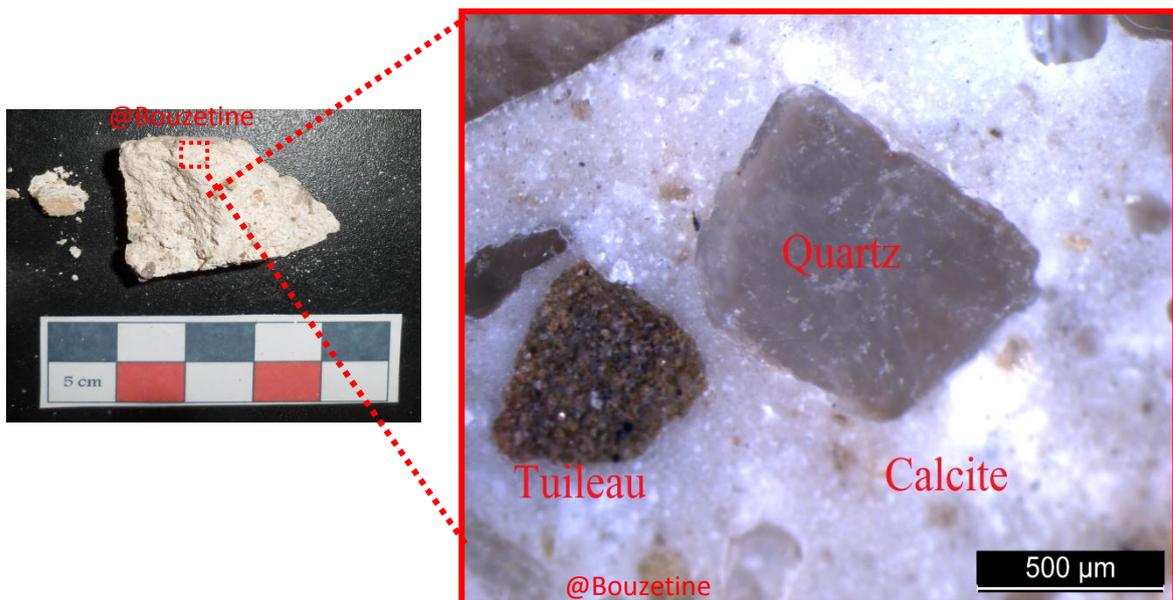


Fig.4.15. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mfc.

### 2.1.3.3.1. Analyse minéralogique par diffraction X :

Le diffractogramme des rayons X montre la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  avec une présence considérable du quartz  $\text{SiO}_2$  (figure.4.16).

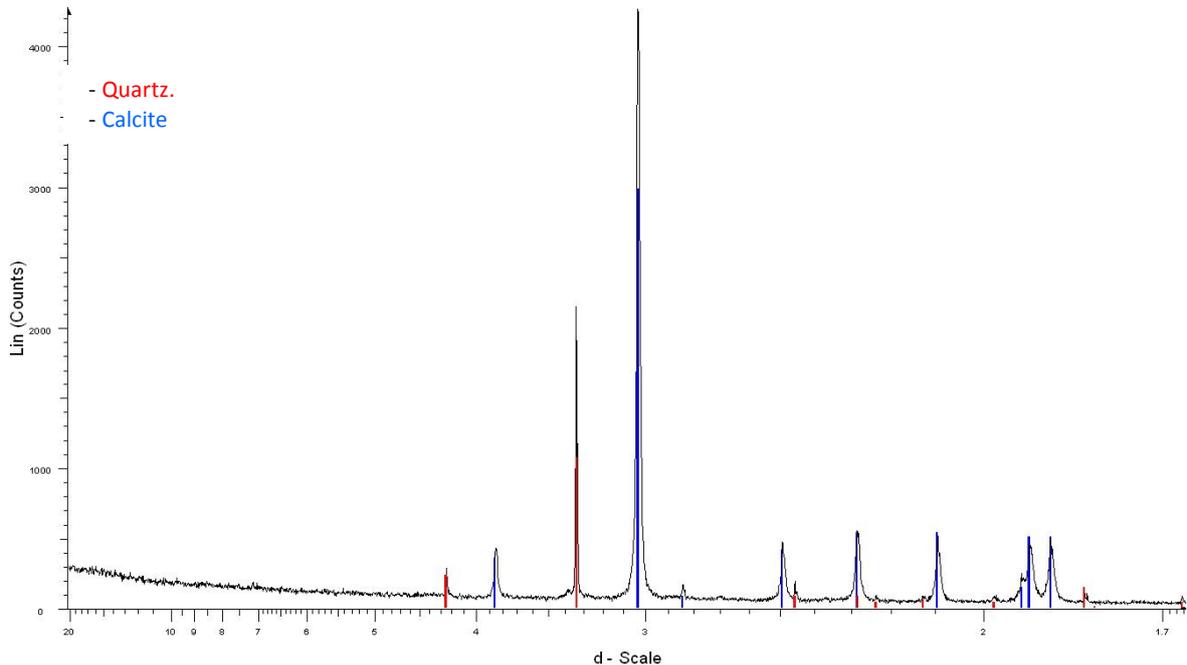
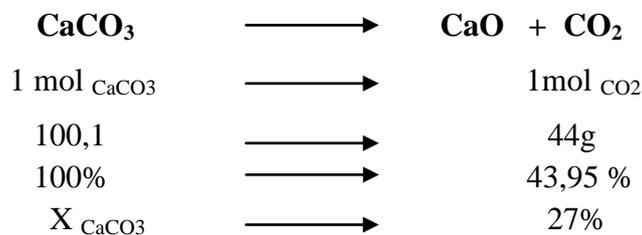


Fig.4.16. Diffractogramme des rayons X du mortier Mfc.

### 2.1.3.3.2. Analyse thermique simultanée :

l'analyse thermique simultanée (figure.4.17), montre un pic endothermique intense à  $775^\circ\text{C}$  qui correspond à la décomposition de la calcite  $\text{CaCO}_3$ , en chaux  $\text{CaO}$  et en gaz carbonique  $\text{CO}_2$  accompagné d'une perte en masse de 27% qui représente la masse de  $\text{CO}_2$  dégagée selon la réaction chimique suivante :



$$X_{\text{CaCO}_3} = (27 \cdot 100) / 43,95 = \mathbf{61,43\%}$$

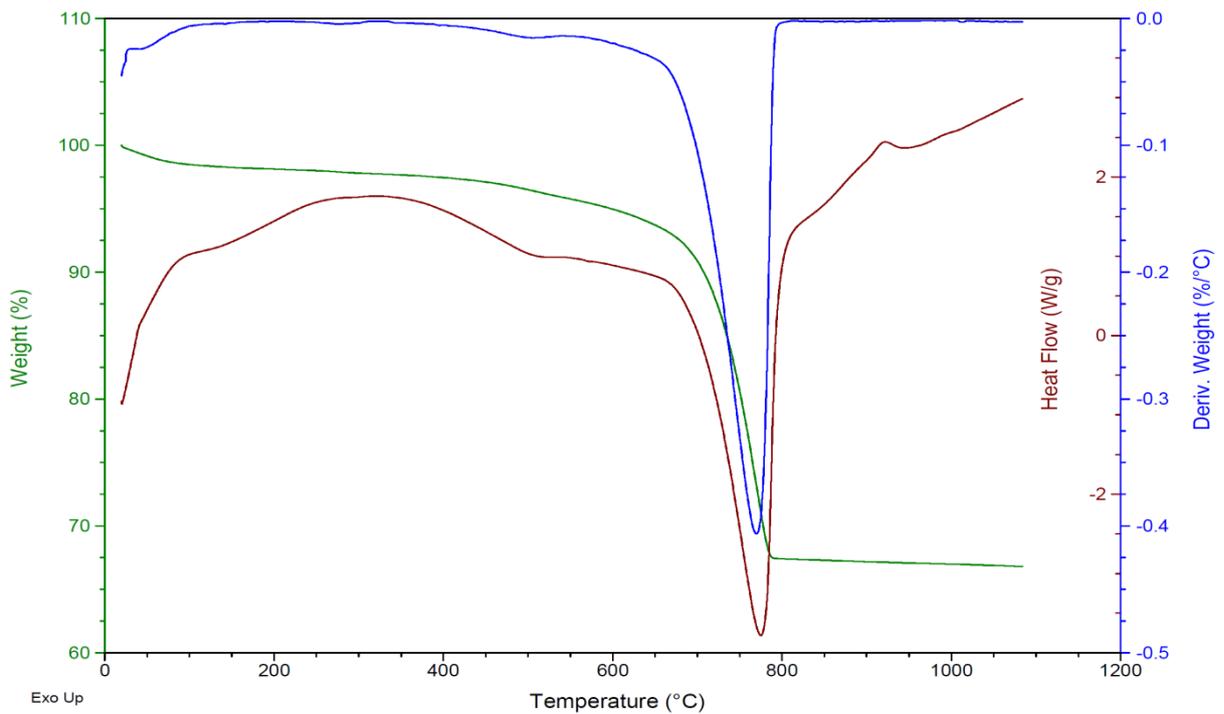


Fig.4.17. Courbe de l'analyse thermique simultanée du mortier Mfc.

### 2.1.3.3. 3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS :

L'analyse chimique élémentaire montre la forte présence des atomes de silicium et de calcium qui correspondent à la forte teneur en calcite  $\text{CaCO}_3$  et quartz  $\text{SiO}_2$ , avec des traces d'aluminium, sodium, magnésien, soufre, chlore, potassium, et fer (figure.4.18), ce qui concorde bien avec les résultats obtenus par diffraction X et par l'analyse thermique différentielle.

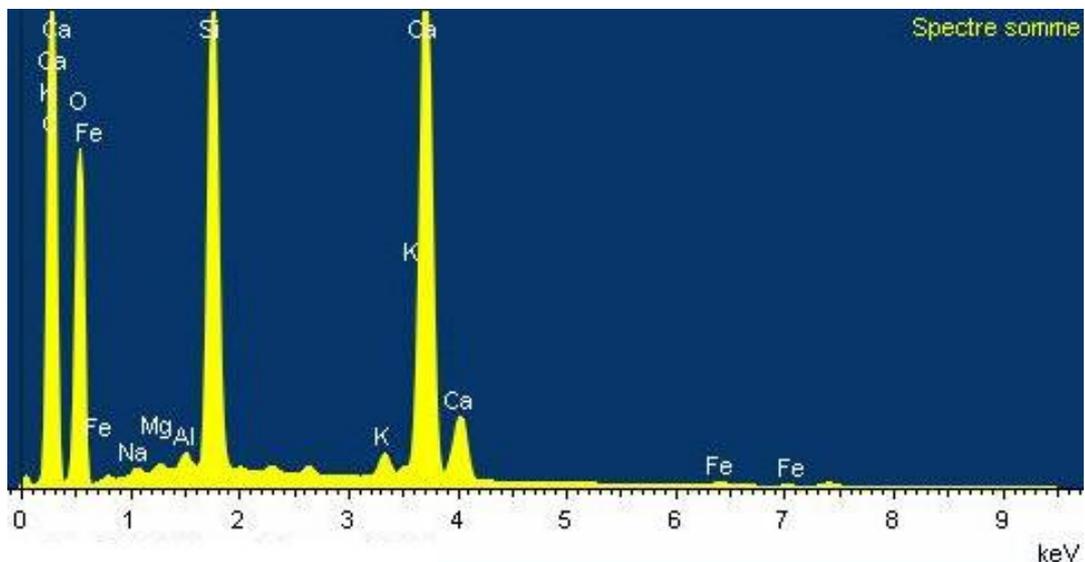


Fig.4.18. Spectre EDS du mortier Mfs.

#### 2.1.3.3.4. Cartographie X :

Les images de la cartographie X (figure .4.19) viennent de confirmer ce qui à été dit auparavant sur la composition de ce mortier car nous remarquons la dominance d'une matrice fine en liant de calcite avec la présence de quelques fragments de calcite, nous notons aussi la présence importante du quartz avec la présence d'un fragment riche en silicium en aluminium, magnésium, sodium et fer qui correspond très probablement à un fragment de tuileau.

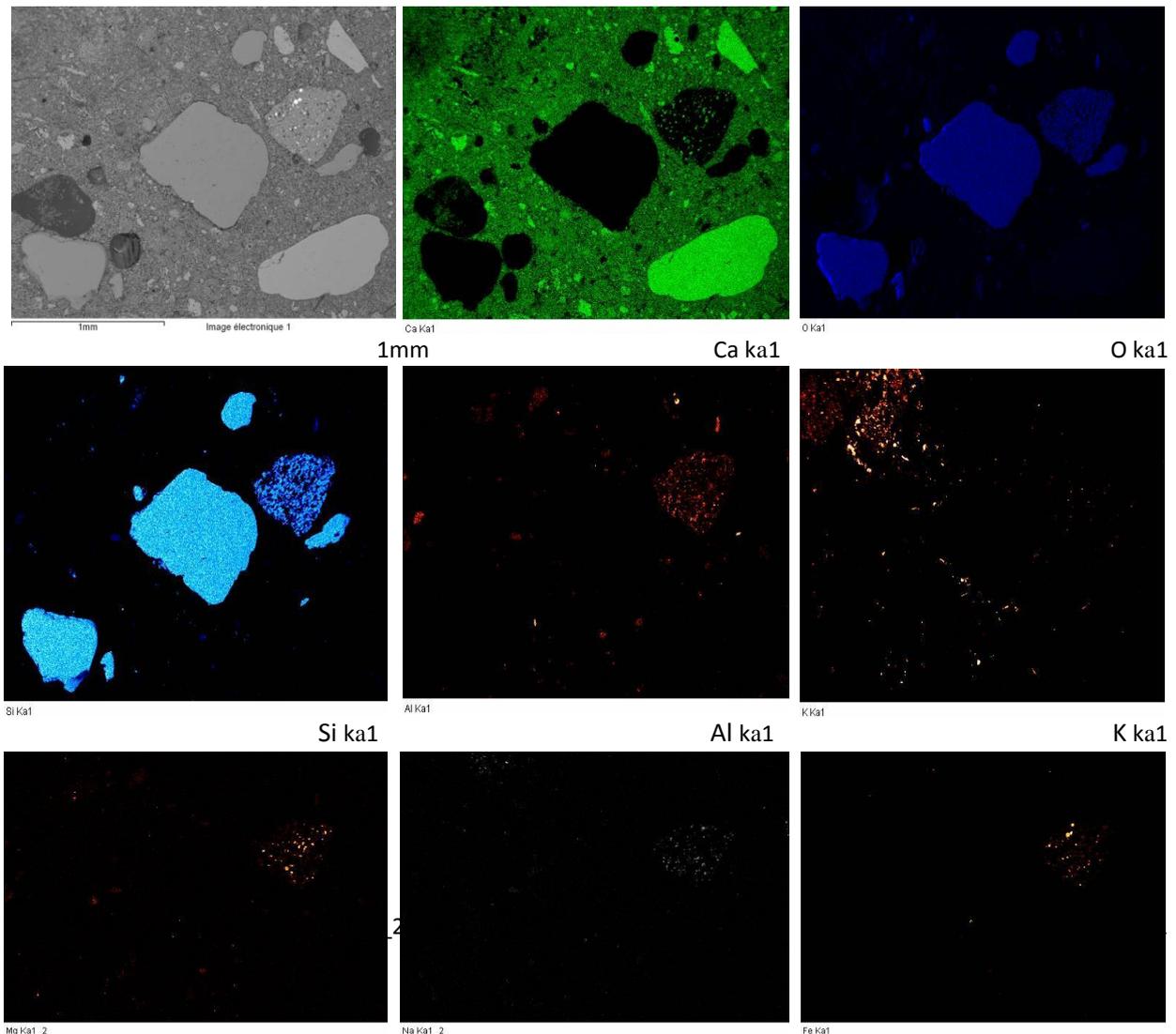


Fig.4.19. Cartographie X du mortier Mfc.

#### 2.1.4. Fondation Nord:

##### 2.1.4.1. Description de la technique de maçonnerie :

Les fondations Nord de l'ancienne enceinte sont formées par un mur en moellons, construit selon la technique *Opus Africanum*, (figure.4.20). Dans cet appareil dit « à chaînage », les murs en moellons bruts alternent avec des piliers taillés soigneusement et disposés

verticalement. L'usage de harpes verticales en pierre, qui sont disposées à brève distance les unes des autres et dont l'espace intermédiaire est rempli de petits moellons.

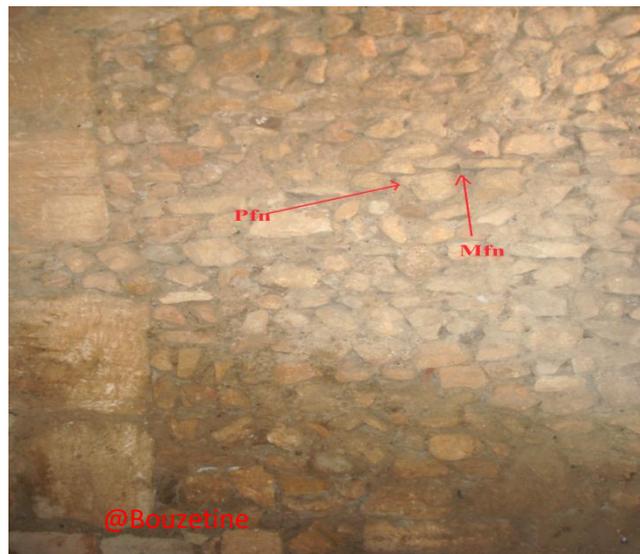


Fig.4.20. Technique de construction mur de fondation Nord.

**2.1.4.2. Caractérisation de la pierre Pfn :** la pierre Pfn est une pierre compacte, dure avec une texture hétérogène et une couleur brunâtre avec la présence de recristallisation incolore et de micropores (figure.4.21).



Fig.4.21. Section polie de la pierre Pfn.

#### **2.1.4.2.1. Analyse Minéralogique par diffraction X :**

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, montre la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  comme phase minérale principale avec la présence de quelques traces de quartz comme le montre le diffractogramme sur la (figure.4.22).

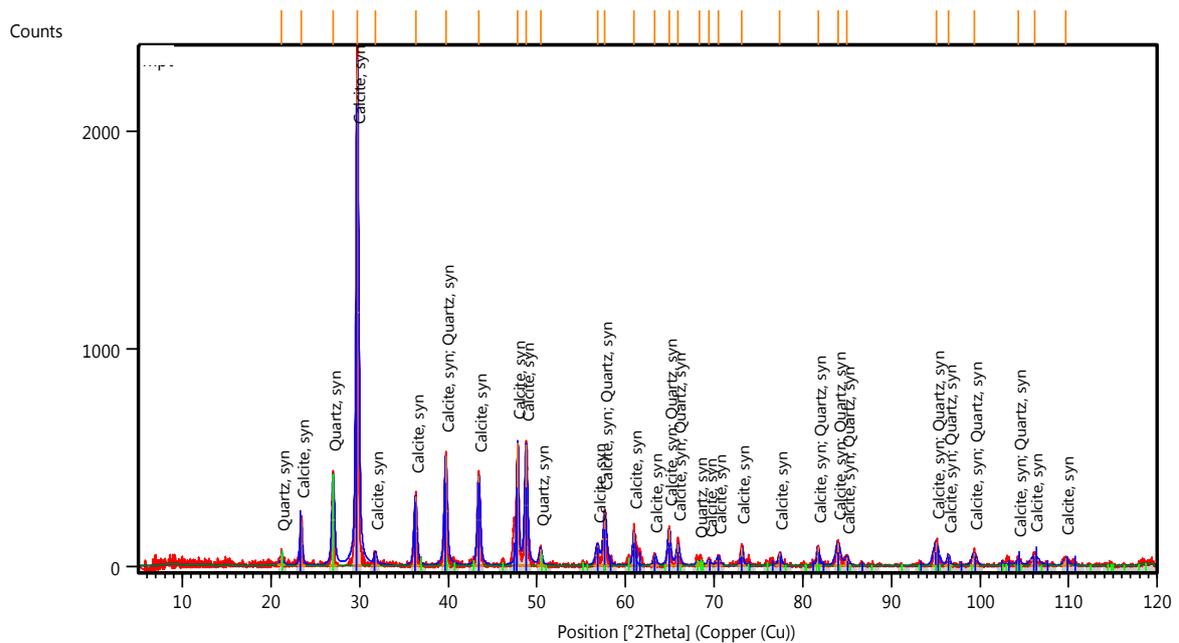


Fig.4.22. Diffractogramme de la pierre Pfn

#### 2.1.4.2.2. Analyse pétrographique sur lame mince :

Au microscope la roche apparaît avec une matrice carbonatée de teinte sombre (figure.4.23). On remarque que cette matrice a subi une intense recristallisation en plus grands cristaux de calcite développant par endroit des amas irréguliers se présentant en lame mince sous l’aspect de taches claires. Ces amas sont formés par un assemblage de petits cristaux polygonaux de calcite de couleur blanchâtre agencée suivant une texture mosaïque. La phase détritique renferme du quartz finement dispersé de forme xénomorphes.

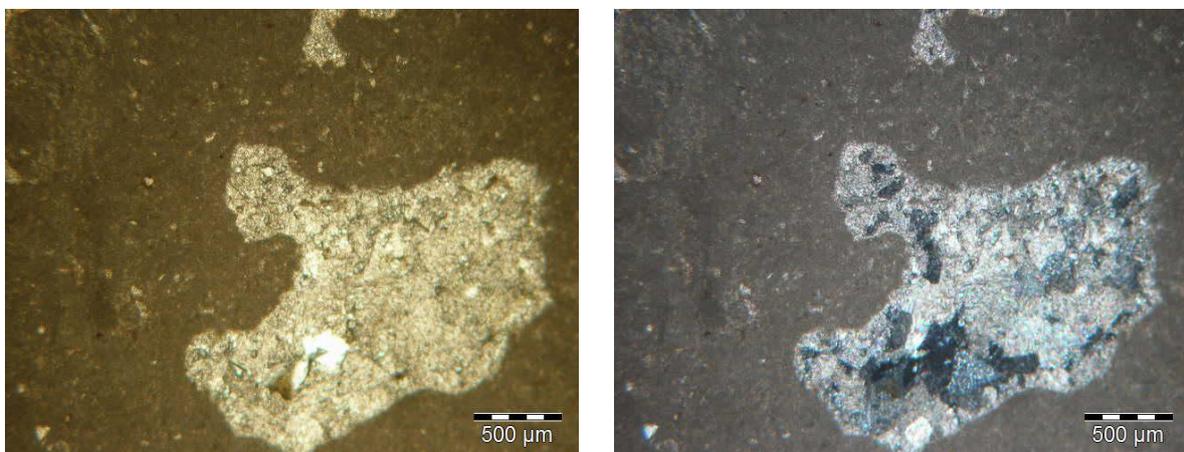


Fig.4.23. Vue au microscope polarisant de la pierre Pfn à gauche en LP, à droite en LPA.

### 2.1.4.2.3. Caractéristiques pétrophysique :

Les caractéristiques pétrophysique de la roche Pfn sont données dans le tableau.4.4.

Tableau.4.4.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pfc.

Echantillon	Masse volumique apparente $\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse spécifique $\rho_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption d'eau $Ab_s$ %	Porosité totale $P_{to}$ %
Pfn	2,35	2,52	10,22	15,34

Nous remarquons que la pierre Pfn possède une masse volumique moyenne avec une porosité totale moyenne et une valeur d'absorption d'eau relativement élevée.

### 2.1.4. 3. Le mortier Mfn :

Le mortier Mfn est un mortier très friable, A l'œil nu, montre une couleur grisâtre avec la présence de quelques grains fins de couleur blanche et noir, sous la loupe binoculaire le mortier apparait avec une couleur grise avec la présence de grains de calcite avec une teneur faible constitue des amas nous notons aussi la présence de la cendre le tout est noyé dans une matrice argileuse grise et parfois jaune (figure.4.24).

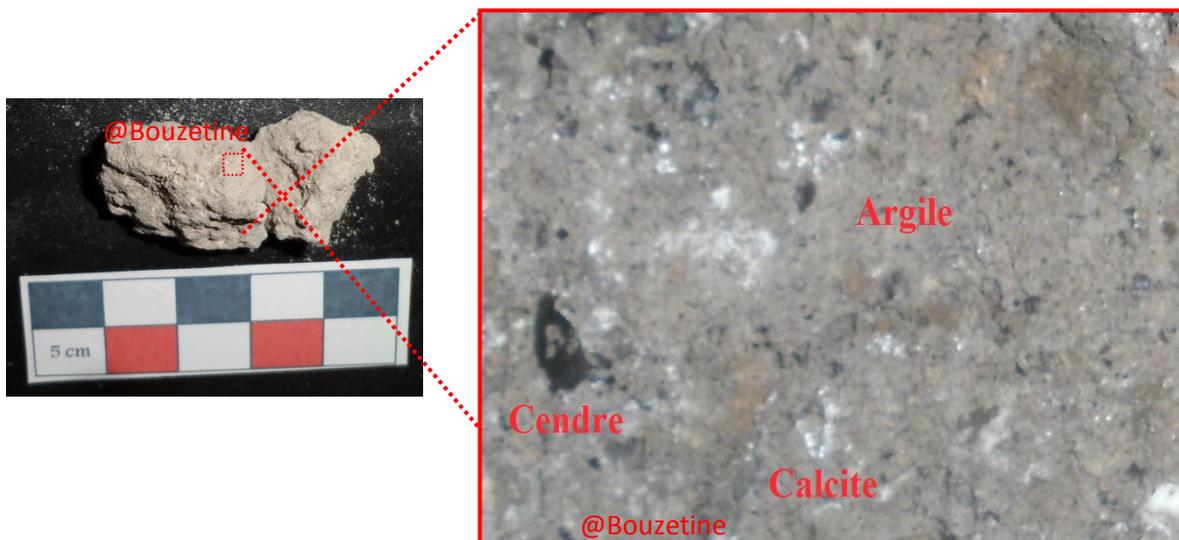


Fig.4.24. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mfn.

### 2.1.4. 3.1. Analyse minéralogique par diffraction X :

L'analyse minéralogique par diffraction X montre que le mortier Mfn est composé de calcite, de quartz, de l'ankérite et de la kaolinite figure.(4.25).

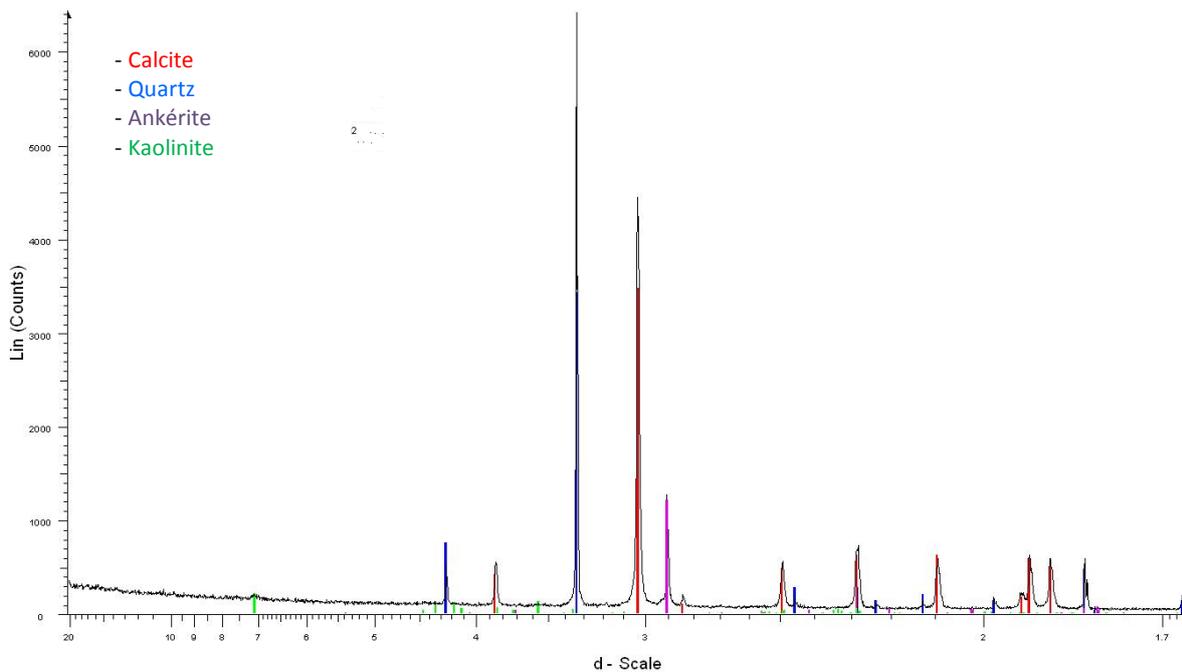


Fig.4.25.Diffractogramme des rayons X du mortier Mfn.

### 3. Les Murs:

#### 3.1. Mur de l'enceinte actuelle :

##### 3.1.1. Description de la technique de maçonnerie :

Les techniques utilisées dans la construction des murs sont de deux types :

- ***Opus quadratum*** : il est opéré sur une hauteur environ 180 cm à partir du sol, composé de grand appareil de récupération de taille différente comprise entre 60 à 90 cm de longueur sur 50 à 60 cm de hauteur dont nous voyons clairement une pierre de taille de récupération bien taillée et bosselée appartenant au mur antique (figure.2.26).
- ***Opus Vitatum*** : il est opéré sur une hauteur environ 130 cm à au-dessus de l'opus quadratum, Les moellons travaillés sont parallélépipédiques, et disposés en assises horizontales, avec une volonté évidente de faire alterner les joints avec des assises de hauteur égale (figure.4.26).

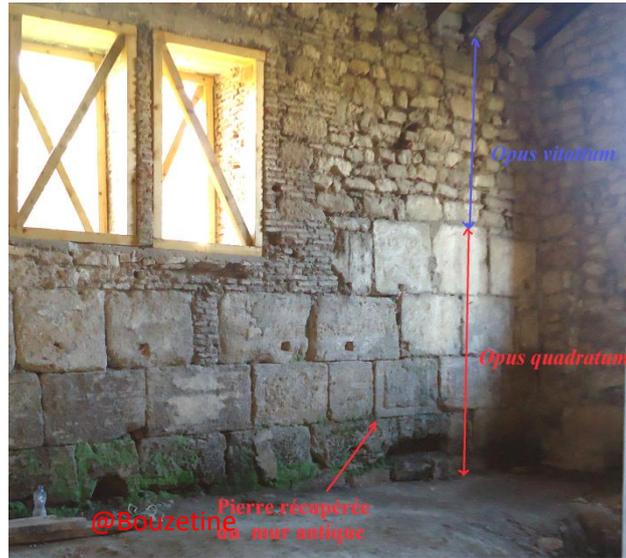


Fig.44.26. Techniques de maçonnerie du mur de l'enceinte.

L'échantillonnage de pierres et de mortiers sur le mur de l'enceinte a été pratiqué sur les deux parties opus quadratum et opus vittatum (figure.4.27).



Fig.4.27. échantillonnage de pierre et de mortier sur le mur de l'enceinte.

### 3.1.2. Caractérisation de la pierre Pm01 :

La pierre Pm 01 est une pierre dure mais très poreuse « pores pouvant atteindre plusieurs millimètres de diamètres », caractérisée par une texture plus au moins homogène et d'une couleur brunâtre (fig.2.28).

### 3.1.2.1. Analyse Minéralogique par diffraction X :

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, montre la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  comme phase minérale unique, (figure.4.29).

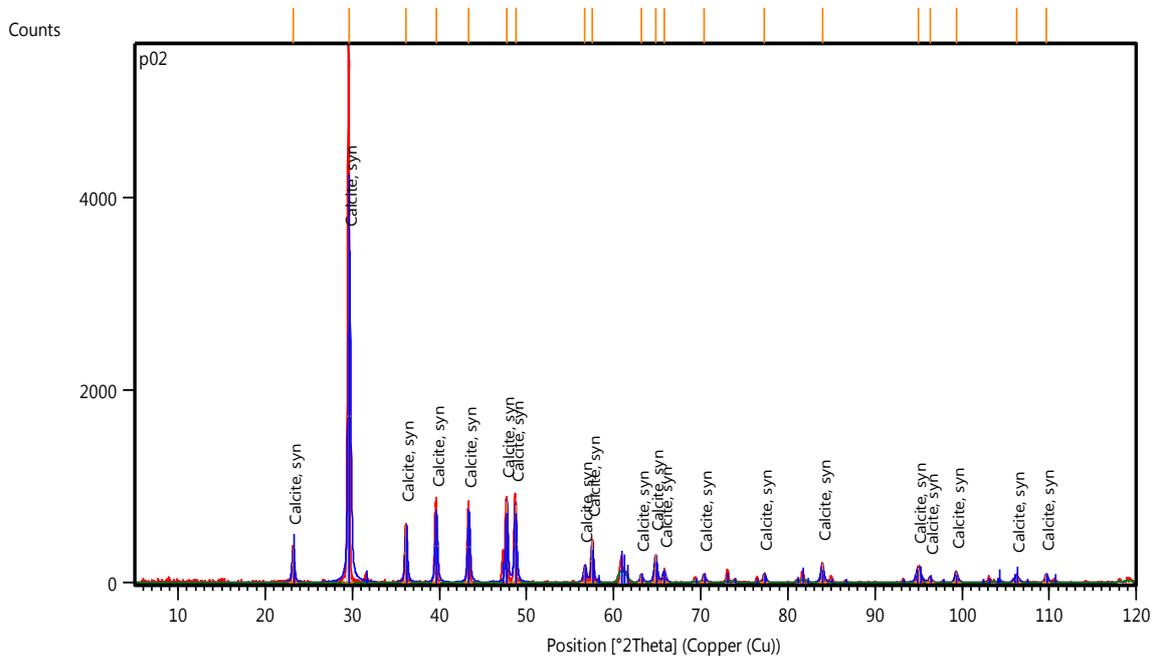


Fig.4.29. Diffractogramme de la pierre Pm01.

### 3.1.2.2. Analyse pétrographique sur lame mince :

Calcaire micritique fortement recristallisé de structure microsparithique. La roche est représentée par une matrice calcaire micritique de teinte beige formée par un assemblage de cristaux microgenus de calcite. On remarque dans cette roche la recristallisation de la calcite s'opère à un degré très important allant jusqu'à l'ordre de 45% (figure.4.30).

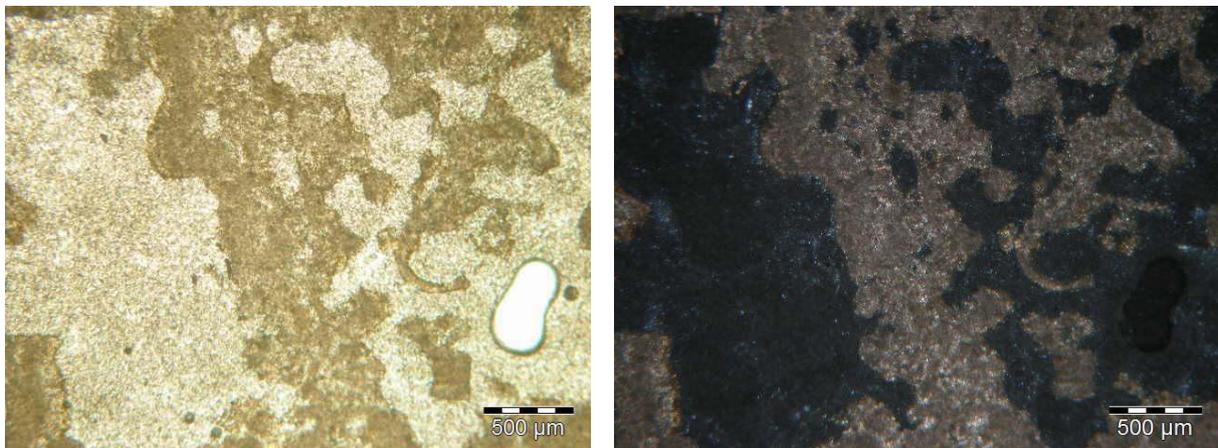


Fig.4.30. Vue au microscope polarisant de la pierre Pm01 à gauche en LP, à droite en LPA.

### 3.1.2.3. Caractéristiques pétrophysique :

Les caractéristiques pétrophysique de la roche Pm01 sont données dans le tableau.4.5.

Tableau.4.5. Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pm01.

Echantillon	Masse volumique apparente $\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse spécifique $\rho_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption d'eau $Ab_s$ %	Porosité totale $P_{to}$ %
Pm01	2.10	2,42	25%	38,08

Nous remarquons que la pierre Pm01 possède une masse volumique relativement faible avec une porosité totale élevée et une valeur importante d'absorption d'eau.

### 3.1.3. Caractérisation du mortier Mm01 :

A l'œil nu, le mortier Mm01 montre une couleur blanche grisâtre avec la présence de quelques grains de tailles et de couleurs différentes, sous la loupe binoculaire le mortier apparaît avec une couleur blanche laiteuse avec la présence de grains de quartz en abondance avec des tailles très variables, des grains de calcite blancs à jaune orangé de taille plusieurs dixièmes nous notons aussi la présence des masses argileuses et fragments de charbon de bois et quelques micropores inférieures à 1 millimètre (figure .4.31).

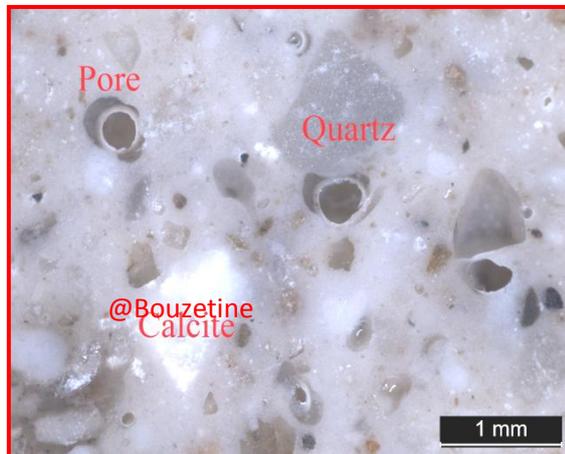


Fig.4.31. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mm01.

### 3.1.3.1. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X :

L'analyse par diffraction des rayons X montre que l'échantillon est très riche en calcite avec la présence de faible quantité (figure.4.32).

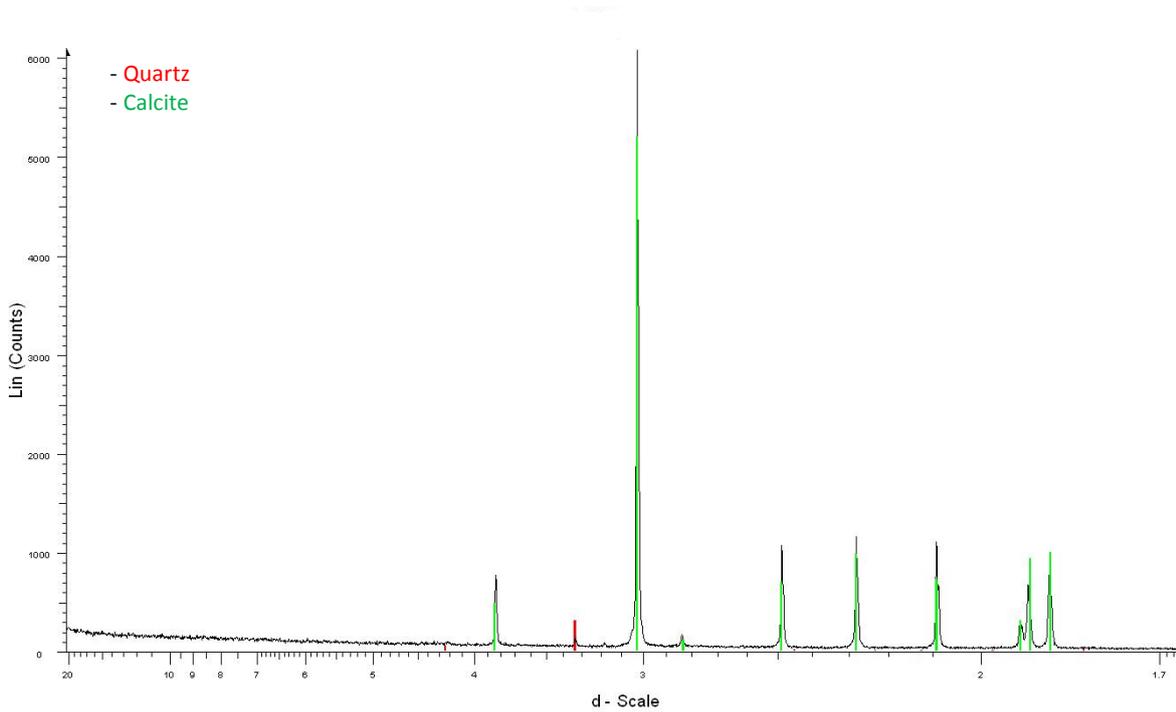
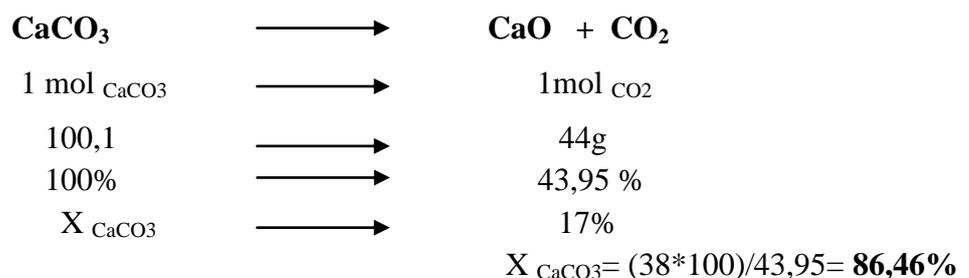


Fig.4.32. Diffractogramme des rayons X du mortier Mm01.

### 3.1.3.2. Analyse thermique simultanée :

L'analyse thermique simultanée figure.4.33, montre un pic endothermique intense à 750°C qui correspond à la décomposition de la calcite  $\text{CaCO}_3$  en chaux  $\text{CaO}$  et en gaz carbonique  $\text{CO}_2$  accompagné d'une perte en masse de 17% qui représente la masse de  $\text{CO}_2$  dégagée selon la réaction suivante :



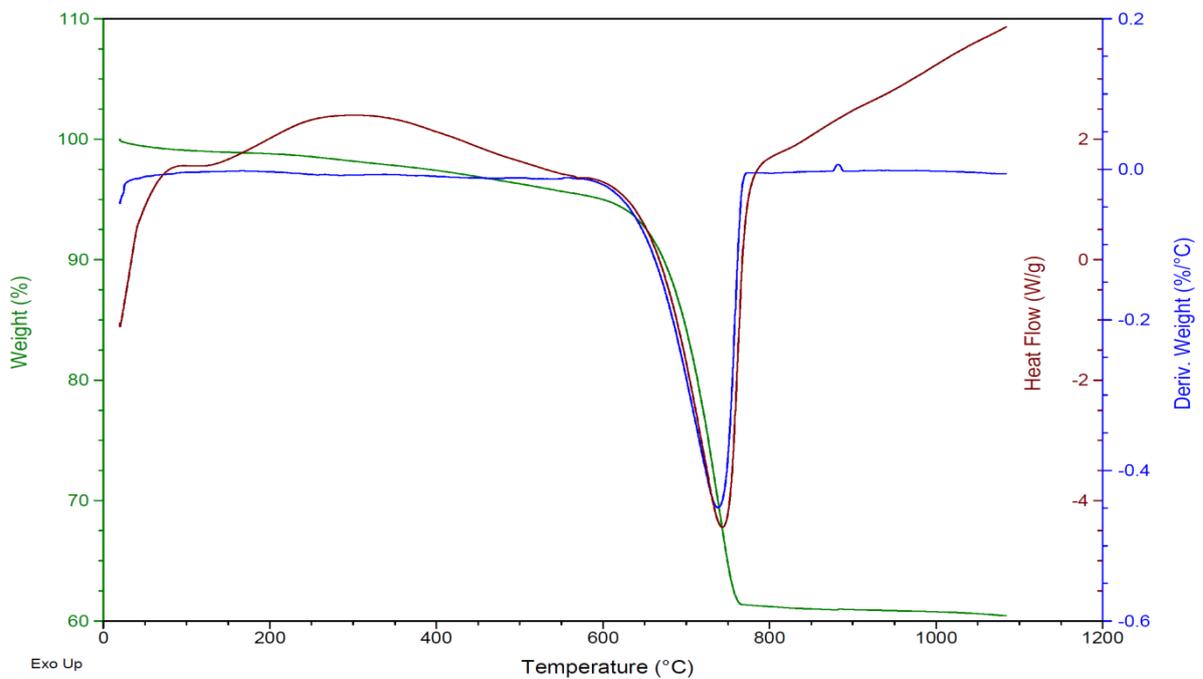


Fig.4.33.Courbe de l'analyse thermique simultanée du mortier Mm01.

### 3.1.3.3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS

L'analyse chimique élémentaire montre la forte présence des atomes de calcium qui correspondent à la forte teneur en calcite  $\text{CaCO}_3$  et une moyenne teneur en silicium qui correspond au quartz  $\text{SiO}_2$  avec des traces d'aluminium, sodium, magnésien, soufre, potassium, manganèse, titanium et fer (figure.4.34), ce qui concorde bien avec les résultats obtenus par diffraction X et par l'analyse thermique différentielle.

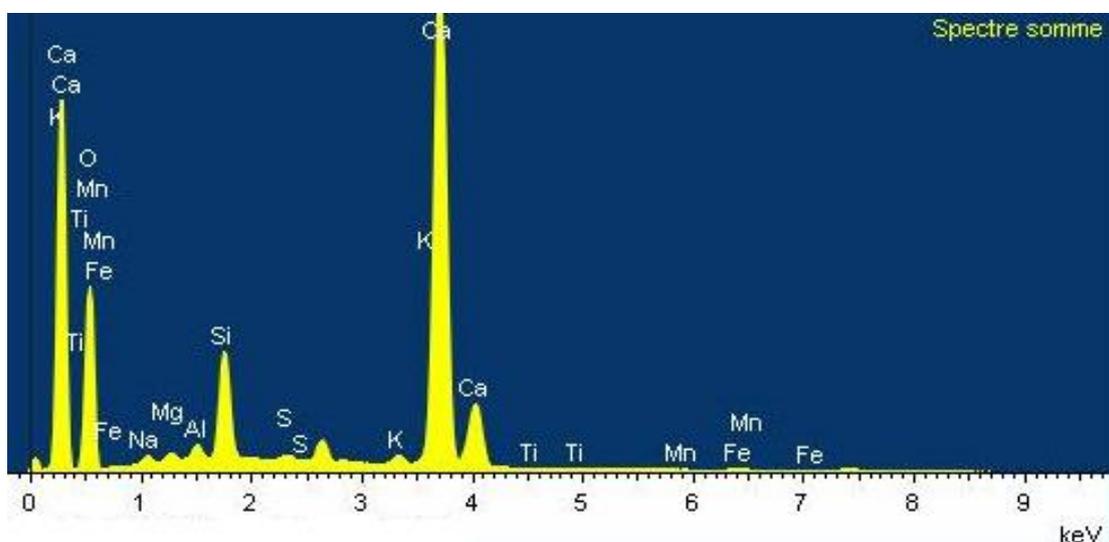


Fig.4.34.Spectre des éléments chimique du mortier Mm01.

### 3.1.3.4. Cartographie X :

Les images de la cartographie X, (figure.4.35), viennent de confirmer ce qui à été dit auparavant sur la composition de ce mortier car nous remarquons la dominance d'une matrice fine en liant de calcite avec la présence de plusieurs fragments de calcite, nous notons aussi la présence moyenne du quartz avec la présence de plusieurs particules composées en silicium en aluminium, magnésium, sodium, potassium, fer et titanium qui correspond très probablement une poussière de nature argileuse.

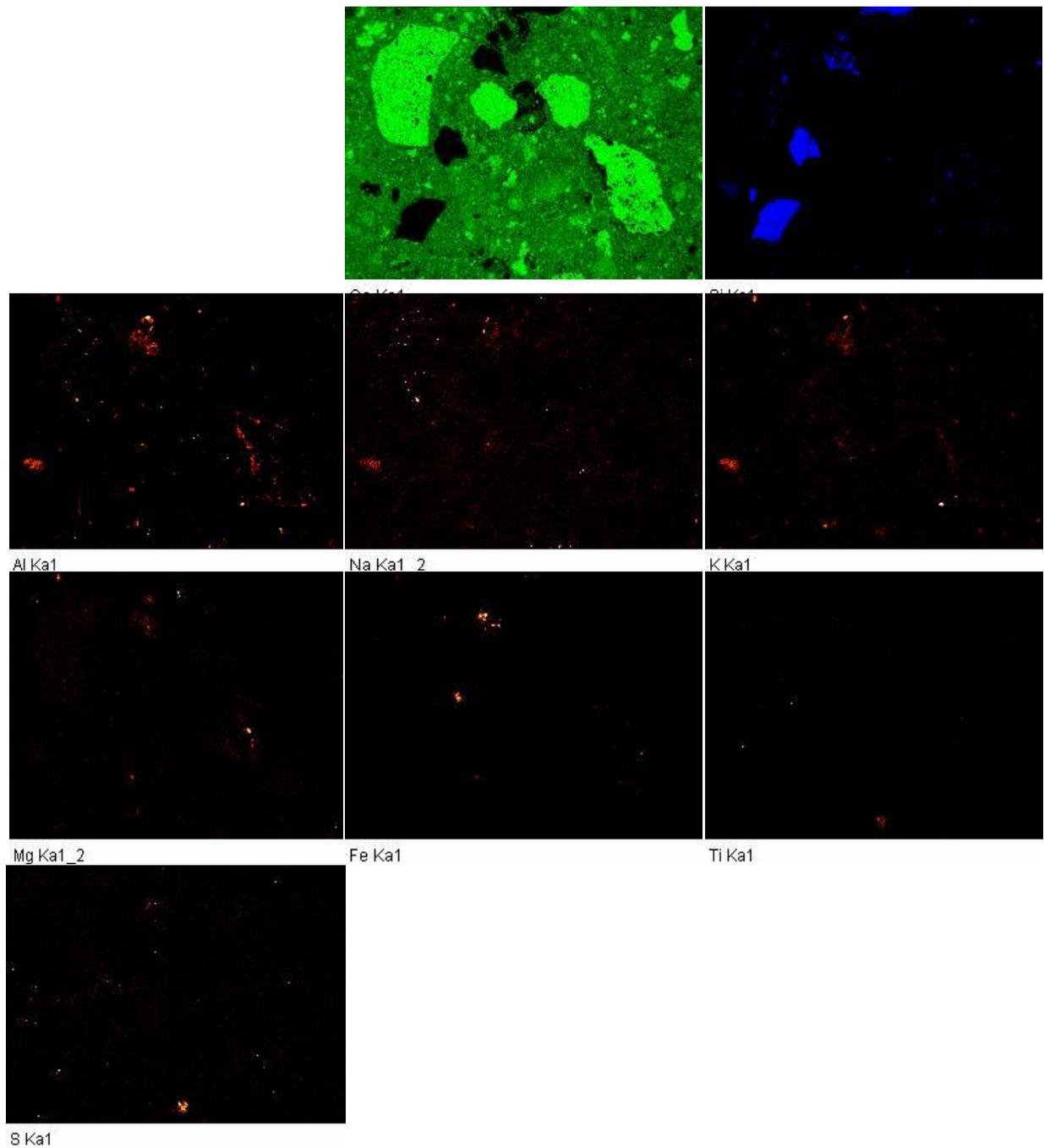


Fig.4.35. Cartographie X du mortier Mm01.

### 3.1.4. Caractérisation de la pierre Pm02 :

La pierre Pm02 est une pierre compacte mais pas très dure, caractérisée par une texture hétérogène, couleur beige claire avec des taches orange (fig.4.36).

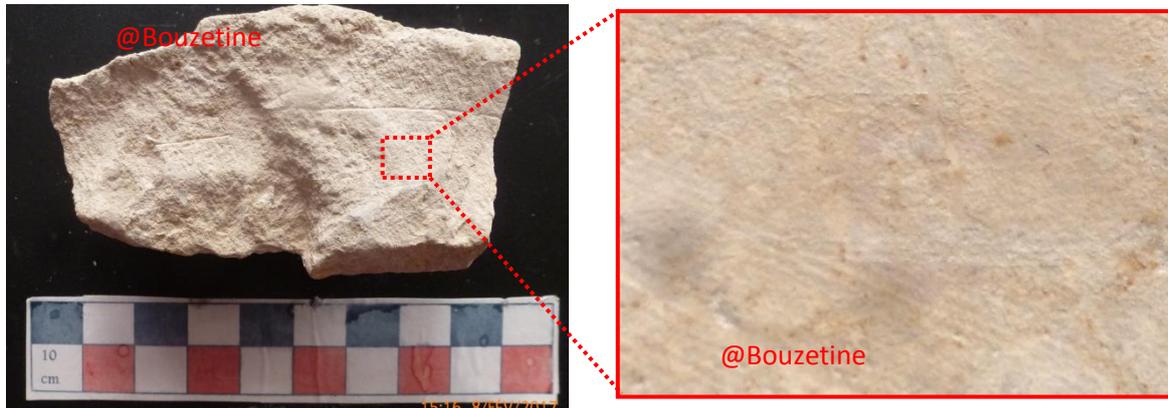


Fig.4.36. Section polie de la pierre Pm02.

#### 3.1.4.1 Analyse Minéralogique par diffraction X :

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, montre la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  comme phase minérale unique, (figure.4.37).

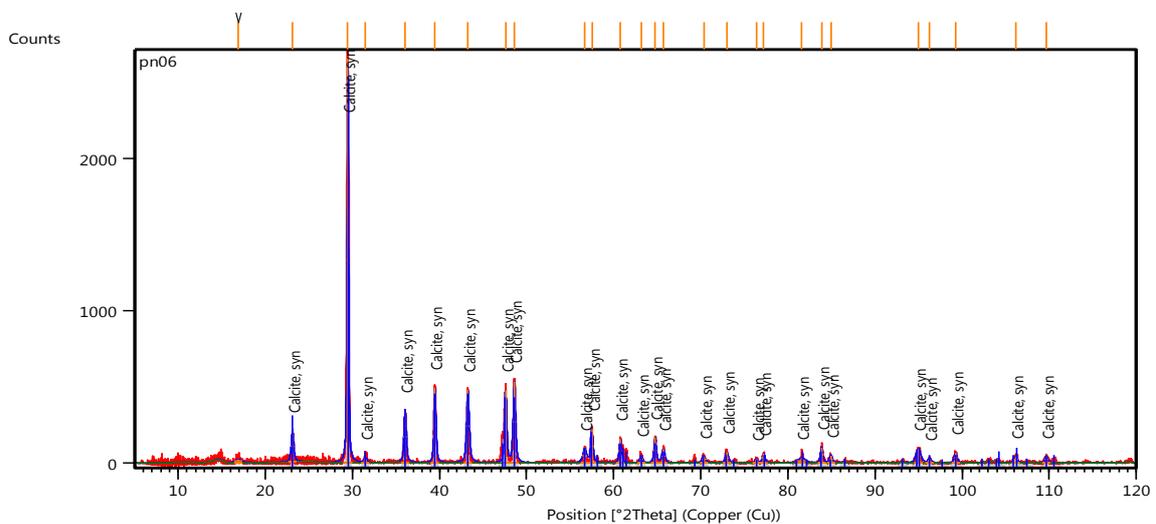


Fig.4.37. Diffractogramme de la pierre Pm02.

#### 3.1.4.2. Analyse pétrographique sur lame mince :

La roche représentée par une matrice calcaire micritique de teinte beige formée par un assemblage de cristaux microgrenus de calcite. Dans ce fond calcaire nous notons la présence d'empreintes sphérique pouvant être rapportées à des anciens bioclastes rendues difficiles à déterminer leur nature en raison de leur recristallisation.

Des débris sont surmontés par de dendrites arborescentes de couleur noirâtre et traversées parfois par des fissures avec ramification remplies de la calcite finement cristallisée (figure.4.38).

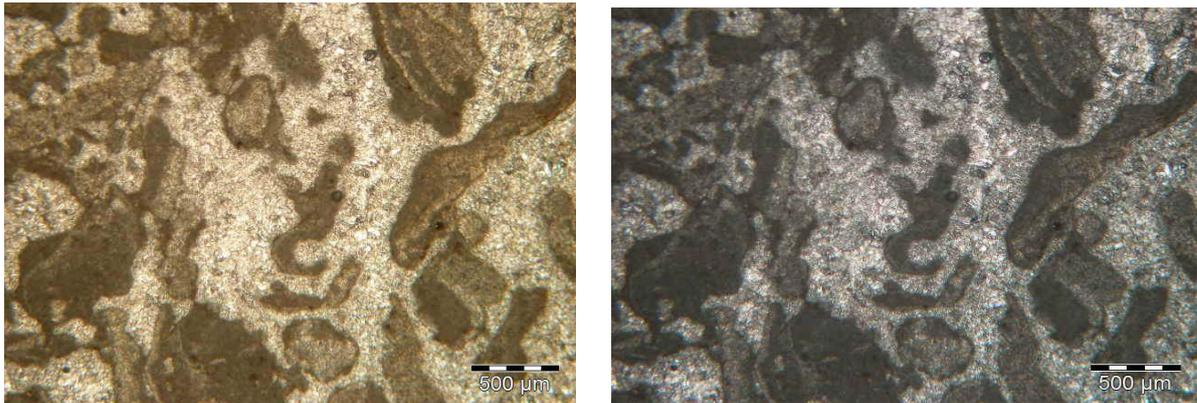


Fig.4.38. Vue au microscope polarisant de la pierre Pm02 à gauche en LP, à droite en LPA.

### 3.1.4.3. Caractéristiques pétrophysique :

Les caractéristiques pétrophysique de la roche Pm02 sont données dans le tableau.4.6.

Tableau.4.6. Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pm02.

Echantillon	Masse volumique apparente $\rho_{ap}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	Masse spécifique $\rho_{sp}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	Absorption d'eau Abs %	Porosité totale Pto %
Pm02	2.18	2,40	18,33%	26,15

Nous remarquons que la pierre Pm02 possède une masse volumique relativement faible avec une porosité totale élevée et une valeur importante d'absorption d'eau.

### 3.1.5. Caractérisation du Mortier Mm02 :

A l'œil nu, le mortier Mm02 montre une couleur grisâtre avec la présence de quelques grains de tailles et de couleurs différentes, sous la loupe binoculaire le mortier apparaît avec une couleur grise/blanche, avec la présence des grains de calcite à jaune orangé de taille variables, de grains de quartz de petites tailles moins abondants avec des tailles très variables, une matrice de calcite blanche et la présence de fragments de charbon (figure.4.39).

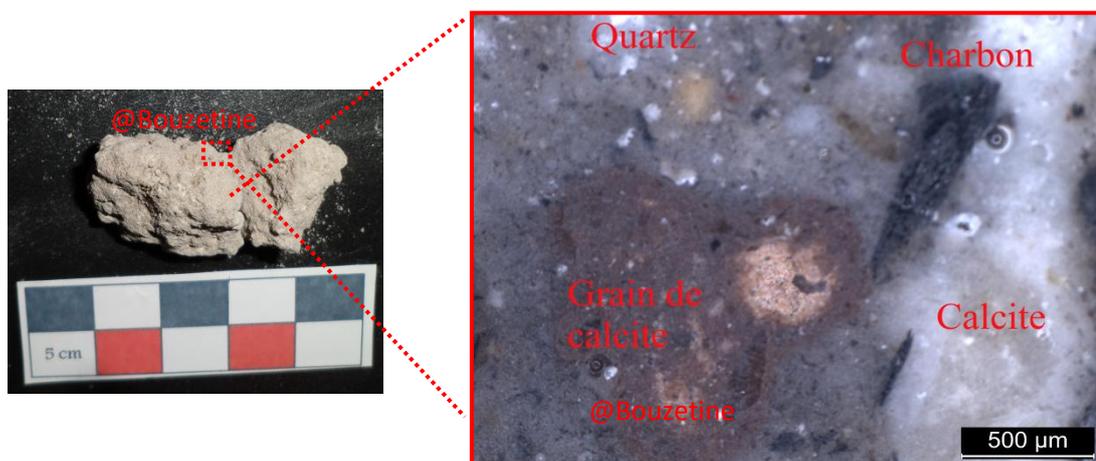


Fig.439. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mm02.

### 3.1.5.1. Analyse minéralogique des rayons X :

L'analyse minéralogique montre la présence de la calcite et du quartz (figure.4.40).

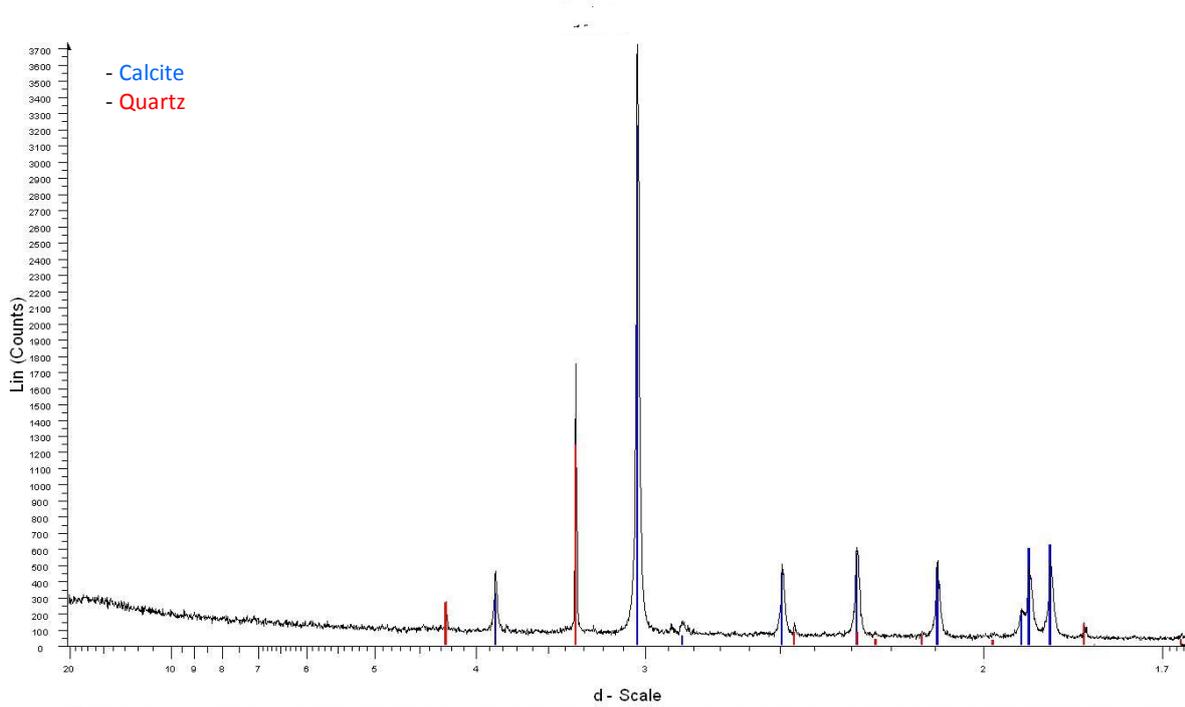


Fig.4.40. Diffractogramme des rayons X du mortier Mm02.

### 3.1.5.2. Analyse thermique simultanée :

Nous remarquons un pic intense relatif à la décomposition de la calcite (fig.4.41), la teneur en calcite est égale à :

$$X_{\text{CaCO}_3} = (30 \cdot 100) / 43,95 = 68,25\%$$

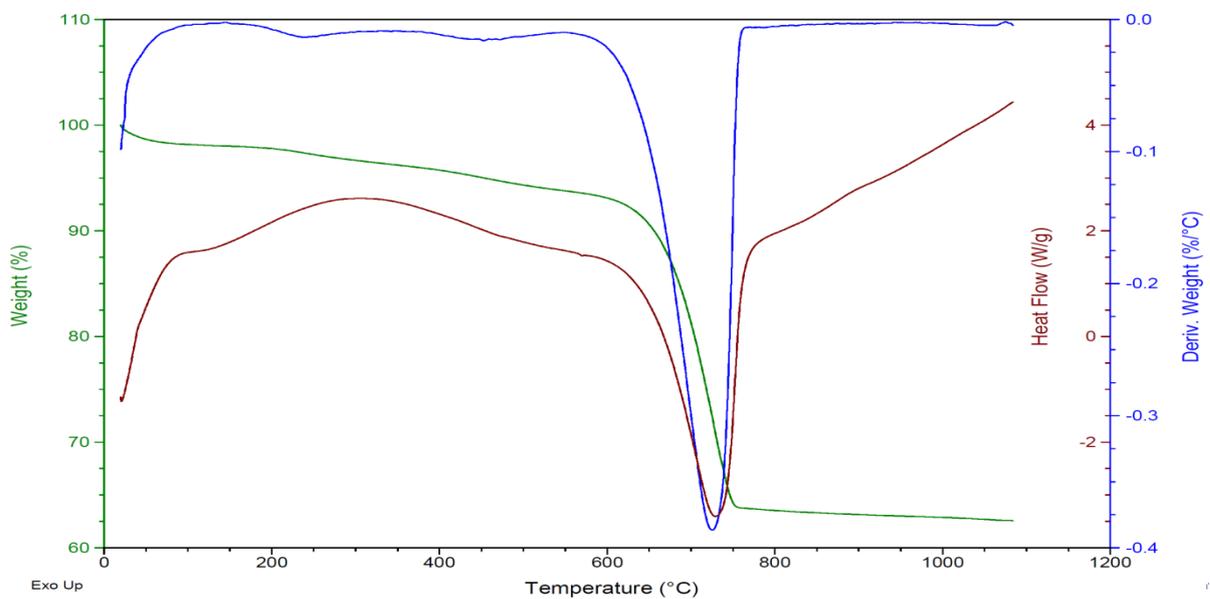


Fig.4.41. Courbe de l'analyse thermique simultanée.

### 3.1.5.3. Analyse chimique élémentaire MEB- EDS :

L'analyse chimique élémentaire montre la forte présence des atomes de calcium qui correspondent à la forte teneur en calcite  $\text{CaCO}_3$  et une teneur moyenne en silicium qui correspond au quartz  $\text{SiO}_2$  avec des traces d'aluminium, sodium, magnésien, soufre, potassium, manganèse et fer (figure.4.42), ce qui concorde bien avec les résultats obtenus par diffraction X et par l'analyse thermique différentielle.

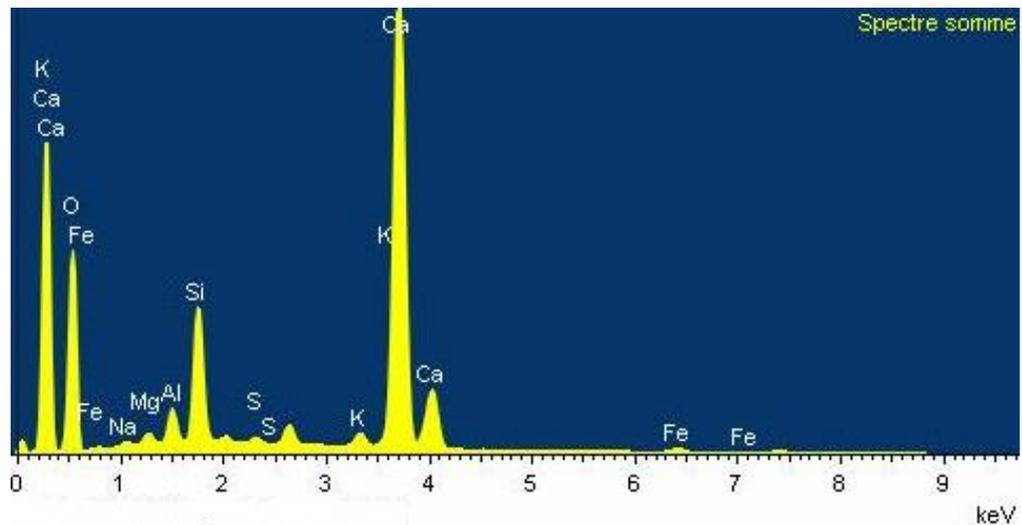


Fig 4.42.Spectre des rayons x du mortier Mm02.

### 3.1.5.4. Cartographie X :

Les images de la cartographie X (figure 4.43), viennent de confirmer ce qui à été dit auparavant sur la composition de ce mortier car nous remarquons la dominance d'une matrice fine en liant de calcite avec la présence de plusieurs fragments de calcite, nous notons aussi la présence moyenne du quartz avec la présence de plusieurs fragments composées en silicium en aluminium, magnésium, sodium, potassium, et fer qui correspond très probablement à des fragments de nature argileuse.

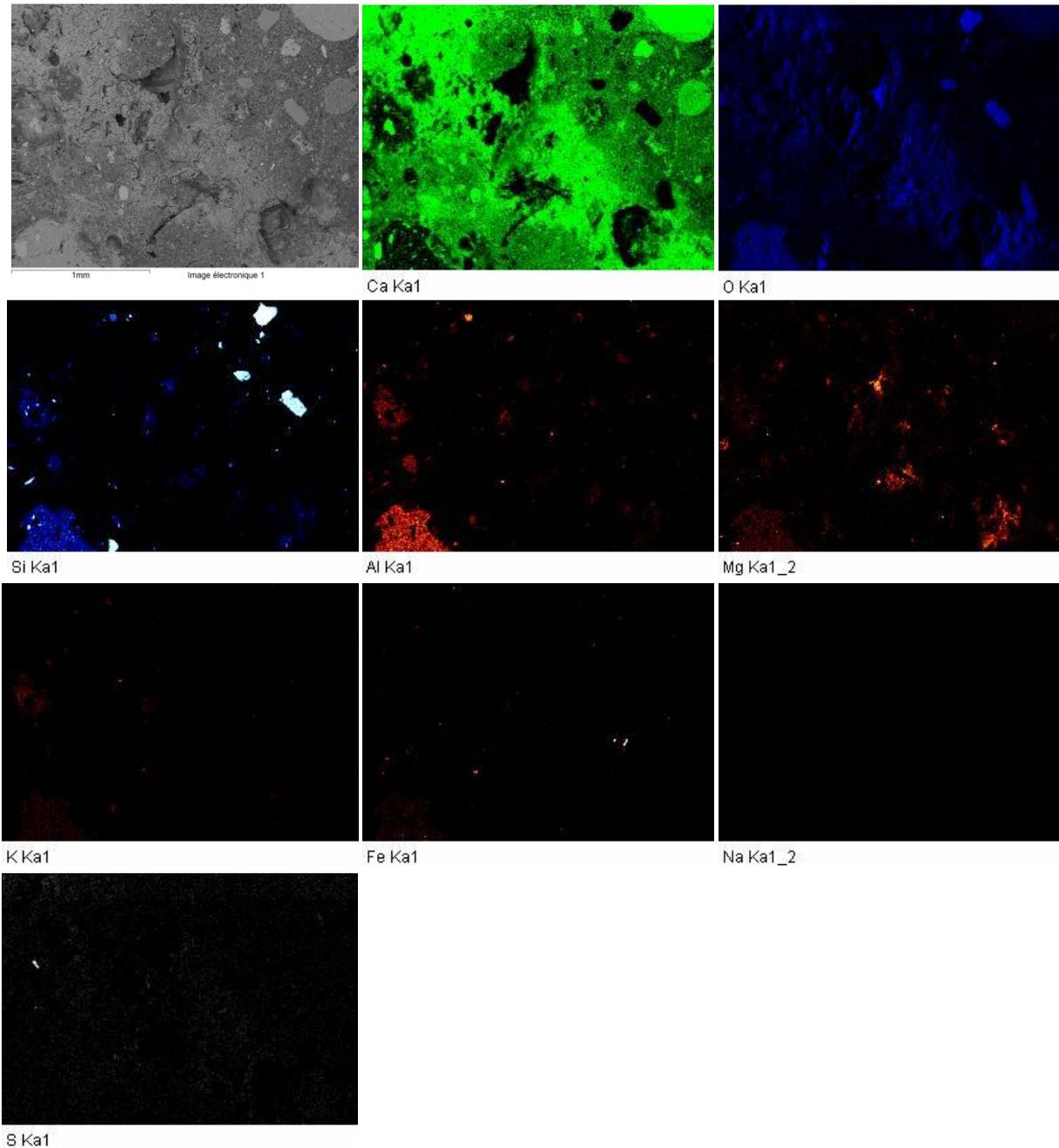


Fig.4.43. Cartographie des images X du mortier Mm02.

### 3.2. Mur de la petite construction :

#### 3.2.1. Description de la technique de maçonnerie

Les murs sont réalisés selon la *technique Opus Mixtum à bandes*, une technique de maçonnerie utilisant une combinaison entre la brique cuite et des blocs de moellons bruts de tailles différentes, dans notre cas nous avons deux assises en briques alternées par quatre rangés en moellons bruts (figure.4.44).

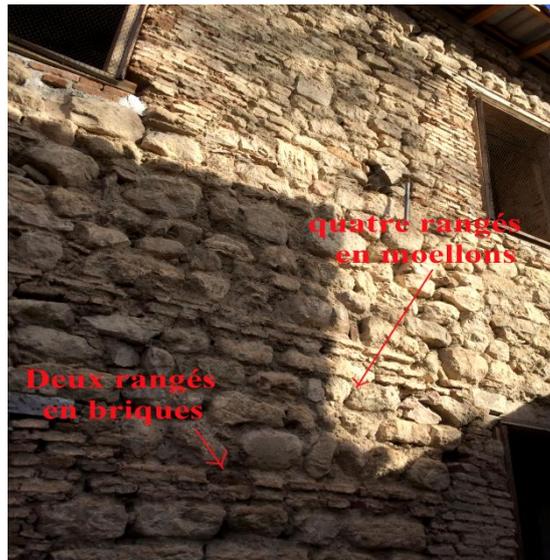


Fig.4.44. Technique de maçonnerie de la construction.

### 3.2.2. Caractérisation de la pierre Pmc :

La pierre Pmc est une pierre très dure et compacte caractérisée par une texture hétérogène et une couleur rose brunâtre avec des taches rouge, figure.4.45).

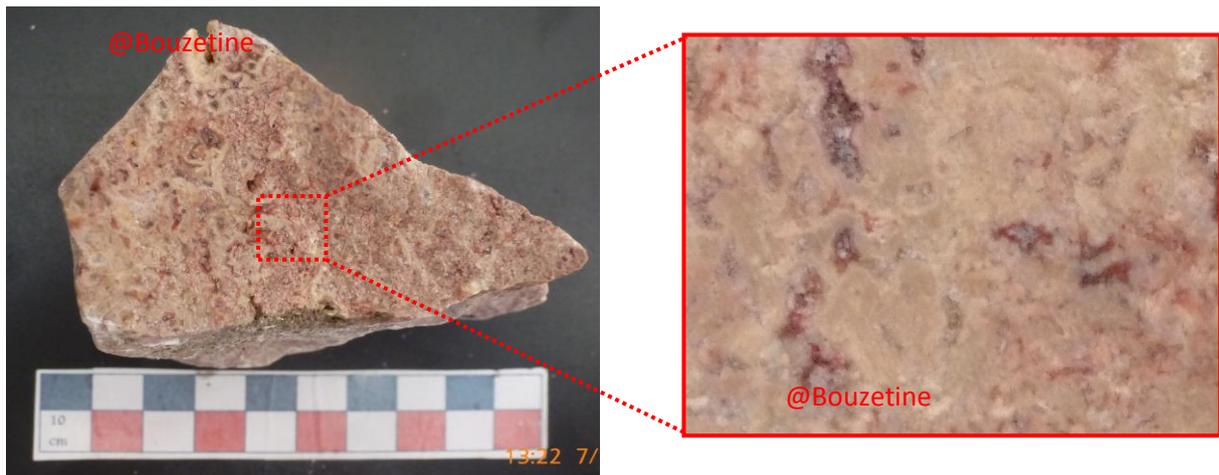


Fig.4.45. Section polie de la pierre Pmc01.

#### 3.2.2.1. Analyse Minéralogique par diffraction X :

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X, montre la présence de la calcite  $\text{CaCO}_3$  comme phase minérale dominante avec la présence du quartz  $\text{SiO}_2$  et l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (figure.4.46).



### 3.2.2.3. Caractéristiques pétrophysique :

Les caractéristiques pétrophysique de la roche Pmc01 sont données dans le tableau 4.7.

Tableau.4.7.Caractéristiques pétrophysique de la pierre Pmc.

Echantillon	Masse volumique apparente $\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse spécifique $\rho_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption d'eau $Ab_s$ %	Porosité totale $P_{to}$ %
Pmc	2.41	2,55	9,21%	14,62

Nous remarquons que la pierre Pmc possède une masse volumique relativement élevée avec une porosité totale moyenne et d'absorption d'eau relativement faible.

### 3.2.3. Caractérisation du mortier Mpc :

A l'œil nu, le mortier Mpc montre une couleur grisâtre avec la présence de quelques grains de tailles et de couleurs différentes, sous la loupe binoculaire la matrice apparaît avec une couleur grise riche en tuileaux de taille et de nature différentes avec la présence des grains de calcite à jaune orangé, de grains de quartz transparents de petites tailles moins abondants et de tailles variables, (figure.4.48).

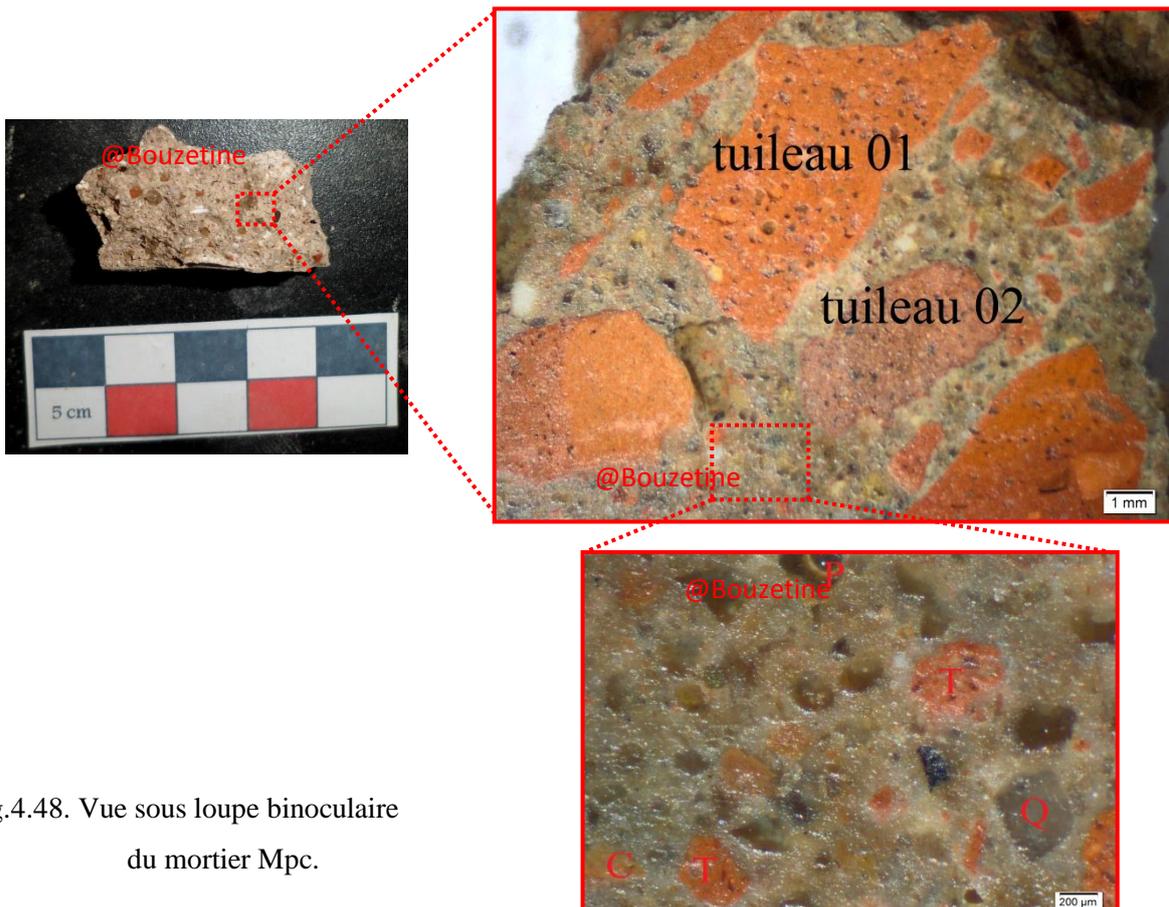
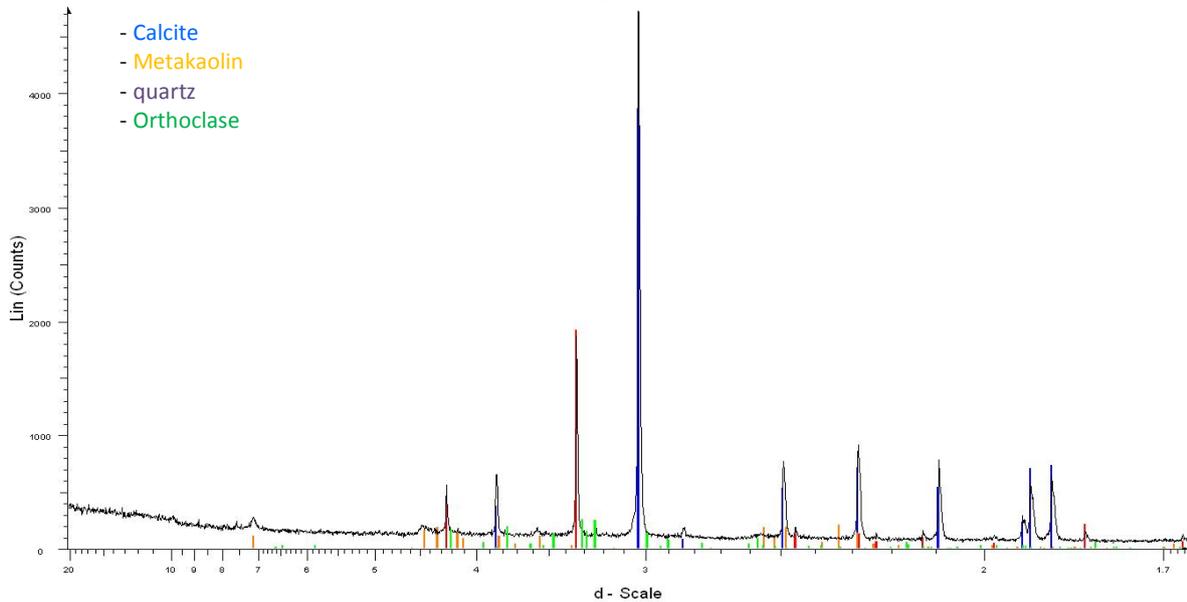


Fig.4.48. Vue sous loupe binoculaire du mortier Mpc.

### 3.2.3.1. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X :

L'analyse minéralogique montre la présence de la calcite comme phase principale, le quartz avec une teneur considérable, les feldspaths marqués par la présence de l'orthoclase et le métakaolin (figure.4.49).



### 3.2.3.2. Analyse thermique simultanée

Nous remarquons un pic intense relatif à la décomposition de la calcite (figure.4.50), la teneur en calcite est égale à :

$$X_{\text{CaCO}_3} = (20 \cdot 100) / 43,95 = 45,25\%$$

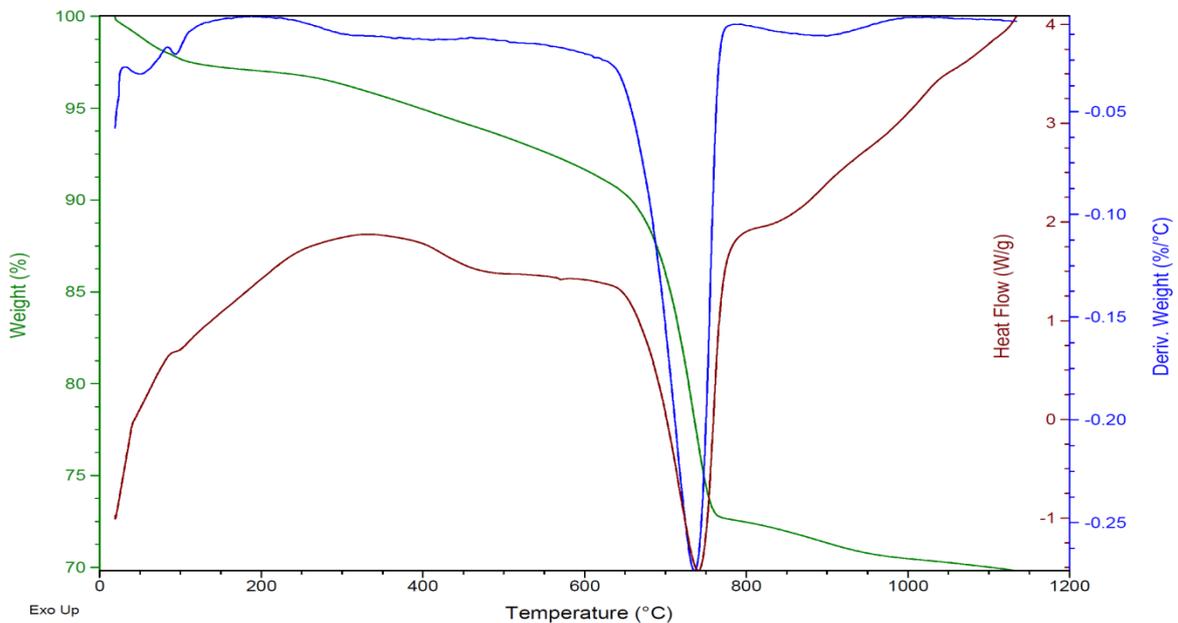


Fig.4.50. Courbe de l'analyse thermique simultanée.

### 3.2.3.3. Analyse chimique élémentaire MEB-EDS :

L'analyse chimique élémentaire montre la forte présence des atomes de calcium qui correspondent à la forte teneur en calcite  $\text{CaCO}_3$ , une teneur forte en silicium qui correspond au quartz  $\text{SiO}_2$  avec la présence remarquable des atomes, d'aluminium, de fer, de potassium et de quantités moindre de sodium, de magnésien, de soufre, et de manganèse (figure.4.51), ce qui concorde bien avec les résultats obtenus par diffraction X et par l'analyse thermique différentielle.

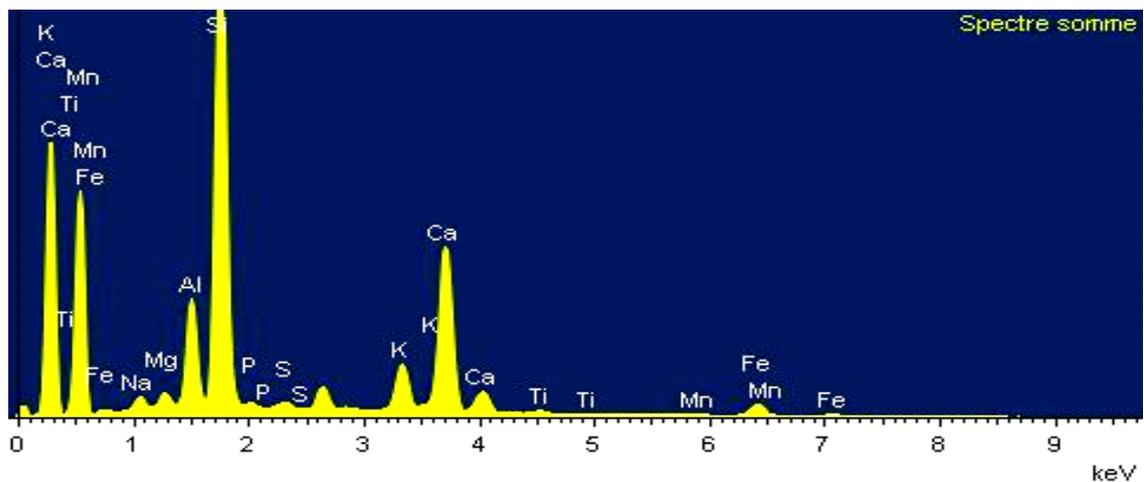
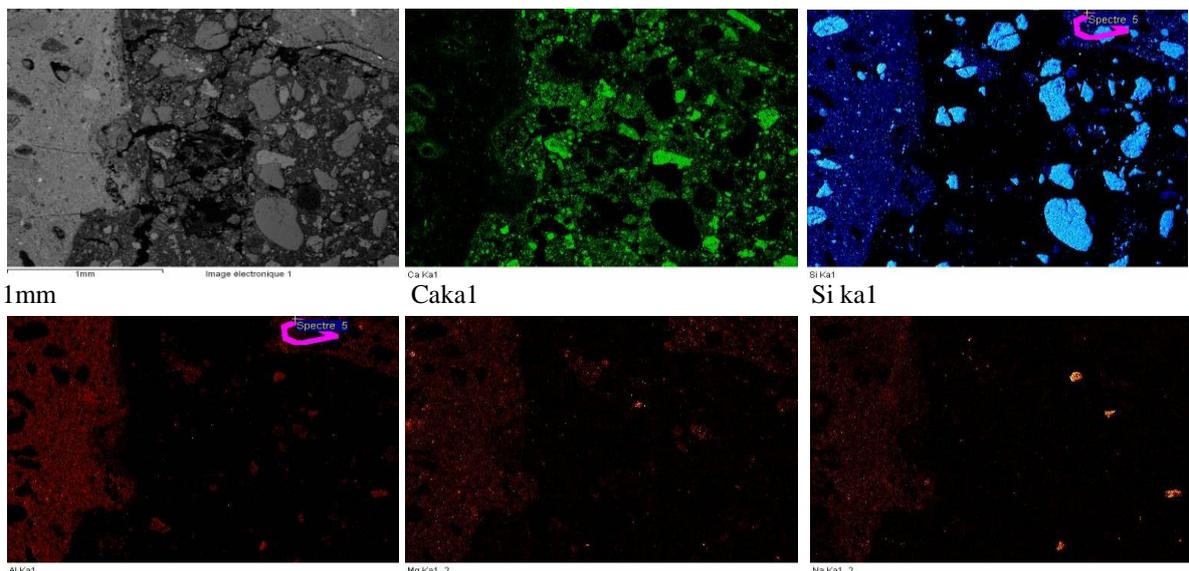


Fig.4.51.Spectre des rayons x du mortier Mpc.

### 3.2.3.4. Cartographie X :

Les images de la cartographie X (figure.4.52), viennent de confirmer ce qui à été dit auparavant sur la composition de ce mortier car nous remarquons la forte présence d'une matrice fine en liant de calcite,, nous notons aussi la forte présence du quartz avec un gros fragment de tuileau composé de silicium, aluminium, magnésium, sodium, potassium, fer, titanium et des traces de soufre.



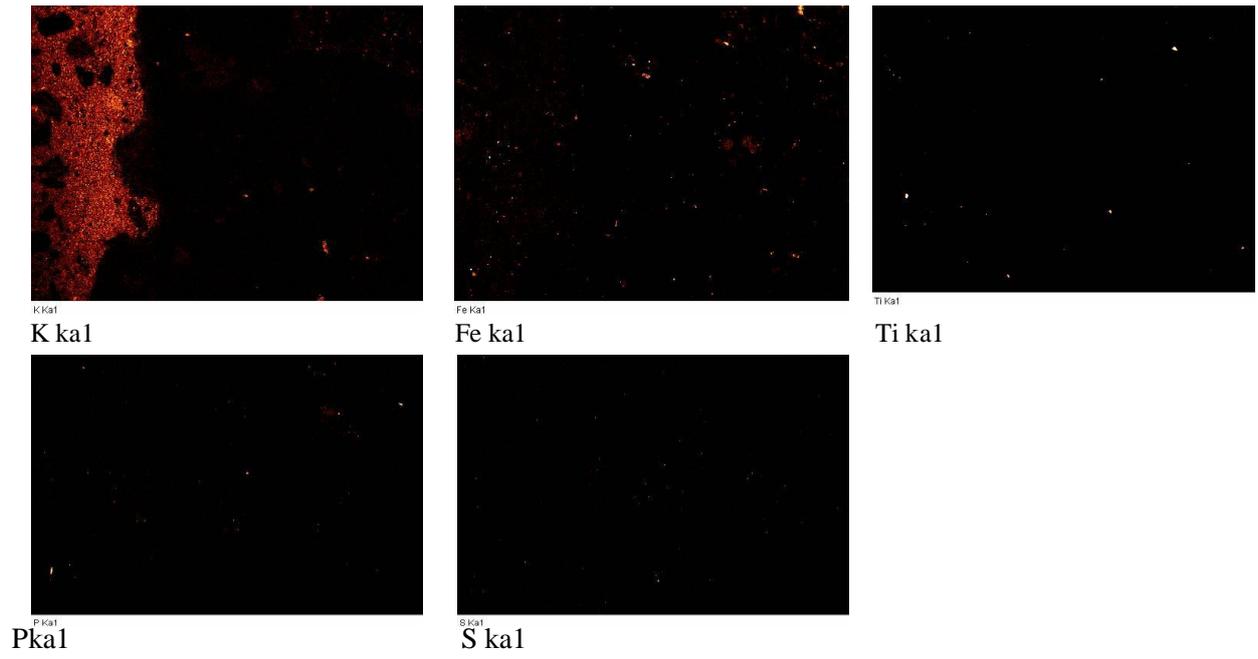


Fig.4.52. Cartographie X du mortier Mpc.

#### 4. Conclusion :

D'après les résultats de l'étude des techniques de maçonnerie combinés aux caractérisations de leurs matériaux constitutifs (pierres e mortiers), nous pouvons conclure que l'analyse stratigraphique est très compatible des résultats obtenus dans la caractérisation des matériaux car chaque unité stratigraphique est composée de pierres et de mortiers différents les unes par rapport aux autres.

- La première unité stratigraphique est construite selon la technique *opus Quadratum* composée par le mur antique sud en fondation, construit de pierre Pfs pierre parfaitement taillée, de couleur jaunâtre relativement dense, dure un peu poreuse et absorbante, composée totalement de  $\text{CaCO}_3$  selon le résultat obtenu par diffraction DRX et par l'analyse pétrographique sur lame mince, quand au mortier utilisé Mfs est composé principalement d'une matrice en gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  avec un le reste est composé d'inclusions de sable et de traces de terre selon les résultats obtenus par ATS, DRX, le MEB- EDS et la cartographie des rayons X confirme ce résultat.
- La deuxième unité stratigraphique est construite en monolithe superposé composée par les fondations centre qui supportent les perliers en marbre qui à leur tour supportent la structure de la salle de prière, construit par la pierre Pfc, pierre de caractéristique petrophysique proche à la pierre Pfs mais de formation géologique différente, il s'agit d'un calcaire rosâtre tacheté comme le montre les résultats obtenu par DRX et par l'analyse pétrographique. Le mortier utilisé est composé d'une matrice de calcite  $\text{CaCO}_3$  avec un pourcentage d'environ de 62% et du sable à 38% selon la DRX et ATS, le MEB-EDS et la cartographie X confirment le résultat obtenu.
- La troisième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Africanum* composée par le mur nord et ouest, composée de pierre Pfn, pierre compacte, dure, un peu plus poreuse et absorbante que les autres pierres, caractérisé par une texture hétérogène et une couleur brunâtre avec la présence de recristallisation incolore et de micropores, cette dernière composée principalement par la calcite et des traces de quartz comme le montre l'analyse minéralogique par DRX et l'analyse pétrographique, quant au mortier Mfn est un mortier très friable et montre une couleur grisâtre, sous la loupe binoculaire le mortier qui apparait avec une couleur grise et la présence de grains de calcite avec une teneur faible, nous notons aussi la présence du charbon le tout est noyé

dans une matrice argileuse grise et parfois jaune l'analyse minéralogique par DRX montre qu'il est composé de calcite, de quartz, d'ankérite et de kaolinite.

- La quatrième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Quadratum*, constitue la partie basse du mur antique, elle est composée de la pierre de taille de plusieurs dimensions et de réemploi, cette pierre Pm01 est dure mais très poreuse et très absorbante, composé de calcite avec une couleur brunâtre selon les résultats obtenus par DRX et par l'analyse pétrographique sur lame mince, quand au mortier Mm01 il est composée d'une matrice et de grains de calcite le tout en un pourcentage de 86,5% le reste est composé de quartz du charbon des inclusions de terre, selon les résultats obtenu par ATS et DRX confirmés par le MEB-EDX et la cartographie des rayons X.
- La cinquième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Vitatum* et composé par la partie haute du mur de l'enceinte, elle est composée de la pierre Pm02 très dure avec une porosité et une absorption moyennement faible composée de calcite brunâtre marquée par la présence des bioclastes selon les résultats obtenus par DRX et par l'analyse pétrographique sur lames mince, quant au mortier Mm02 il est d'une composition proche au mortier Mm01 de la quatrième unité stratigraphique en composition qualitative, composé d'une matrice à 68% de calcite le reste composé principalement de quartz et des inclusion de terre nous notons aussi la présence du charbon dans la composition selon les résultats obtenus par DRX et ATS qui sont confirmés par MEB-EDX et la cartographie des rayons X.
- La sixième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Mixtum à bandes* compose la petite constructions ancré au mur de l'enceinte dans sa partie Est, caractérisée par la pierre Pmc d'une teinte rosâtre tachetée par une couleur rouge brique caractérisée par la présence de calcite de quartz et de l'hématite « oxyde de fer » selon les résultats obtenus par DRX et par l'analyse pétrographique sur lame mince; quant au mortier Mmc il est tout différent, composé de grains de brique pilé et du quartz noyé dans une matrice de calcite avec une teneur de 45%, déduite par ATS, le feldspath orthoclase de métakaolin et du quartz détecté par atteste la présence des tuileaux le tout est confirmé par le MEB-EDS et la cartographie X.

## CONCLUSION GENERALE :

L'étude menée dans ce travail basée sur une approche scientifique expérimentale et renforcée par l'aspect : historique, archéologique et architecturale. Elle atteste que la vieille mosquée de Mila ou la mosquée de Sidi Ghanem est l'une des premières mosquées fondées en Algérie, sa date de construction remonte à la période Omeyyades.

### ▪ Approche historique

Historiquement la mosquée a été citée par des historiens et géographes arabe; *Abū Ubayd al-Bakrī* 1094 dit qu'elle existée à son temps, *Ibn Idriss al-Qurtubi al-Hassani* 1154 Ap-JC confirme cette information alors que *Abū al-Mahāsin Jamāl ad-Dīn Yūsuf bin at-Taġrībirdī* 1414 Ap-JC attribue la construction de cette mosquée à *Abou al-Mouhajir Dinar al-Ansari* émir de l'Ifriqiya entre 675 à 681Ap-JC.

### ▪ Approche archéologique

La ville est pleine de vestiges de différentes époques : punique, romaine byzantine, et musulmane. Les témoins matériels les plus anciens disponibles actuellement ont été révélées par l'archéologue français Jean LASSUS lors de ces fouilles à la place du Merkez près de la mosquée en 1957, il s'agissait des pièces de monnaies musulmanes en bronze corrodées et d'inscription coufique arrondies entre les niveaux (2,80 et 3,60) mètres de profondeur et par l'archéologue algérien DOUKALI Rachid lors des fouilles des années 1968 à 1970 à l'intérieur de la salle de prière de la mosquée ou il a mis la lumière sur une pièce de bronze avec inscription centrale en caractères coufique et un éléments de décors sur plâtre identique à ceux trouvés par Golvin dans Qalâa des Banû Hammad.

### ▪ Approche architecturale

De point de vue architecture, la forme hypostyle plus large que profond, l'utilisation des matériaux de réemplois : pierre, colonnes et chapiteaux romains ou byzantins ne proviennent pas des mêmes édifices, La salle de prière présente des nefs parallèles au mur de la *Qibla*, les arcades des nefs des salles de prières sont plein cintre outrepassé (fer à cheval) ou brisé, dont les origines sont forte probable romaine et byzantine, l'orientations de la Qibla vers le Sud, tous ces informations évoquent les premières mosquées médiévales construite à l'aube de l'islam comme la mosquée du prophète Qssl à Médine, d'El Kûfa, El Basra et El Wâsit.

### ▪ Etude stratigraphique architecturale (chronologie relative)

L'étude stratigraphique relative appliquée à la mosquée à travers une stratigraphie architecturale a montré plusieurs unités stratigraphiques différentes les unes des autres par les techniques de maçonnerie et les matériaux employés ce qui a permis de comprendre bien cet édifice ou la mosquée n'a pas été construite sur le plan d'une basilique ancienne mais plutôt à côté et dessus d'autres constructions remontant à des périodes différentes.

La première unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Quadratum* composée par le mur antique sud en fondation.

La deuxième unité stratigraphique est construite en monolithe superposé composée par les fondations centre qui supportent les perliers en marbre qui à leur tour supportent la structure de la salle de prière,

La troisième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Africanum* composée par le mur nord et ouest.

La quatrième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Quadratum*, constitue la partie basse du mur antique, elle est composée de la pierre de taille de plusieurs dimensions et de réemploi.

La cinquième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Vitatum* et composée par la partie haute du mur de l'enceinte,

La sixième unité stratigraphique est construite selon la technique *Opus Mixtum à bandes* compose la petite construction ancrée au mur de l'enceinte dans sa partie Est.

La septième unité stratigraphique

Le schéma 05, illustre la chronologie relative de la construction de la mosquée.

- **1. première unité stratigraphique :** composée d'un mur antique appartenant à une construction adjacente et plus profonde à la salle de prière primitive, ce mur a servi comme fondation pour le mur sud démolie qui contenait le mihrab primitif.
- **2. deuxième unité stratigraphique :** composée de deux murs perpendiculaires qui ont servi comme fondation pour les murs démolies ouest et nord de la salle de prière primitive de la période romaine.
- **3 ;Troisième unité stratigraphique :** composée par les murs sud, ouest et nord démolies et le mur est encore debout en plus des fondations, colonnes, futs et arcades en briques qui compose l'enceinte de la salle de prière primitive

- **4. Quatrième unité stratigraphique et cinquième** : composée par l'extension de la salle de prière en sa forme actuelle, composée par les murs sud, ouest et nord avec l'ensemble de colonnes et des futs qui supportent des arcades en briques.
- **6. sixième unité stratigraphique** : composée par une construction greffée sur le mur est de la salle de prière actuelle.
- **7. Septième unité stratigraphique** : composée de deux constructions greffées l'une sur le mur Nord-est et l'autre au milieu du mur nord de l'enceinte actuelle qui remontent à la période coloniale.

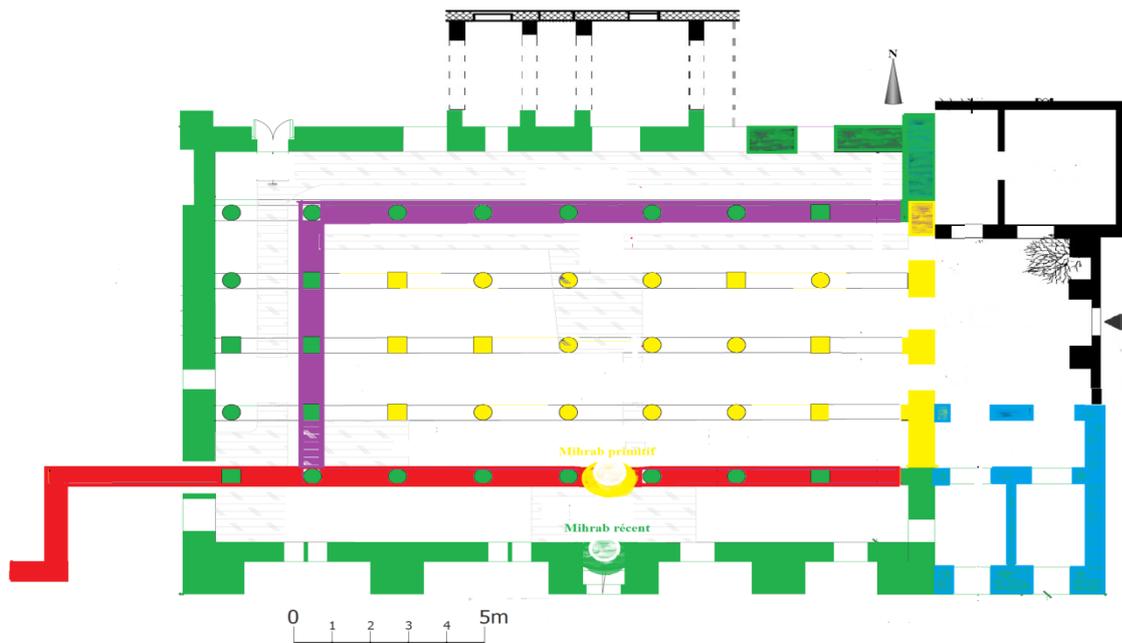


Schéma 05 : Chronologie de construction et de modification de la mosquée de Sidi Ghanem.

#### ■ **Caractéristiques des matériaux de construction**

L'unité stratigraphique N°01 est construite par la pierre Pfs, pierre parfaitement taillée, de couleur jaunâtre très dure, caractérisée par une masse volumique  $M_v$  égale à  $2.55 \text{ g/cm}^3$ , une porosité totale  $P_t$  égale à 8.97 % et une absorption d'eau de 5.45%, composée totalement de  $\text{CaCO}_3$  selon le résultat obtenu par diffraction DRX et par l'analyse pétrographique sur lame mince, quant au mortier utilisé Mfs est composé principalement d'une matrice en gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  avec un pourcentage élevé le reste est composé d'inclusions de sable et de traces de terre selon les résultats obtenus par ATS, DRX, le MEB-EDS et la cartographie des rayons X confirme ce résultat.

L'unité stratigraphique N° 02 est construite par la pierre Pfc, pierre de caractéristique pétrophysique proche à la pierre Pfs, caractérisée par une masse volumique  $M_v$  égale à  $2.40 \text{ g/cm}^3$ , une porosité totale  $P_t$  égale à 10.02 % et une absorption d'eau de 7.11% mais de formation géologique différente, il s'agit d'un calcaire rosâtre tacheté comme le montre les résultats obtenu par DRX et par l'analyse pétrographique. Le mortier utilisé est composé d'une matrice de calcite  $\text{CaCO}_3$  avec un pourcentage d'environ de 62% et du sable à 38% selon la DRX et ATS, le MEB-EDS et la cartographie X confirment le résultat obtenu.

L'unité stratigraphique N°03 est construite par la pierre pfn, caractérisée par une masse volumique  $M_v$  égale à  $2.35 \text{ g/cm}^3$ , une porosité totale  $P_t$  égale à 15.34 % et une absorption d'eau de 10.22%, caractérisé par une texture hétérogène et une couleur brunâtre avec la présence de recristallisation incolore et de micropores, cette dernière composée principalement par la calcite et des traces de quartz comme le montre l'analyse minéralogique par DRX et l'analyse pétrographique, quant au mortier Mfn est un mortier très friable et montre une couleur grisâtre, sous la loupe binoculaire le mortier apparait avec une couleur grise avec la présence de grains de calcite avec une teneur faible, nous notons aussi la présence du charbon le tout est noyé dans une matrice argileuse grise et parfois jaune l'analyse minéralogique par DRX montre qu'il est composé de calcite, de quartz, d'ankérite et de kaolinite.

L'unité stratigraphique N°04 est construite par la pierre Pm01, caractérisée par une masse volumique  $M_v$  égale à  $2.10 \text{ g/cm}^3$ , une porosité totale  $P_t$  égale à 38.07 % et une absorption d'eau de 25 % , composé de calcite avec une couleur brunâtre selon les résultats obtenus par DRX et par l'analyse pétrographique sur lame mince, quant au mortier Mm01 il est composée d'une matrice et de grains de calcite le tout en un pourcentage de 86,5% le reste est composé de quartz du charbon des inclusions de terre, selon les résultats obtenu par ATS et DRX confirmés par le MEB-EDS et la cartographie des rayons X.

L'unité stratigraphique N°05 est construite par la pierre Pm02, caractérisée par une masse volumique  $M_v$  égale à  $2.18 \text{ g/cm}^3$ , une porosité totale  $P_t$  égale à 26.15 % et une absorption d'eau de 18.33% composée de calcite brunâtre marquée par la présence des bioclastes selon les résultats obtenus par DRX et par l'analyse pétrographique sur lames mince, quant au mortier Mm02, il est d'une composition proche au mortier Mm01 de la quatrième unité stratigraphique en composition qualitative, composé d'une matrice à 68% de calcite le reste composé principalement de quartz et des inclusion de terre nous notons aussi la présence du

charbon dans la composition selon les résultats obtenus par DRX et ATS qui sont confirmés par MEB-EDX et la cartographie des rayons X.

L'unité stratigraphique N°06 est construite par la pierre Pmc, d'une teinte rosâtre tachetée par une couleur rouge brique, caractérisée par une masse volumique  $M_v$  égale à  $2.41 \text{ g/cm}^3$ , une porosité totale  $P_t$  égale à 14.96 % et une absorption d'eau de 9.21%, caractérisée par la présence de calcite de quartz et de l'hématite « oxyde de fer » selon les résultats obtenus par DRX et par l'analyse pétrographique sur lame mince; quant au mortier Mmc il est tout différent, composé de grains de brique pilé et du quartz noyé dans une matrice de calcite avec une teneur de 45%, déduite par ATS, le feldspath orthoclase de métakaolin et du quartz détecté par atteste la présence des tuileaux le tout est confirmé par le MEB-EDS et la cartographie X.

En résumé les pierres de construction sont des pierres calcaires, mais de formation géologique différente c.-à-d qu'elles n'appartiennent pas aux mêmes gisements et qui ont des propriétés pétrophysique différentes. Quant aux mortiers la majorité sont composés d'une matrice calcaire avec différents pourcentage mélangée au quartz parfois au charbon et à la brique pilée et d'autres inclusions ; nous marquons aussi la présence d'un mortier à base de terre avec le charbon et un autre mortier en plâtre avec la présence des inclusions du quartz. Les résultats des caractéristiques des matériaux de construction (pierres et mortiers) confirment bien la différence dans les unités stratigraphiques.

#### ▪ **Datation Absolue par OSL**

Pour la datation absolue une technique d'investigation ultramoderne et très précise qui représente la dernière génération des méthodes de datation sur les matériaux minéraux contenant du quartz qui est la luminescence stimulée optiquement (OSL) a été utilisé, cette méthode affiche que l'édification de l'enceinte primitive a été réalisée en  $616 \text{ Ap-JC} \pm 78$  ans soit entre [538 à 694] Ap-JC équivalent à [-84 à 72] H ; après la comparaison de ces dattes avec des évènements historique très bien connus nous pouvons conclure que l'édification de la mosquée a été faite entre [48 à 72] H sous la règne des (*Banū 'Umayyah*) ou omeyyades, pour l'extension la méthode affiche l'année  $1007 \text{ Ap-JC} \pm 80$  ans soit entre [927- 1087] Ap-JC qui correspond à [305-465] H, par comparaison aux évènements historiques nous pouvons conclure que cette extension a été réalisée entre [397 a 465] H sous la règne des (*Banû Hammad*) ou Hammadides.

- **Etat de conservation**

La dégradation de la pierre calcaire de la mosquée est due principalement à l'environnement humide de la région et la nature de la pierre mise en œuvre.

Les mesures préventives prises ne couvrent pas tous les aspects nécessaires à la protection des matériaux de construction ainsi que les structures : Les remontées capillaires, l'absence des traitements biocides ce qui provoque le développement des micro-organismes qui trouvent un climat très favorable en présence de l'humidité. La stabilité de la structure où les éléments porteurs tels que les colonnes et les piliers ne sont pas renforcés et leurs stabilité n'est pas assurée jusqu'à ce jour malgré le tremblement de terre qui a frappé la wilaya de Mila le 07 Aout 2020.

- **Recommandation**

A cet effet nous recommandons de mettre en place un système de tirants entre les colonnes et piliers et les murs de l'enceinte, qui assurera la stabilité de la structure jusqu'à ce que de vrais travaux de réhabilitation soient entrepris.

## Références bibliographique.

- Abd Elhamid Badjadja, Bureau d'études art et patrimoine, Constantine 2012.
- Abu 'Ubayd Allah El-Bakri, Description..., (texte arabe).
  - Andrew M, Rituals of Islamic Monarchy: Accession and Succession in the First Muslim Empire, Édimbourg, Edinburgh University Press, 15 avril 2009.
  - Andrew Petersen, Dictionary of Islamic Architecture, 1st Edition, Routledge ,June 1999.
  - A. Wafi (1988), « Les mihrabs et leurs ornements décoratives », Le mihrab dans l'architecture et la religion musulmane, Actes du colloque international tenu à Paris en Mai 1980.
  - A; Nédélec J-L. Bouchez, Pétrologie des granites Structure - Cadre géologique, Edition Vuibert 2011.
  - A.Timar-Gabor, J.-P. Buylaert , B. Guralnik , O. Trandafir-Antohti , D. Constantin, V. \* Anechitei-Deacu ,M. Jain, A.S. Murray, N. Porat ,Q. Hao, A.G. Wintle: the importance of grain size in luminescence dating using quartz; Elsevier Radiation Measurements 106 (2017).
  - Aitken M.J., 1985. Thermoluminescence dating. Academic Press, London.
  - Athina Boleti , Modalités d'exploitation dans le monde égéen protohistorique et antique .Collection Cahiers archéologiques de Paris 1, 2017.
  - Auguste Choisy, Vitruve, Analyse, Tome 1, Paris 1909.
  - Bailiff, I.K., 2007. Methodological developments in the luminescence dating of brick from English late-medieval and post-medieval buildings. Archaeometry 49. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-754.2007.00338.x>.
  - Bailiff IK, Holland N, 2000 Dating bricks of the two last millennia from Newcastle upon Tyne: a preliminary study, Radiation Measurements 32.
  - Ben Azzouna Nourane, Cours histoire de l'art et archéologie de l'islam, l'architecture de la mosquée du VIIIe au Xe siècle, université de Strasbourg 2005.
  - B.H. Purser, Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents. Tome 1: les éléments de la sédimentation et de la diagenèse. Edition Technip 1980.
  - Blain S, Guibert P, Bouvier A, Vieilleigne E, Bechtel F, Sapin C, Baylé M, 2007. TL-dating applied to building archaeology: The case of the medieval church Notre-Dame-sous-Terre (Mont-Saint-Michel, France). Radiation Measurements 42: 1483-1491.
  - Bourouiba Rachid Apports de l'Algérie à l'architecture Religieuse Arabo-islamique, Office des Publications universitaires, Alger, 1986.
    - Bromblet (P.), Oriol (G.), Martinet (G.), Philippon (P.), Vergès-Belmin (V.) - Altération Des Pierres Des Monuments. - Vol. Iii (2002).
  - CEA (collectif anonyme), 1978 - Statistique appliquée à l'exploitation des mesures, t.1, Ed. Masson, Paris.
  - CHERGUI Samia ; « Essai stratigraphique de deux demeures du fahs algérois, », Al-Sabîl : Revue d'Histoire, d'Archéologie et d'Architecture Maghrébines n°2, Année 2016.
  - Creswell; Medina: Muhammad's House/Mosque, New York: Hacker Art Books, 1979,
  - Creswell, Early Muslim Architecture, première édition, 1932.
  - Creswell, K.A.C., Early Muslim Architecture, tome II, New York, Hacker Art Books, 1979.
  - Cyril Glassé et Huston Smith, The new encyclopedia of Islam, éd. Rowman Altamira, 2003,
  - De Corte F., Vandenberghe D., Buylaert J.-P., Van den Haute P., Kučera J., 2006. Relative and k0-standardized INAA to assess the internal (Th, U) radiation dose rate in the "quartz coarse-grain protocol" for OSL dating of sediments: Unexpected observations. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 564.
  - Delamare A. H. A. , Exploration scientifique de l'Algérie pendant les années 1840, 1841, 1842, Edition Paris, 1850.

- Dessus Lamare, A.; Marçais, Georges, Recherches d'archéologie musulmane. La mosquée du Vieux-Ténès. Revue Africaine, Bulletin De La Société Historique Algérienne.
- Doukali Rachid, rapport de fouille du 30 novembre 1968, service des antiquités, Alger
- Dureau de La Malle, Histoire des Guerres des Romains, des Byzantins et des Vandales, Paris ,1852.
- Duller Geoff, Luminescence Dating: Guidelines on using luminescence dating in archaeology, Aberystwyth University, September 2008.
- Edward Gibbon et François Guizot (éditeur et réviseur), Histoire de la décadence et de la chute de l'Empire romain, t. 10, Paris, Lefèvre, 1819.
- El khammar Abdeltif, Mosquées et oratoires de Meknès (IXe-XVIIIe siècle) : géographie religieuse, architecture et problème de la Qibla, Lyon, 2007.
- Élodie Vigouroux, « La Mosquée des Omeyyades de Damas après Tamerlan », Bulletin d'études orientales, Tome LXI décembre 2012.
- Emmanuelle Vieilleigne; The potential of optically stimulated luminescence for medieval building; A case study at Termez, Uzbekistan, Radiation Measurements 41(7): P.991-994 • August 2006.
- Emmanuelle Vieilleigne; Laurence Bourguignon, Illuminada Ortega and Guibert -Analyse croisée des données chronologiques et des industries lithiques dans le grand sud-ouest de la France (OIS 3)- Revue d'archéologie préhistorique 2008,.
- Extrait de la norme européenne EN 12407.
- Extrait de la Norme européenne NBN EN 12372.
- Extrait de la Norme européenne NBN EN 1926.
- Extrait de la Norme européenne NBN EN 12371.
- Extrait de la norme européenne NBN EN 1936.
- Frédéric Davidovits, Les mortiers de pouzzolanes artificielles chez Vitruve, évolution et historique architecturale. Thèse de DEA université Paris X-Nanterre,1993.
- G.Fehévâri, « Mihrab », E.I., VII, Paris,1990.
- Gallica, BNF, bibliothèque nationale française.
- Germain de Montauzan, Les Aqueducs antiques, DJVU 1908,
- Georges Marçais, Manuel d'art musulman : L'Architecture (Tunisie, Algérie, Maroc, Espagne, Sicile), Bulletin hispanique, 1929.
- Gsell Stéphane - Les Monuments Antiques de l'Algérie - Tome II, Paris 1901.
- Gsell Stéphane, Les monuments Antiques de l'Algérie, tome 02, Paris 1901.
- Gilles fauck, pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre, les cahiers techniques du bâtiment, N° 179, avril 1997,
- Guérin, G., Mercier, N., Adamiec, G., 2011. Dose-rate conversion factors: update..Ancient TL, 29.
- Guibert, P., Lahaye, C., Bechtel, F.,2009b. The importance of U-series disequilibrium of sediments in luminescence dating: a case study at the Roc de Marsal cave (Dordogne, France). Radiat. Meas. 44.
- Guibert, P., Bailiff, I.K., Blain, S., Gueli, A.M., Martini, M., Sibilina, E., Stella, G., Troja, S.O., 2009a. Luminescence dating of architectural ceramics from an early medieval abbey: the St-Philbert intercomparison (Loire-Atlantique, France). Radiat. Meas. 44 (5-6).
- Helene Dessales, petit catalogue des techniques de la construction romaine, école normale supérieure, France,
- Henri Klein, Feuilletés d'El-Djezaïr, les mosquées,(volume récapitulatif), 1937.
- Hicham DJAIT, Kufa. La Fondation de la ville islamique, Paris, 1986.
- Hittotiogtalla ; arabe de la Mezquid.
- Ibn 'Asakir, La description de Damas Institut Français de Damas. Damas, Presses de l'Ifpo, 2009.
- Ibn Khaldoun, Les prolégomènes d'Ibn Khaldoun, vol. 2. (French) Paperback – February 10, 2010.
- Jacquot, L. Monographie archéologique de la région de Mila. Oran, 1894.

- Jean-François Beaux, Bernard Platevoet, Jean-François Fogelgesang, Atlas de Pétrologie, édition Dunod, Paris, 2012,
- Jean-Pierre Adam, La construction romaine, matériaux et techniques, éditions A. et J. Picard, 1984.
- Jeremy Johns, Bayt-al-Maqdis: Part II: Jerusalem and Early Islam (Oxford Studies in Islamic Art, IX)
- Jimenez , La qibla extraviada, Cuadernos de Madinat al-Zahra, 3,1991.
- ICOMOS-ISCS, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, 2008.
- L. de Beylié, La Kalaa des Beni-Hammad : une capitale berbère de l'Afrique du nord au XIe siècle,1909.
- Lézine, A., Architecture de l'Ifriqiya, Recherches sur les monuments aghlabides, Paris, 1966, Klincksieck, p. (11-52).
- Linda Kay Davidson et David Martin Gitlitz, Pilgrimage: from the Ganges to Graceland: an encyclopedia, Volume 1, éd. ABC-CLIO, 2002 .
- Lévi-Provençal, Histoire de l'Espagne musulmane, t.01
- Lucien Golvin, Quelques réflexions sur la grande mosquée de Kairouan à la période des Aghlabides, Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée, N°5, 1968.
- Lucien Golvin, « Le mihrab et son éventuelle signification », Le mihrab dans l'architecture et la religion musulmane, Actes du colloque international tenu à Paris en Mai 1980.
- Maria Philokyprou, Méthode RehabiMed ; Architecture Traditionnelle Méditerranéenne ; partie 2, La dégradation des matériaux de construction.
- Mahindad Naima, les différents système constructifs et l'évolution des caractéristiques des matériaux de archéologiques du VIII au XVII éme siècles en Algérie, thèse de doctorat, université de boumerdes, 2017.
- Mahmoud Akkouch, Contribution à l'étude des origines de l'architecture musulmane : la Grande Mosquée de Médine (Al-Haram al-madani) , Mélanges Maspéro III (Orient islamique), 1940.
- Mohamed Kerrou, La Grande Mosquée de Kairouan L'imam, la ville et le pouvoir, revue des mondes musulmans et de la méditerranée, juillet 2009.
- Marçais, G., Manuel d'art musulman, 2 vol., Paris, 1926-1927.
- M. Bonine , The sacred direction and city structure: a preliminary analysis of thé islamic cities of Morocco, Muqarnas, (1990).
- Mileto Camilla; L'analyse stratigraphique de l'architecture et son application à l'architecture traditionnelle. Méthode Rehabimed. Barcelone, le 30 juin 2007.
- Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Mission ingénierie et référence technique, Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, Juin 2006.
- Michel Demange , Les minéraux des roches , Caractères optiques Composition chimique et Gisement, édition Transvalor - Presses des mines, 2009
- Mohamed Kerrou, La Grande Mosquée de Kairouan L'imam, la ville et le pouvoir,
- Murray, A.S., Wintle, A., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative dose protocol. Radiation Measurements, 32.
- N. Laaboudi et F. Lahsini Pour la technique d'obtention de l'arc en plein cintre, Techniques de réalisation, cf. (1986).
- Patrice Cressier, Sophie Gilotte ,Sedrata: Histoire et archéologie d'un carrefour du Sahara médiéval à la lumière des archives inédites de Marguerite Van Berchem. Madrid 2017.
- Patrick Ringgenberg, L'univers symbolique des arts islamiques, Paris, L'Harmattan, 2009, - Plan Mosquée de sisi-Okba ; Revue africaine (Plan) n° 272-273, 1909.
- Pergolat, les fouilles de Milev R.S.A.C, LVIII, 1927.
- Pierre Chabat, la brique et la terre cuite, étude historique, première partie, Paris 1881.

- Reboud. (Dr. v.) et Goyt. (A), Excursions archéologiques dans le Environs de Milah et de Constantine, (1878-1879), R.S.A.C, 20,1879-1880.
- René Ginouvès, Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome I. Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor, école française de Rome 1985.
- Revue Africaine, Iconographie, Mosquée au Vieux Ténès, N°320, 1925.
- R.P.J. Van Hees, L.Binda, I.Papayanni and E.Toumbakari, Characterization and damaged analysis of old mortars,RILEM TC 167-COM: « Characterization of old mortars with respect to their repair », in Materials and structures, Vol 37, November 2004.
- Thépenier, (E), Le Département de Constantine, archéologique et touristique, 1927.
- Toulotte, (A), Géographie de l'Afrique chrétienne R.S.A.C, 1894.
- Tissot, (Ch), Géographie comparée de la province romaine d'Afrique R.S.A.C, T02, 1888.
- Tissot, (Ch), Exploration scientifique de la Tunisie : Géographie comparée de la province romaine d'Afrique .T02, 1888.
- Urbanová P., Michel A., Cantin N., Guibert P., Lanos P., Dufresne P., Garnier L., 2018. A novel interdisciplinary approach for building archaeology: The integration of mortar “single grain” luminescence dating into archaeological research, the example of Saint Seurin Basilica, Bordeaux. Journal of Archaeological Science: Reports, 20.
- Vandenberghe D., De Corte F., Buylaert J.-P., Kučera J., Van den Haute P., 2008. On the internal radioactivity in quartz. Radiation Measurements 43 (2008).
- Vire (C), Notice sur quelques silex taillés trouvés à Mila, R.S.A.C, 1893.
- Wieslaw Domasowski ; La conservation Préventive de la pierre, UNISCO 1982, page 15.
- William Marçais, Georges Marçais, les monuments arabes de Tlemcen, A. Fontemoing, 1903, pages 142.
- Wintle AG and Murray AS, 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. Radiation Measurements 41(4): 369–391, DOI 10.1016/j.radmeas.2005.11.001.
- 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, ICOMOS, Suède (2004).
  - أبو المحاسن ابن ثغري بردي ;حسن المحاضرة في ملوك مصر و القاهرة
  - احمد فكري، مساجد الإسلام – المعارف، مصر. 1936
  - احمد تاجة، موسوعة فن العمارة الإسلامية دار الحصاد للنشر والطباعة، دمشق، 2000 ،
  - العمارة العربية الإسلامية في عصورها المبكرة القرن 1-3 هجرية
  - احمد توفيق ألمدني كتاب الجزائر مكتبة النهضة المصرية ، القاهرة ، 1982
  - باسيليو بايون مالدونادو، عمارة المساجد في الاندلس، هيئة ابوظبي للثقافة والتراث للطبعة الاولى، 2011،
  - حسين مؤنس، المساجد، الكويت، 1981
  - ريتشارد اتنغهاوزن، الفن الاسلامي والعمارة (650 م 1250 م)، دار الكتاب الوطنية أبو ظبي 2012.
  - خالد عزب، شجاء السايح، الحرم القدسي الشريف، دار الكتاب العربي، بيروت، 2010،
  - صالح لمعي مصطفى، العمارة الإسلامية دار النهضة العربية، بيروت، 1987،
  - عبد الله كامل موسى عبده، المسلمون وأثارهم حتى عصر الخلفاء الراشدين، المجلد 01، جامعة جنوب الوادي، مصر
  - فريد شافعي، العمارة العربية في مصر الإسلامية عصر الولاة، الهيئة العامة المصرية للكتاب، المجلد الاول 1994،
  - مبارك بن محمد الميلي، تاريخ الجزائر في القديم والحديث، ج 1 ، المؤسسة الوطنية للكتاب الجزائر 1983
  - محمد صغير غانم معالم التواجد الفنيقي البوني في الجزائر دار الهدى للنشر والتوزيع

## Résumé :

La mosquée de Sidi Ghanem est considérée comme la première mosquée en Algérie. Sa fondation remonte au premier siècle de l'Hégire. Son édification a été faite par le réemploi des matériaux des époques antérieures. Ce monument a subi d'importantes modifications à travers son histoire et se trouve dans un état de préservation pitoyable.

L'objet de ce travail est de dater cet édifice à travers les caractéristiques de d'emploi des matériaux de constructions : pour ce faire une première datation basée sur une lecture stratigraphique qui permet de le décomposer en plusieurs unités stratigraphiques relative à chaque période ; ce qui nous permettra de comprendre les phases de construction et de remonter à la l'édifice primitif. Deuxièmement une datation absolue par thermoluminescence en grain unique de quartz sur la brique pleine des arcades sur l'édifice primitif pour confirmer son ancienneté, et ensuite une deuxième datation par OSL sur la brique pleine des arcades situées sur l'extrémité Est des murs de l'édifice dans sa forme actuelle. La lecture stratigraphique a mis la lumière sur la mosquée primitive et d'autres unités stratigraphiques des époques antérieures à la période islamique ( mur antique, mur en moellons ...ect ) ; elle a permis également de déterminer l'agrandissement de la salle de prière et d'autre unités stratigraphiques postérieures (petites constructions greffées sur les murs de la mosquée actuelle qui remonte à des périodes postérieures).

La datation OSL affiche un intervalle entre [48 à 72] H, comme intervalle logique et acceptable de la fabrication de la brique TCP02 et donc de la construction de la partie primitive de la mosquée sous la règne des Omeyyades. Elle affiche un intervalle [305-465] H sur la brique TCP01 comme intervalle de modification de cette mosquée (extension) et ce sous la règne des Hammadides.

L'étude des matériaux de construction tels que les pierres et les mortiers des unités stratigraphique par les méthodes scientifique analyse chimique par XRF, analyse par DRX analyse pétrographique sur lames minces, microscopie électronique à balayage, analyse chimique élémentaire et cartographie X des mortiers, a prouvé l'exactitude de notre étude stratigraphique et elle l'a confirmée car toutes les pierres et tous les mortiers de chaque unité stratigraphique étudiée sont différents les uns par rapport aux autres composés essentiellement de pierres calcaire de différentes stratifications géologiques, pour les mortiers sont principalement calcaires, avec une teneur variable en calcite en sable et des inclusions de terre. D'autres contiennent du charbon, tuileau ainsi qu'un mortier en plâtre.

Le constat d'état sur la conservation de la mosquée montre certaines lacunes notamment sur le traitement des remontées capillaires, le traitement biocide et plus dangereusement la stabilité de la structure ou nous recommandons le renforcement des piliers et colonnes par des tirants, surtout que la région Mila est considérée comme zone sismique de 2eme degré.

**Mots clé :** Mila, mosquée Sidi Ghanem, datation, matériaux de construction.

## المخلص:

يعتبر مسجد سيدي غانم أول مسجد في الجزائر، يعود تاريخ تأسيسه إلى القرن الأول من الهجرة وقد تم بناءه من خلال إعادة استخدام المواد العائدة إلى العصور السابقة. وقد شهد هذا المعلم التاريخي تغيرات كبيرة على مر تاريخه وهو في حالة من الحفاظ يرقى لها.

الهدف من هذا العمل هو القيام بعملية تأريخ لهذا المبنى أولاً، من خلال تأريخ نسبي يستند إلى قراءة طبقاتية تسمح بتقسيمه إلى عدة وحدات طبقاتية متعلقة بكل فترة والتي سوف تسمح لنا فيما بعد فهم مراحل البناء والعودة إلى البناء الأصلي. ثانياً هو القيام بالتحديد الزمني التام للمعالم المحفر ضوئياً على حبات الكوارتز الموجودة في الطوب المحروق الموجود في أقواس المبنى لتأكيد أصالته، ثم تحديد زمني ثاني بالمعالم المحفر ضوئياً على الطوب المحروق في الأقواس الموجودة على الطرف الشرقي من جدران المبنى في شكله الحالي.

وقد آقت القراءة الطبقاتية (الستراتيغرافية) الضوء على المسجد الأصلي والوحدات الطبقاتية الأخرى التي تعود إلى فترات ما قبل الإسلام (الجدار القديم، الجدار الطويي ...). كما ساعدت على تحديد زمن توسعة قاعة الصلاة وغيرها من الوحدات الطبقاتية اللاحقة (البنائات الصغيرة المطلعة على جدران المسجد الحالي التي يعود تاريخها إلى فترات لاحقة).

يظهر عملية التحديد الزمني بالمعالم المحفر ضوئياً فاصلاً يتراوح بين [48 إلى 72] هـ، يمثل فاصلاً منطقياً ومقبولاً لصناعة الطوب المحروق TCP02 وبالتالي بناء الجزء الأصلي من المسجد في عهد الأمويين. ويعرض فاصلاً يتراوح بين [305-465] هـ على الطوب المحروق TCP01 ويمثل فاصل التعديل الذي طرأ على هذا المسجد (التوسعة) والتي جرى في عهد الحماديين.

إن دراسة مواد البناء الحجر والملاط في الوحدات الطبقاتية من خلال الأساليب العلمية، التحليل الكيمائي بالأشعة السينية التحليل المعدني التحليل البتروغرافي على شفرات رقاقة، المجهز الإلكتروني الماسخ، التحليل الكيمائي المبدئي ورسم خرائط الأشعة السينية للملاط، تؤكد دقة دراستنا للطبقات وتؤديها، لأن جميع الحجارة والملاط الموجودين في كل وحدة طبقاتية يختلف بعضها عن البعض الآخر، الملاط هو أساساً جبيري ذو محتوى متغير من كالكسيت، الرمال، وخليط من الأتربة في حين تحتوي أخرى على الفحم، الملاط والطوب المحروق المسحوق والملاط الجص.

إن معاناة الحالة المتعلقة بالمحافظة على المسجد تظهر بعض أوجه التصور لا سيما في علاج انتشار الرطوبة، والمعالجة بالمبيدات الحيوية، والأخطر من ذلك استقرار هيكل المسجد الذي نوصي بتثبيت أعمده وسواريه بواسطة الساحيات، خاصة وأن منطقة ميلة تعتبر منطقة زلزالية من الدرجة الثانية.

**كلمات مفتاحية:** ميلة، مسجد سيدي غانم، تاريخ، مواد البناء.

## Abstract :

The Sidi Ghanem Mosque is considered the first mosque in Algeria. Its foundation dates back to the first century of the Hegira. Its construction was made by the reuse of materials from earlier eras. This monument has undergone significant changes throughout its history and now it is in a state of pitiful preservation.

The object of this work is to date this building: first, by a relative dating based on a stratigraphic reading that allows it to be broken down into several stratigraphic units relating to each period; which will allow us to understand the phases of construction and go back to the original building and secondly, is to make an absolute dating by single grain thermoluminescence of quartz on the full brick of the arcades on the original building to confirm its age, and then a second dating by OSL on the full brick of the arcades located on the eastern end of the walls of the building in its current form.

The stratigraphic reading has shed light on the primitive mosque and other stratigraphic units from the pre-Islamic periods (ancient wall, rubbed wall ... (ect); it also helped to determine the expansion of the prayer hall and other later stratigraphic units (small buildings grafted onto the walls of the present mosque that dates back to later periods).

The OSL dating shows an interval between [48to72] H, as a logical and acceptable interval of the manufacture of the TCP02 brick and thus of the construction of the primitive part of the mosque during the reign of the Umayyads. It displays an interval [305-465] H on the brick TCP01 as the interval of modification of this mosque (extension) and this under the reign of the Hammadids.

The study of materials such as stone and mortar of stratigraphic units by scientific methods, chemical analysis by XRF, DRX petrographic analysis on thin blades, scanning electron microscopy, elementary chemical analysis and X-ray mapping of mortars, proved the accuracy of our stratigraphic study and confirmed it because all the stones and mortars in each studied stratigraphic unit are different from each other essentially limestone compounds of different geological stratification, for mortars are mainly calcareous, with a variable content of sand calcite and earth inclusions. Others contain charcoal, tile and a plaster mortar.

The status statement on the preservation of the mosque shows certain shortcomings notably on the treatment of capillary lifts, biocide treatment and more dangerously the stability of the structure where we recommend the reinforcement of pillars and columns by draughts, especially since the region of Mila is considered a 2nd degree seismic zone.

**Keywords :** Mila, Sidi Ghanem Mosque, dating, building materials.