



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE DES MATERIAUX.



Mémoire de Magister

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER
EN SCIENCE DES MATERIAUX.

OPTION: Physique et Mécanique des Matériaux

Thème

***Caractérisation des mortiers archéologiques, le cas
des sites historiques de Djemila et de la Citadelle d'Alger.***

Présenté par

❖ BOUKHENOUF AREZKI

Président du jury

❖ Pr. S. SEBIH

USTHB

Membres du jury

❖ Dr. A. AYADI	MC	UMBB
❖ Dr. M. SAIDI	CC	UMBB
❖ Dr. A. HAMLAOUI	MC	Institut d'Archéologie - Université d'Alger.

Rapporteur

❖ Dr. M. HAMIANE MC UMBB

Mars 2006.

SOMMAIRE

- RESUME
- INTRODUCTION GENERALE
- **PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE**

CHAPITRE I : Contexte historique et étude monographique des sites

I-1. Présentation des sites	3
I.1.1 Site de Djemila	3
I.1.2 Site Citadelle d'Alger	6
I-3. Matériaux composant les sites	9
I-4. Techniques de construction des sites	10
I-5. Histoire de restauration des sites	14
I-6. Conclusion	15

CHAPITRE II : Approche générale sur les mortiers de construction

II.1. Aperçu historique	16
II.2. Définition du mortier	17
II.3. Types de mortiers	17
II.3.1. Mortiers hydrauliques	18
II.3.2. Mortiers aériens	20
II.4. Les constituants des mortiers	20
II.4.1. Les liants	20
II.4.2. Les agrégats	23
II.4.3. L'eau pour les mortiers	24
II.4.4. Les ajouts	24
II.4.5. Les pigments	26
II.5. Caractéristiques des mortiers	27
II.6. Emploi des mortiers	28
II.6.1. Les mortiers de maçonnerie ou d'hourdage	28
II.6.2. Les enduits	29
II.7. Durcissement du mortier de chaux	31
II.8. Compatibilité des matériaux de construction	31
II.9. Conclusion	32

CHAPITRE III : Etude des phénomènes de fatigue des mortiers de construction

III.1. Introduction	33
III.2. Comportement du mortier sous contrainte de déformation	33
III.3. Contraintes externes	39
III.3.1. Dilatation thermique	39
III.3.2. Expansion à l'humidité	39
III.3.3. Détérioration provenant de la préparation du mélange en constituants et la mise en œuvre des mortiers	39
III.3.4. Action des charges	40

III.4. Contraintes internes	41
III.4.1. Le gel/dégel	41
III.4.2. La cristallisation des sels solubles	42
III.5. Altérations chimiques	43
III.5.1. Action de l'eau de pluie	43
III.5.2. Efflorescence	43
III.5.3. Action des fumées	44
III.5.4. Dégradation provoquée par la corrosion des métaux	44
III.5.5. Cycle d'humidification -Assèchement (phénomène de condensation)	44
III.5.6. Attaque dans une atmosphère polluée	45
III.5.7. Climatologie de la pollution atmosphérique	46
III.6. Actions des agents biologiques	46
III.6.1. Les algues	46
III.6.2. Les lichens	47
III.6.3. Les plantes supérieures	47
III.7. Facteurs humains et catastrophes naturelles	47
III.7.1. L'homme	47
III.7.2. Vibration due au trafic et leurs effets sur les constructions	48
III.7.3. Les facteurs sismiques	48
III.8. Conclusion	49

• **PARTIE EXPERIMENTALE**

CHAPITRE I : Méthodologie d'essai et caractérisation des mortiers archéologiques

I.1. Présentation	50
I.2. Choix des échantillons	50
I.3. Description des méthodes d'essais	51
I.3.1. Analyse de la texture	51
I.3.1.1. Microscope électronique à balayage	51
I.3.2. Caractéristiques physico-chimiques	52
I.3.2.1. Essai à l'acide chlorhydrique	52
I.3.2.2. Essai au PH des solutions aqueuses des mortiers	53
I.3.2.3. Essai à l'acide sulfurique	53
I.3.2.4. Essai de la friabilité	53
I.3.2.5. Essai de l'abondance de la fraction inférieure à 50 µm	53
I.3.2.6. Essai de la combustion	53
I.3.2.7. Essai de la masse volumique	53
I.3.2.8. Essai de la masse spécifique	54
I.3.2.9. Essai de l'absorption d'eau	54
I.3.2.10. Essai de la porosité	54
I.3.2.11. Essai de l'humidité	54
I.3.2.12. L'analyse minéralogique	55
I.3.2.13. L'analyse chimique	55
I.3. Propriétés mécaniques	56
I.3.1. Résistance mécanique à la compression	56
I.3.2. Coefficient de ramollissement	56
I.4. Description de l'appareillage	57
I.4.1. Geopyc 1360	57
I.4.2. Pycnomètre Accupyc 1330	57

CHAPITRE II : Résultats d'essais et interprétations

II.1. Procédure de prélèvement	58
II.2. Description des échantillons	59
II.3. Chronologie des sites	60
II.4. Choix des échantillons après une sélection visuelle	61
II.5. Résultats des essais physico-chimiques	62
II.5.1. Résultats des essais à l'acide chlorhydrique (HCl)	62
II.5.2. Résultats des essais au PH des solutions aqueuses des mortiers	62
II.5.2.1. Identification des solutions obtenues	63
II.5.3. Résultats des essais à l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄)	63
II.5.4. Résultats des essais de la combustion	64
II.5.5. Résultats des essais de la friabilité	64
II.5.6. Résultats des essais de l'abondance de la fraction inférieure à 50 µm	65
II.6. Résultats de la caractérisation physiques	66
II.6.1. Résultats des essais de la masse volumique et la masse spécifique	66
II.6.2. Résultats des essais de l'absorption d'eau	67
II.6.3. Résultats des essais de la porosité	67
II.6.4. Résultats Accupyc 1330 et Geopyc 1360	67
II.6.5. Résultats des essais de la masse volumique des agrégats	68
II.7. Résultats du choix final des échantillons représentatifs	68
II.8. Résultats des essais mécaniques	68
II.9. Résultats de la caractérisation physico-chimiques	69
II.9.1. Résultats des essais à l'humidité	69
II.9.2. Résultats des analyses chimiques	70
II.9.3. Résultats des analyses minéralogiques	70
II.10. Résultats des analyses structurales (MEB)	73

CHAPITRE III : Application pratique des résultats de la caractérisation des mortiers.

III.1. Hypothèse des calculs statiques	76
VI.1.1. Masses volumiques des matériaux adaptés pour les calculs statiques	76
III.1.2. Poids des éléments de construction adaptés pour les calculs statiques	76
a. Structure d'un plancher en bois	76
b. Calcul du poids du mur entre les pièces AE – 005 et AE 001	78
c. Contrainte exercée au niveau du rez-de-chaussée provoquée par le poids propre de la structure	78
III.1.3. Conclusion	78
III.2. Proposition d'une composition de mortier de maçonnerie pour la restitution des murs	79
• INTERPRETATION GENERALE	80
• CONCLUSION GENERALE	84
• BIBLIOGRAPHIE GENERALE	
• ANNEXES	

العنوان

خصائص الملاط الأثري " في حالتي المواقع التاريخية لجميلة وقلعة الجزائر "

الشعبة : فيزياء وميكانيك المواد

ق. هـ. م / ك. ع. م. / جامعة أحمد بوقرة - بومرداس.

ملخص

إن الحفاظ على المعالم والنصب التاريخية ذو أهمية بالغة مما دفعنا إلى التطرق في دراستنا هذه إلى موقعين أثريين ينتميان إلى فترتين تاريخيتين مختلفتين، الأول يتعلق بموقع جميلة الذي يعود تاريخ بنائه إلى الفترة القديمة أما الثاني يتعلق بقلعة الجزائر التي يعود بنائها إلى القرون الوسطى. للوصول إلى الأهداف المسطرة في بحثنا والتي تظم : خصائص الملاط، البحث في التكنولوجيا القديمة للملاط وحالة حفظ الملاط الذي يكونُ جدران البناية. قمنا في أول الأمر بأخذ العينات من كل موقع ثم معالجتها مخبريا في الوهلة الثانية.

بعد التحليل المخبري للعينات و التعرف على الخصائص الفيزيوكيميائية، الميكانيكية والمجهريّة، تمكّنّا من الوصول إلى النتائج التالية : ملاط جميلة يتكون من : التربة الحية، الكلس، حصى من السيراميك بين طاه وغير طاه، الجير والفحم. هذه التركيبة مشكلة من المعادن : الكالسيت، الكوارتز، الروتيل، المسكوفت حيث تتراوح النفاذية من 16,237% إلى 23.668%، تقدر الكتلة الحجمية ب 1.384 غ/سم³ للملاط البنائي و 1.879 غ/سم³ للملاط التلبيسي ومقاومة ميكانيكية للضغط جاف ب 1.440 MPa و 0.430 MPa مشبعة بالماء. الوجه الهيكلي للعينات يبيّن حبيبات من الكالكار تملأ مسامات هذه الأخيرة. أما ملاط قلعة الجزائر تتكون من : التربة الحية، الكلس، حصى من السيراميك الطاهى، الجير، العظام، الفحم وفحم العظام. هذه الملاط مشكلة من المعادن : الكالسيت، الكوارتز، الروتيل، المسكوفت، الجص الممية، الكاوكسيت، اللافويليت والفلوقيسيت، حيث تتراوح النفاذية من 4.235 إلى 12.242%، تقدر الكتلة الحجمية ب 1.211 غ/سم³ للملاط البنائي وبمعدل 2 غ/سم³ للملاط التلبيسي ومقاومة ميكانيكية للضغط جاف ب 3.007 MPa و 1.634 MPa مشبعة بالماء. الوجه الهيكلي للعينات يبيّن حبيبات من الكالكار تملأ مسامات هذه الأخيرة. هذا أدى إلى إنتقال تكنولوجيا بين المرحلة الرمانية و المرحلة العثمانية مع تحسن في الكتلة الحجمية للحصى من 2,666 إلى 1,333 غ/سم³ ومقاومة ميكانيكية للملاط على مدى هذه الفترتين. فيما يخص تأثير الوسط على الجدران، عرضت العينات لتأثير الرطوبة بنسبة تعادل 96%، مما بيّن بعد 8640 دقيقة من العملية، إمتصاص الماء أكثر للعينات المأخوذة على مستوى مصنع البارود مقارنة إلى باقي العينات المأخوذة من جميلة و قلعة الجزائر. كما قمنا أيضا بتقدير حالة حفظ الواجهة الشرقية لقصر الداي والمقدرة بحوالي 81%.

في النهاية، نتيجة هذه المميزات سمحت لنا بالتأكد من كرونولوجية بناء قلعة الجزائر والتي إندرجت عبر ثلاث مراحل أساسية : 1516 - 1590، 1590 - 1817 و 1817-1830.

الكلمات المفتاحية

جميلة، قلعة الجزائر، العينات الممثلة، الخصائص الفيزيوكيميائية والميكانيكية، السطحية، الحفظ.

TITRE :**CARACTERISATION DES MORTIERS ARCHEOLOGIQUES DES SITES HISTORIQUES, LE CAS DE DJEMILA ET LA CITADELLE D'ALGER.****Option :** Physique et Mécanique des matériaux.

Dpt. GM. / F.S.I. / Université M'hamed Bougara Boumerdes.

Résumé

La préservation des sites et monuments historiques est d'une importance majeure, ce qui nous a mené à mettre en exergue l'étude de deux sites archéologiques appartenant à deux périodes historiques différentes, le premier est celui de Djemila qui remonte à la période antique et le second est celui de la Citadelle d'Alger qui remonte à la période médiévale. Pour atteindre nos objectifs de recherche à savoir : caractérisation des mortiers, recherche dans la technologie ancienne des mortiers et l'état de préservation des mortiers composant les structures des murs; nous avons procédé dans une première étape au prélèvement des échantillons dans chaque site, et à leurs expérimentations dans une seconde étape.

L'analyse des échantillons représentatifs et la connaissance des caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et structurales ont révélé les résultats suivants : les mortiers de Djemila sont constitués de la terre active, de la chaux, des agrégats céramiques crus ou cuits et de la cendre de bois. Ce mélange est composé des minéraux; de calcite, de quartz, de rutile et de moscovite avec une porosité allant de 16.237% à 23.668 %, une masse volumique de 1.384g/cm³ pour les mortiers de maçonnerie et de 1.879 pour les enduits de recouvrement et une résistance mécanique à la compression à sec est de 1.440 MPa et de 0.430 MPa saturée d'eau. L'aspect structural de ces échantillons montre des fins calcaires remplissant les pores de ces derniers. Quant aux mortiers de la Citadelle d'Alger sont constitués selon leur position sur site de la terre active, des agrégats céramiques, de la chaux, des os, de la cendre de bois et le noir animal. Ces mélanges sont composés des minéraux; de calcite, de quartz, de rutile, de moscovite, de l'apophyllite, de caoxite, de plâtre hydraté et de la phlogopite avec une porosité ouverte allant de 4.235 – 12.242 %, de masse volumique de 1.211 g/cm³ pour les enduits de recouvrement et environ de 2 g/cm³ pour les mortiers de maçonnerie, une résistance mécanique à la compression à sec est de 3.007 MPa et 1.634 MPa saturée d'eau et une structure montrant la répartition des agrégats céramiques ainsi que des fins calcaires remplissant les pores des échantillons. Ce-ci a mené à une déduction de transfert technologique entre la période Romaine et Ottomane, avec une amélioration de la masse volumique des agrégats de 2.666 à 1.333 g/cm³ et leurs résistances mécaniques le long de ces périodes. Quant à l'influence du milieu sur les parements des murs, les échantillons ont subi l'influence de l'humidité (96%), ce qui a montré après 8640 minutes d'action, une absorption d'eau plus importante pour le cas des mortiers prélevés au niveau de la poudrière par rapport aux mortiers de l'ensemble architecturale de la Citadelle d'Alger et ceux de Djemila. L'état de préservation de la façade Est du palais de Dey est évalué à environ 81%.

Enfin, le résultat de cette caractérisation nous a permis de confirmer la chronologie de construction de la Citadelle d'Alger assignée par les historiens et qui s'étale sur trois périodes distinctes : 1516 - 1590, 1590 – 1817 et 1817 - 1830.

Mots clés

Djemila, Citadelle d'Alger, échantillon représentatif, caractéristiques structurales, physico-chimiques et mécaniques, préservation.

TITLE :**CHARACTERIZATION OF THE ARCHEOLOGICAL MORTARS
HISTORIC SITES, THE CASE OF DJEMILA AND THE CITADEL OF ALGIERS.**

Option : Physics and Mechanics of Materials.
Dpt. GM /F.S.I./ University of Boumerdes.

Summary

The preservation of the sites and historic buildings has a major importance, which carried out us to put forward the study of two archeological sites belonging to two different periods, the first is that the Djemila site which goes back to the Roman period and the second one the Citadel site of Algiers which goes back to the Ottoman period. To achieve our research goals which are : characterization of mortars, review of old technology of the mortars and the state of preservation of mortars in walls structures this was; we carried out in a first stage the test sample selection in each site, and their experiments in one second stage.

Analysis of samples and knowledge of the physicochemical, mechanical and structural characteristics revealed the following results: the mortars of Djemila are consisted the active ground, the lime, the wood ash and the ceramic aggregates raw or cooked. This mixture is composed of minerals; the calcite, the quartz, the rutyl and Muscovite with a porosity going from 16.237% to 23.668 %, a density of 1.384 g/cm³ for the mortars of masonry and 1.879 for the coatings of covering and a mechanical resistance to the dry compression of 1.440 MPa and 0.430 MPa saturated with water. The aspect structural of these samples shows fine limes tones filling the pores with the latter.

As for the mortars of Citadel of Algiers are composed the active ground, of the ceramic aggregates, lime, the bones, the ash of wood and the ivory black. These mixtures are composed of minerals; the calcite, quartz, the rutyl, the Muscovite, the apophyllite, the caoxite, the hydrated plaster and phlogopite with an open porosity going from 4.235 - 12.242 %, the density of 1.211 g/cm³ for the coatings of covering and approximately of 2 g/cm³ for the mortars of masonry, a mechanical resistance to the dry compression of 3.007 MPa and 1.634 MPa are saturated with water and a structure showing the distribution of the ceramic aggregates as well as fine limes tones filling the pores of the samples. This led to a deduction of technology transfer between the Romaine period and Ottoman, with an improvement of the density of the aggregates from 2.666 to 1.333 g/cm³ and their mechanical resistances along these periods. As for the influence of the medium on the facings of the walls, the samples were subject to the influence of moisture with 96%, which showed after 8640 minutes of action, an absorption of more significant water for the case of the mortars taken on the level of the powder mill architectural compared to the mortars of the Citadel of Algiers and those of Djemila. We also, evaluated the state of the east side of the Dey palace frontage that is preserved to around 81 %.

Lastly, the result of this characterization enabled us to confirm the historical stages of the Citadel of Algiers, which are spread out over three distinct periods : 1516 - 1590, 1590 – 1817 and 1817 - 1830.

Key words

Djemila, Citadel of Algiers, representative sample, characteristic structural, physicochemical and mechanical, preservation.



INTRODUCTION GENERALE

- **INTRODUCTION GENERALE**

" Croyez ceux qui cherchent la vérité, doutez de ceux qui la trouvent. "
André Gide (1869 – 1951)

L'Algérie à travers ses 1200Km de côte, possède un patrimoine culturel exceptionnel par sa qualité, sa diversité, son abondance et l'étendue chronologique qu'il recouvre. Ce patrimoine peut être classé en plusieurs périodes chronologiques : préhistorique, antique, médiévale et contemporain.

Les sites et monuments historiques sont un assemblage de plusieurs matériaux, liés par des mortiers, qui ont donné à l'humanité tout entière les plus beaux monuments et de splendides maçonneries. Ces mortiers de construction par leurs diverses caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et aspects physiques qui nous renseignent sur l'évolution de leurs technologies et les secrets de leurs durabilités d'une part, d'autre part, il pourra servir comme une référence à la restitution des structures architecturales disparues ou manquantes lors des opérations de restitution et de la restauration du patrimoine.

Ce potentiel culturel irremplaçable se dégrade et souffre de divers phénomènes de fatigue, d'où notre inquiétude de plus en plus grande face à cette déperdition et la disparition des sites et monuments historiques dans les différentes régions de notre vaste pays.

L'ensemble de ces facteurs sont considérés comme un stimulant principal, pour ce qui nous concerne pour choisir et arrêter ce thème d'étude consacré à « *la Caractérisation des mortiers archéologiques, le cas des sites historiques de Djemila et de la Citadelle d'Alger* ». Notre modeste réflexion et contribution s'inscrivent dans ce vaste domaine qui vise à étudier les points suivants :

- caractérisation des mortiers
- connaissance dans la technologie ancienne des mortiers
- l'état de préservation des mortiers composant les structures des murs.

Quant au choix des deux sites, il est dicté par leurs valeurs historiques, architecturales qui ont prévalu dans leur classement sur la liste du patrimoine national et universel. La Citadelle d'Alger est inscrite dans le programme du ministère de la culture pour sa conservation et sa restauration en collaboration avec trois pays étrangers d'une part, d'autre part, le site de Djemila est retenu comme référence d'étude à la restitution des matériaux et des techniques de construction.

Notre présente recherche s'articule au tour de deux parties :

La partie bibliographique a été consacrée au contexte historique et étude monographique des sites, les généralités sur les mortiers de construction et à l'étude des phénomènes de fatigue des mortiers de construction.

La partie expérimentale a été consacrée à la caractérisation des mortiers archéologiques, aux résultats expérimentaux et leurs interprétations, un exemple pratique de détermination de l'état de préservation de la façade Est du palais du Dey et proposition d'une composition du mortier pour la restauration des façades des murs, Citadelle d'Alger.



PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

CONTEXTE HISTORIQUE ET ETUDE MONOGRAPHIQUE DES SITES

I-1. Présentation des sites

Depuis l'antiquité, l'Algérie a été le carrefour des civilisations humaines, considérées comme le pôle d'invasion et de pillages, plusieurs civilisations ont laissé des traces durables sous forme de sites et monuments historiques qui témoignent de leur passage.

Dans ce contexte, notre recherche s'articule autour de deux sites historiques de périodes différentes, le premier est celui de Djemila qui remonte à la période antique perçu comme étant le pôle économique de cette époque, le second est celui de la Citadelle d'Alger qui remonte à la période médiévale qui représente le centre du pouvoir de l'état avant 1830 (Fig. n° 001). Ces sites sont d'une valeur historique particulière par la richesse de leurs matériaux, de leurs diversités techniques et de leur architecture.

Les mortiers de construction de ces sites feront l'objet d'étude et de confirmation des différentes étapes de construction indiquées dans ce chapitre. Ils sont utilisés avec d'autres matériaux formant un assemblage rigide et avec l'emploi des techniques de construction rendant les sites résistants aux différentes contraintes qui provoquent leur fatigue. Ainsi, cette phase d'étude nous mènera vers un bon choix des échantillons représentatifs qui feront l'objet d'analyse et de caractérisation.



Fig. n° 001 : Localisation des sites sur la carte géographique d'Algérie.

I-1.1. Djemila (CUICUL)

La ville antique, Djemila est située à 48 Km du Nord-est de la wilaya de Setif. L'origine de ce nom est arabe qui signifie la belle. Chez les romains, c'était Cuicul, nom berbère qui désigne sans doute l'origine du premier établissement humain en ce lieu. C'est un site antique exceptionnel en Algérie, tant par la beauté, la valeur historique et scientifique des vestiges (Fig. n° 002).

Fondée par l'empereur Nerva, elle fut, à la fin du I^{er} s, une colonie militaire, sur un éperon rocheux entre les Oueds Guergour et Betame¹. Elle connaît son apogée au II^{ème} s.

Elle est enfermée dans une petite enceinte de forme grossièrement polygonale (environ un kilomètre de longueur)². Les principaux monuments de cette époque sont : le temple, le Forum, le marché, les grands thermes du Sud, le Cardo Sud, etc. (annexe A, Fig. n° 1).



Fig. n° 002 : Photo montrant la rue qui mène au théâtre et temple des sévères (Djemila).

A partir du III^{ème} s, apparaisse un nouveau quartier qui se développe largement au Sud de la place sévérienne, mais sans aucun plan d'urbanisme³.

Les colons vivaient de l'agriculture et de l'élevage, favorisés par un sol assez fertile, des sources abondantes, un climat salubre. Ces ressources attirèrent à Cuicul des riches bourgeois venus de Cirta, de Carthage et d'autres villes, qui occupèrent des terres aux environs suivis par l'arrivée d'autres immigrations.

Elle a fait l'objet de plusieurs chantiers de fouille à l'époque française et après l'indépendance, mais il reste au moins un quart de la ville encore sous terre. Ce qui représente un champ de recherche assez vaste pour que ce génie du passé, nous augurons de l'avenir.

Ce site hérité du passé riche est doublement classé sur la liste du patrimoine national et universel par UNESCO en 1982. Il est devenu ces dernières années un endroit touristique agréable, vérifié par le nombre important de visiteurs enregistrés par la direction du musée.

I-1.1.1. Les principaux monuments composant le site

Ce site qui se trouve aujourd'hui en ruine mérite d'être mis en valeur en rapport à la richesse scientifique qu'il renferme. Dans le souci de faire la lumière sur les différents monuments constituant le site de Djemila, nous avons établi un état descriptif de ses composants qui se résume ainsi :

a. La basilique du Nord

Cette basilique est construite vers la fin du IV^{ème} s. Son emplacement lui permet de dominer toute la ville de Cuicul. Elle présente le plan classique d'une basilique à trois nefs, au milieu l'autel, le chœur et au fond la crypte.

Les deux cryptes sont communicantes entre elles par une galerie souterraine ce qui nous amène à penser à une même période.

1- C. ALZONNE , « l'Algérie ». éd : Fernand NATHAN, Paris VI 1938, P5.

2- A. PELLETIER, « L'urbanisme romain sous l'empire ». éd : PICARD, Paris VI 1982, P 40.

3- Idem, A. PELLETIER, p 40.

b. La basilique de CRESCONIUS

Cette basilique peut être datée du début du V^{ème} s. Elle est orientée de l'Est à l'Ouest. Elle se compose de cinq nefs, la centrale est plus large que les autres, elle mesure 40m sur 28m.

L'entrée principale donnant sur la nef centrale et l'emplacement du chœur est bien visible en avant de l'abside qui a disparu en élévation. Dans ce chœur était placée l'inscription de l'évêque CRESCONIUS qu'on retrouve au niveau du musée.

c. Le Baptistère

Il est construit en même temps que la basilique primitive, c'est-à-dire vers la moitié du IV^{ème} s. C'est un édifice circulaire aux murs très épais. Il est fait d'un couloir annulaire dans ces deux côtés des petites niches semi-circulaires recouvertes de stucs dont les traces subsistent aujourd'hui.

d. Le Théâtre

Il date de la première moitié du II^{ème} s, d'après une inscription évoquant les « LUDI », "scéniques". Il pouvait contenir 3 000 spectateurs environ. Il est adossé à une pente de terrain permettant d'asseoir les gradins. Le mur circulaire a été refait, la scène se passait dans le demi-cercle avant et sur le plancher. Deux galeries de chaque côté qui permettent aux artistes d'entrer derrière pour se préparer.

e. La basilique judiciaire civile

Cette basilique est construite vers la fin du IV^{ème} s, à la place d'un sanctuaire de Saturne Frigifer, dieu de la végétation et de la fertilité de l'Afrique romaine, époque caractérisée par la destruction des symboles du paganisme.

f. Le temple Septimien

Ce temple est construit vers le début du III^{ème} s. Il est situé à l'angle Sud-est du nouveau forum. Une inscription trouvée lors des fouilles de 1912, indique que le temple avait été dédié en l'an 229 ap. J.C à la Gens Septimia par la république Cuiculitaine.

g. La prison

Cette prison est construite vers le II^{ème} s. Elle est située au Nord de la basilique, un escalier de 15 marches descend au forum vers la grande rue « cardo maximus ».

h. La maison d'Amphitrite

Cette maison est construite vers le II^{ème} s. Elle se situe à l'Est du forum. L'entrée unique était au Nord sur la petite décamine, à gauche de la porte d'entrée des latrines avec huit trous de chute.

i. La maison d'Europe

Cette maison est construite vers le II^{ème} s. Cette demeure au plan complexe semble être le résultat d'une réunion de deux habitations faisant partie des édifices de la cité primitive.

j. Marché de Cosinus

Il est construit au II^{ème} s de notre ère. Ce marché servait jusqu'à la destruction de la ville, quoique la table des mesures, fût retrouvée au quartier chrétien.

k. Arc de Caracalla

Cet arc est construit en 216 ap. J.c par la communauté de Cuicul. Il est situé à l'Ouest du nouveau forum, au sommet de la pente.

I. Les grands thermes

Ces thermes étaient construits en 183 ap. J.c, sous l'empereur Commode en dehors du rempart primitif à l'extrémité du Cardo Sud. Il se trouve à 100m au Sud du nouveau forum et à la même distance au Nord-ouest de la basilique chrétienne. L'entrée principale sur le côté Ouest du cardo-maximus Sud.

I-1.2. Citadelle d'Alger

L'histoire de la ville d'Alger remonte à très loin. Elle a été une terre d'attraction et de combat de races diverses venues de l'Est, de l'Ouest, du Nord ou du Sud.

Dès leur arrivée, les romains lui donnèrent le nom « ICOSIUM », par la suite elle fut nommée El Djazair, une ville fondée par Bologhine Ben Ziri Ben Mennad. Après des conquêtes espagnoles, Salim Etoumi, gouverneur d'Alger, fait appel aux fameux corsaires turcs Barbarousse Aroudj et Kheireddine. Par la suite El Djazair eut la réputation d'être invincible durant trois siècles de domination turque⁴.

La Citadelle d'Alger est située à une altitude de 118m par rapport au niveau de la mer. Elle couronne la ville d'El Djazair du côté Sud-Ouest. Elle est prise dans un angle formé par deux remparts qui descendaient de la médina jusqu'à la mer⁵.

L'histoire de la construction de la citadelle correspond à des années précises; fut commencée en 1516 par Aroudj pour être achevée, d'après une inscription qui était placée au-dessus de la porte d'entrée, en 1590 par Kheireddine pacha⁶. Elle a été probablement composée de sept batteries et une poudrière !

D'après l'expertise de PKZ⁷, le tremblement de terre de 1716, qui a secoué la région d'Alger, n'a pas provoqué des dégâts visibles. Ces conséquences n'avaient pas d'effets remarquables sur les éléments porteurs, néanmoins il a été procédé à son confortement par la réalisation de murs pour soutenir et apporter un appui à ces éléments porteurs en particulier les arcs et les colonnes.

En 1817, l'avant dernier dey Ali Khodja décida d'en faire sa résidence et le siège de la régence. Ceci a eu lieu quand le Dey Ali Khodja a décidé en 1816 par peur des émeutes de quitter le palais de Jenina pour s'installer au sein de la Citadelle⁸. Une année plus tard, son successeur, le Dey Hussein, à la tête de la régence a procédé à des aménagements de nouvelles structures, en rapport avec son nouveau rôle : de siège de l'administration, de la justice et des finances.

Cet ensemble comprenait : le palais du Dey et ses dépendances, les bains des Agha, le palais des Beys et ses dépendances, la poudrière, les deux mosquées, un réseau de distribution d'eau, des casemates et de cinq batteries de canons (annexe A, Fig. n° 2).

4- Idem. T. ALZIEW, P 8.

5- Ministère de l'urbanisme et de l'habitat. ETAU. UNESCO/DWD atelier Casbah. Projet de revalorisation de la Casbah d'Alger 1979. P15 – 16.

6- N. GAID, « l'Algérie sous les Turcs » éd. Mimouni, Alger 1991. P 236.

7- PKZ, « Etude de mise en œuvre de la Citadelle d'Alger » Contrat signé par le ministère de la culture sous référence n° : 64 du 23. 01. 1979, Varsovie 1980. p 5.

8- G. MARCAIS, « l'architecture musulmane d'occident », Paris 1952. P 438.

L'année 1830, est marquée par la prise d'Alger et par la suite la transformation de la Citadelle en caserne qui abrite les généraux de l'armée française, comme le général DE BOURMONT qui s'installe dans les appartements du Dey jusqu'à l'an 1840 année, où certains de ces secteurs ont été transformés en hôpital militaire⁹.

Elle est classée monument historique dès 1887. L'une de ces parties fut aménagée en un musée de guerre entre 1930 – 1962, il s'agit du palais du Dey et de la poudrière.

En 1962, tout ce que contenait ce musée fut pris par la France, et ces lieux furent habités par quelque 173 familles pendant quatorze ans environ. Vu son importance historique, politique, sociale et architecturale, le ministère de la communication et de la culture décida de faire de cette citadelle un complexe touristique, en aménageant les différents secteurs en : un musée, salles d'exposition, bibliothèque, etc.

En 1979, le fameux atelier de restauration polonais, PKZ a pris en charge l'expertise des travaux de restauration de la Citadelle en collaboration avec l'atelier algérien.

Depuis 1992, elle est classée sur la liste du patrimoine universel avec l'ensemble de la Casbah. De cette date à nos jours, la Citadelle fait l'objet de travaux de conservation et de restauration, certains de ses secteurs sont achevés tel que : le quartier des janissaires, la mosquée des janissaires, le palais de repos des femmes et d'autres sont en cours, (Fig. n° 003).



Fig. n° 003 : Vue générale sur le site Citadelle d'Alger.

I-1.2.1. Bâtiments de la Citadelle d'Alger

a. Le palais de Dey

Le palais du Dey est situé dans l'angle Nord-est de la Citadelle, il constitue le bâtiment le plus important de cet ensemble architectural par son volume et sa surface. Il est composé de quatre ailes : Est, Sud, Ouest et Nord entourant la grande cour intérieure. Les ailes Nord sont composées de quatre niveaux et les ailes Sud et Ouest comportent trois niveaux. Sous le sol de la grande cour se trouve une citerne voûtée à deux travées pour le stockage des eaux pluviales et au coin de cet espace formé par les ailes Est et Sud, il est aménagé en petit jardin dont on trouve un arbre citronnier qui dépasse la hauteur du palais. Ce bâtiment est adjacent aux remparts, il a subi par la suite au moins trois extensions¹⁰.

La première extension remonte à la seconde moitié du XVI^{ème} s où on assiste au rajout du premier étage à la galerie de l'aile est et l'élargissement du rez-de-chaussée de l'aile Sud et son extension verticale par la construction du premier étage.

9- H. KHEIN, Feuillet d'El Djair, « le vieil Alger et sa banlieue ». Archive du ministère de la guerre 1912. Tome III. P19.

10- Idem. PKZ , P 68.

La résidence des femmes du Dey ou le harem a été construit par la suite à l'aile Nord, son rez-de-chaussée a été élargi, pour y aménager la salle d'audience du Dey. Il a été procédé au rajout de l'appartement du Dey à l'aile Est ainsi qu'un kiosque, la terrasse de passage à l'aile Sud et la cuisine à l'aile Ouest.

Ce qui marque l'état du bâti réalisé, c'est le logis peu confortable, Il n'y a plus de grandes cours ombragées, bordées d'arcades ogivales, de la Djenina, ni les belles décorations de faïences, ni les jolies fenêtres à verres de couleurs. La Casbah a conservé son aspect de forteresse et de caserne, car deux mille soldats algériens y logent, pour veiller à la sécurité du Dey¹¹.

Il est à signaler qu'au niveau de la salle de Diwan, s'est produit le coup de l'éventail, c'est le contexte d'envahissement de la France en algérie. A noter que durant la période d'occupation, le gabarit général du bâtiment n'a pas subi de changement.

b. Le palais des Beys

Le palais des Beys se situe dans l'angle Sud-est de la Citadelle, il constitue le deuxième bâtiment le plus important de l'ensemble architectural, par son volume et sa surface. Ce palais a été réservé aux Beys de Constantine, d'Oran et de Media qui venaient tous les trois ans pour apporter au Dey les dnouches (tributs redevables au beylik par les trois provinces).

Il se compose d'un corps principal qui forme à l'origine un rectangle, constitué de quatre étages et des dépendances plus basses à un ou deux niveaux du côté Sud.

Dans son histoire le palais des Beys a subi de nombreuses extensions et transformations; à sa construction en s'est servi des murailles existantes, plus anciennes de la Citadelle¹².

c. La nouvelle mosquée

La Citadelle est composée en plus de ces bâtiments, de deux mosquées, la première datée de 1818, année même de l'avènement de Hussein Dey, durant l'époque française fut transformée en église Sainte-Croix¹³. La deuxième mosquée, plus grande que la première et postérieure à celle-ci d'une année, est située non loin de la précédente, et de la porte d'entrée de la Citadelle. Son plan est très simple par rapport aux grandes mosquées de l'époque. Elle est composée d'un oratoire pourvu de galeries sur chaque côté et qui supporte une coupole octogonale, qui repose sur des arcs brisés en arrière, les coupôlètes se placent sur les galeries, trois sur le côté de la qibla et deux autres dans les chaînes d'angles des autres murs à l'opposé¹⁴. Elle fait partie de nos objectifs tracés.

Le minaret, qui fait saillie à l'angle Sud-est, et une tour octogonale de 16,93m de hauteur et dont les faces sont défoncées de deux étages d'arcatures plaquées de carreaux de faïence. Un lanternon octogonal couronné d'une coupôlette s'élève de la plate forme supérieure de la tour¹⁵.

d. La poudrière

C'est un bâtiment de forme polygonal ventrée, dont la construction remonte au XVI^{ème} s, elle est placée au milieu de l'ensemble de la Citadelle. Cette importante bâtisse composée d'un seul

11- Idem, C. ALZONNE. P 87.

12- Opcit, PKZ. P 68.

13- Opcit, G. MARCAIS, P 431.

14- A. KHELLASSI, « Casbah d'Alger, Citadelle et palais du dey ». Thèse de doctorat 3^{ème} cycle. Alger 1985.

15 Opcit, PKZ. P 82.

niveau reste comme l'unique spécimen architectural de ce genre en Afrique du Nord. C'est alors un donjon, entouré dans sa partie basse par des salles voûtées.

Après son explosion en 1616, les murs de la poudrière sont élargis environ 80 à 90cm, par l'adjonction d'un mur neuf, directement au mur extérieur¹⁶. Elle a été renforcée à l'intérieure par six piliers. Parmi les modifications apportées durant l'époque française, la percée de grande fenêtre afin d'adapter le lieu au musée, dit musée colonial de l'armée française et cela à partir de 1930.

e. Les casemates

Les casemates ont été créées au XVI^{ème} s. par l'adjonction aux murailles existantes des pièces ventrées sur les deux niveaux.

Au cours des étapes suivantes de l'extension, on a mis en place une galerie à un niveau, le long de la façade intérieure, avec une structure de planchers en bois, appuyées sur les arcs en briques et sur les colonnes en tuf¹⁷.

f. Les remparts

Les remparts sont construits avec les mêmes techniques anciennes. Ils ont été faits très épais, avec le remplissage par des couches d'argile ou de terre mélangée avec de la chaux. Ce remplissage jouait le rôle de l'amortissement des chocs des obus de canon.

Ces remparts de 8,50 m minimum de hauteur du bastion 2 et 17 m maximum du bastion 5. Ils ont été construits avec des faces extérieures inclinées, très épais, couronnés par des créneaux et munis des meurtrières¹⁸.

I-2. Matériaux composant les sites

Les matériaux ne déterminent pas la forme de la bâtisse : ils permettent seulement l'utilisation de telle ou telle technique et la combinaison d'éléments architectoniques originaux¹⁹. Ces bâtisses constituées des structures qui composent de panneaux; en briques et en pierres hourdées avec du mortier à base d'un mélange aux moins de deux liants, chaux-argile ou chaux- plâtre. Le toit de ces bâtisses est constitué d'agrégat, de la terre, de plancher soutenu par des rondins. Quant aux conduites de canalisation en terre cuite noyées dans les murs des structures, assurent l'évacuation des eaux pluviales.

Ces sites sont ornés par des éléments décoratifs, le site de Djemila a été décoré de belle mosaïque qui se trouve actuellement exposée au niveau du musée. Par contre, la Citadelle d'Alger est riche en décors céramiques (carreaux faïence de diverses provenances, des tuiles vernissées), les claustras et les fresques, etc. Ces matériaux architecturaux et architectoniques sont liés ou fixés au moyen des mortiers de construction.

I-2.1. Djemila

A travers nos constatations, le site de Djemila n'est pas riche en type de mortier ce qui rend la tâche de distinction des phases de construction difficile avec cet élément de construction !

16- Idem, PKZ. P 14.

17- Op.cit. PKZ. P 14.

18- Idem, A. PELLETIER, p 35.

19- C. et P. DONNADIEU & H. et J.-M. DIDILLON « Habiter le désert, les maisons mozabites : Recherche sur un type d'architecture traditionnelle pré-saharienne », éd. Pierre Mardaga, 3^{ème} édition. Bruxelles 1986. P87.

Par voie de conséquence, et compte tenu de l'abondance de la pierre calcaire dans la région, il est déduit l'utilisation des mêmes gisements durant la période romaine. Ce mortier de chaux est mêlé d'une argile marneuse mélangée probablement avec une proportion du plâtre, ce qui peut réduire leur résistance au climat humide.

Sur certains fragments de murs, on trouve des restes du mortier de pose de la mosaïque, des panneaux témoignent sont conservés au niveau du musée, ce mortier est très résistant par rapport aux premiers. Il se compose de chaux et de la brique pilée qui ont subi une cuisson ensemble avant leur usage. On constate également, un autre mortier à base de chaux et d'agréats de rivière utilisés pour la réfection des parties endommagées qui a été employé durant la période d'occupation française.

Cependant, ces mortiers ont une double fonction, la première est celle qui assure la cohésion entre les éléments de pierre et de brique de différente forme et la seconde consiste dans la protection de ces éléments. On constate aussi que les colonnes en marbres et en tuf sont scellées au moyen de ces mortiers.

I-2.2. Citadelle d'Alger

Par son statut de fort terrasse, la Citadelle d'Alger a été créée au début de XVI^{ème} s, construite selon des étapes et périodes différentes qu'on peut distinguer à travers l'étude des mortiers qui la composent.

L'ancien mortier de chaux se caractérise par sa couleur rosâtre et une partie assez importante de gravillons fins de pierre mica et de brique. Il était également utilisé pour la pose des carreaux de revêtement de sol dans les planchers, et enfin comme revêtement de terrasses.

Le mortier de couleur blanche est à base de chaux et éventuellement avec le rajout de plâtre, a servi à l'exécution des enduits intérieurs et extérieurs. Les vieux enduits de façades, les mieux conservés sont très minces, ils ont une épaisseur de 4 à 8mm.

Ainsi, on constate plusieurs sortes de mortiers de chaux et de ciment employé pour les réparations des fragments de murs de façades des bâtiments et des remparts. Ces types de mortiers ont une résistance plus grande que les anciens, ce procédé n'est pas assez utilisé dans la réparation des structures mais il a été réservé aux travaux de réfection et de réparation.

Ils sont utilisés pour lier les briques et les pierres qui sont posées sur des tronçons en thuya qui assurent une meilleure répartition des charges. Comme ils étaient utilisés pour sceller les différents carreaux de revêtement de sol et revêtements muraux qui provienne d'Italie, de la Hollande et de la Tunisie, à noter qu'il a été opté pour ce type de mortier pour la pose de la tuile et des conduites de canalisation d'eau pour une meilleure étanchéité et adhésion.

I-3. Techniques de construction des sites

Depuis l'antiquité l'homme cherche à améliorer les techniques de construction qui lui assurent un habitat durable. Il a commencé à utiliser la pierre puis le bois comme support du toit en passant par des murs en pierre et brique porteurs jusqu'à nos jours où il utilise l'armature et des matériaux plus rigide afin de réussir à construire des ouvrages qui résistent aux différentes pathologies qui menacent leurs disparition.

A travers notre constat et en référence aux bibliographies, l'invention et l'amélioration des techniques de construction effectuées par l'homme durant l'époque antique, est sans doute, présente un passé très riche en la matière, cette thèse est vérifiée par les nombreux sites et monuments restants à ce jour qui témoignent de cette époque sur leur stabilité et durabilité à savoir : Timghad, Tizirt, Tipaza, etc.

Jusqu'au début du moyen âge, on assiste pratiquement aux mêmes techniques de construction antique qui demeurent de référence de travail dans la matière. Un nouveau matériau est émergé et introduit dans le procédé anti-séismique pour palier à toute éventualité de secousse ou tremblement de terre qui s'avère comme élément de structure important dans la répartition des charges. Ce début du moyen âge a apporté une rupture avec l'ancien procédé qui se basait sur le savoir empirique remplacé par le savoir-faire où on a assisté à l'émergence de nouvelles techniques et par conséquent une nouvelle ère s'ouvre dans ce domaine.

I-3.1. Site de Djemila

Cuicul a connu plusieurs périodes dans sa construction. Son itinéraire est riche en matière de technique de construction. Le choix du site est fondé sur une stratégie militaire pour faire face aux éventuelles attaques de l'ennemi, puis on assiste à une stabilité de la colonie qui a permis le passage à la construction et au développement (c'est la période du temple et des maisons). Cette période a été suivie par la colonisation byzantine dans laquelle ils avaient procédé à la restitution du site, mais avec des matériaux romains et d'une façon désordonnée et grossière.

D'après PELLETIER²⁰ les villes romaines sont fondées sur trois constantes variées. Il n'y a rien qui rappelle les trois constantes des créations puniques : une plage pour tirer les bateaux, une colline refuge, un point d'eau douce.

A Djemila, on trouve uniquement les deux dernières constantes, quant à la troisième est remplacée par l'agriculture et l'élevage favorisé par un sol assez fertile. Le site de cette colonie est construit selon les techniques de construction qui se résument dans ce qui suit :

I-3.1.1. Opus quadratum

Cette technique apparaît à la fin du VII^{ème} s. av. J.C. C'est une technique que les Romains pratiquaient aux premiers temps et qui consiste à construire les murs en grandes pierres de taille, posées à joint vifs sans mortiers (Fig. n° 004).



Fig. n° 004 : Photo de la façade du mur adjacente au théâtre

I-3.1.2. Opus latericium (Testaceum)

Dans cette sorte de construction, on trouve l'utilisation de la brique seulement dans la construction des murs liée par un mortier de chaux. Les exemples de l'emploi de cette technique sont nombreux, on cite les grands thermes (Fig. n° 005).



Fig. n° 005 : Photo de l'opus testaceum en arrière plan.

20- Idem, A. PELLETIER, p 145.

I-3.1.3. Opus quasireticulatum

Cette technique est connue vers la fin du II^{ème} s. et qui représente un début de régularité dans les formes de pierre. La Fig. n° 006 montre le reste du mur de l'opus quasireticulatum qui se trouve à côté du temple des sévères



Fig. n° 006 : Photo montrant l'opus quasireticulatum

I-3.1.4. Opus africanum

C'est un type d'opus mixtum, utilisant le même matériau, la pierre, mais rompant la régularité du parement par l'adjonction d'alignements verticaux en grand appareil occupant toute l'épaisseur du mur²¹. Cette technique est très utilisée dans la construction du site (Fig. n° 007).

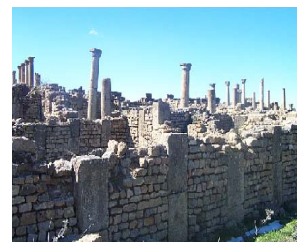


Fig. n° 007 : Photo montrant l'opus africanum.

I-3.1.5. Opus mixtum

Cette technique n'est pas assez développée dans la construction du site à la période romaine, on a constaté certaines structures au niveau des grands bains, probablement qu'il s'agit des travaux d'aménagement du site effectué dans la période française. Le parement est composé d'un mélange de l'opus latericium et l'opus reticulatum.

I-3.1.6. L'arc

Cette technique est utilisée pour la première fois par les Grecs en VI^{ème} s. av. J.c. Cet arc constitué d'un assemblage de profit semi-circulaire de pierres appareillées culminant à la clef de voûte (Fig. n° 008).



Fig. n° 008 : Photo montrant l'arc de temple des Sévères.

I-3.1.7. La coupole

C'est une voûte édifiée sur un plan circulaire. Cette technique est utilisée surtout au niveau des bains.

I-3.2. Citadelle d'Alger

L'évolution dans le savoir empirique aboutit à de nouvelles techniques de construction en introduisant la terre dans la composition des mortiers. Cette tentative a pour but d'améliorer la résistance à la compression des mortiers et d'avoir des structures résistantes aux mouvements séismiques, cela peut se traduire par l'augmentation de la ductilité des mortiers de construction.

La Citadelle est construite selon la technique défensive turque de l'époque, les remparts ont été faits très épais, avec le remplissage par des couches d'argile ou de terre mélangée avec le mortier de chaux.

Les murs des bâtiments sont en général armés à l'aide des rondins en bois d'if, posés horizontalement. De telles armatures se trouvent également au-dessus des fenêtres et des portes, et servent de linteaux porteurs et on les trouve aussi sous les baies.

La structure porteuse des bâtiments est composée des murs en maçonnerie et des colonnes. Quant aux murs des bâtiments, ils sont construits avec de la brique pleine, plate, de 3 à 3.5cm

21- Idem, A. PELLETIER, p 145.

d'épaisseur, posée d'une façon compacte sur le mortier de chaux, rose le plus souvent, avec des joints de 3 à 4 cm d'épaisseur. Dans le cas des murs épais, l'espace entre les briques de parement était rempli de gravats de pierre ou, plus rarement, de terre, puis on y versait du mortier de chaux.

I-3.1.1. Opus quadratum

Cette technique n'est pas assez développée dans la construction de la Citadelle. Elle est utilisée au niveau du rez-de-chaussée du palais des Beys et de la nouvelle mosquée.

I-3.2.2. Murs banchés

Cette technique est le fruit du génie du moyen âge. Les murs des remparts sont construits d'une façon légèrement inclinée, très épais, avec le remplissage par des couches d'argiles ou de terre mélangée avec le mortier de chaux. A la construction, on se servait des planches. Elle est encore utilisée pour la construction d'autres murs, dans la construction de la cloison interne de la poudrière et une partie du rez-de-chaussée de palais du Dey avec un mortier de chaux et de gravier, dit béton (Fig. n° 009).



Fig. n° 009 : Photo montrant la composition du mur banché.

I-3.2.3. Opus mixtum

Cette technique est observée surtout dans la construction des murs extérieurs de la poudrière et le dernier niveau du palais du Dey, d'où on peut simuler leur construction à la même période. Avec cette technique on pourra avoir une meilleure compatibilité avec les enduits de recouvrement, (Fig. n° 01).



Fig. n° 01 : Mur composé de pierre et de brique liées par un mortier de chaux.

I-3.2.4. Techniques anti-séismiques

Vu les différents tremblements de terres qu'a connue Alger, en 1490 et 1716, la Citadelle d'Alger est construite selon des techniques anti-sismiques.

La première technique consiste à l'introduction du bois (thuya) dans les structures et cela pour une meilleure répartition des charges sur les longs murs, un équilibre des structures ainsi que l'enchaînement des murs de bâtiments afin d'avoir des structures cohérentes, (Fig. n° 02).



Fig. n° 02 : Photo montrant l'utilisation des rondins du bois dans les structures.

La seconde technique consiste à l'utilisation dans la construction de la brique qui n'est pas assez cuite, cette méthode a démontré son efficacité depuis des siècles, l'exemple du site Sanaa au YEMEN qui date de plus de 10 s est un témoignage concret de son efficacité.

I-3.2.5. Voûtes

Les voûtes en maçonnerie ayant l'épaisseur d'une brique sont des voûtes en berceau qui permettent la construction en élévation. Elles sont utilisées aux premiers et certains niveaux supérieurs de la construction.

I-3.2.6. Arcs, pilier et colonnes

Ces trois éléments sont un moyen d'appui des structures des étages supérieurs. Ils existent des arcs, piliers en maçonnerie et d'autres en pierre tuf et en marbre, par contre les colonnes sont en pierre.

I-4. Histoire de restauration des sites

Dans le cas d'un bien du patrimoine, l'authenticité historique doit être matérialisée en rendant plus visibles les étapes significatives de sa construction et son utilisation au cours des phases successives à travers le temps²². Tout le monde pose la question : *qu'est ce que l'authenticité ?* L'origine de ce mot a fait l'objet de plusieurs conférences et publications, on cite comme référence le document de NARA. Ce principe déontologique de la conservation est un aspect essentiel de l'estimation des biens du patrimoine.

En général, l'authenticité est reconnue à un bien du patrimoine qui est matériellement original ou authentique (tel qu'il a été construit) et tel qu'il a vieilli et évolué au cours du temps²³. Dans ce contexte, nous avons pris en considération dans la procédure des prélèvements des échantillons en mortier toutes les interventions postérieures visant à la conservation et restauration des sites en question.

I-4.1. Site de Djemila

A travers nos recherches et observations sur ce site, il est très difficile de détecter toutes les parties et les structures anciennes car elles ont subi des modifications dans le temps, et les pillages opérés par les vandales et d'autres envahisseurs. Ces observations nous ont conduit à constater deux sortes de mortiers de construction à base de chaux et de sable qui remontent probablement à la période française. L'objectif de ces interventions, de valoriser et de maintenir la beauté du site qu'il a perdu depuis long temps. Cela a été confirmé par le rapport Yvonne ALLAIS²⁴ : « Le chantier de Djemila que Madame DE CRESOLLES, qui avait assisté auprès de son mari au début des recherches en 1909, a dirigé jusqu'en 1941 avec une énergie et un dévouement qu'on ne saurait assez louer, a été confié depuis 1942 à Mademoiselle Y. ALLAIS, agrégée de l'université... Après un demi-siècle d'activité un bon quart de la ville antique est encore sous terre. Il reste encore un champ de recherche assez vaste pour que, forts du passé, nous augurions bien de l'avenir ».

I-4.2. Site de la Citadelle d'Alger

La Citadelle d'Alger a connu beaucoup de modification à l'époque coloniale, non seulement dans le confortement des bâtiments mais plus loin, dans l'adaptation des bâtiments aux nouvelles tâches (la percée des fenêtres et des portes, pose de revêtement en faïence, pose de revêtement en carrelage, etc.). Aussi, parmi les changements les plus importants effectués durant cette période, on constate la percée de la rue Mohamed Taleb qui divise la Citadelle en deux parties à partir de 1848 (Annexe A, Fig. n° 2).

Après l'indépendance, la Citadelle fut habitée par plusieurs familles algériennes pendant une période de quatorze années. Durant cette période, la Citadelle a connu aussi beaucoup

22- M. FEILDEN et J. JOKILEHTO, « Guide de gestion des sites du patrimoine culturel mondial », traduit de l'anglais par J. Dubois. éd. ICCROM, Rome 1996. P 17.

23- Idem., M. FEILDEN et J. JOKILEHTO, P 16.

24- Y. ALLAIS « Rapport : histoire de la ville de Djemila », Archive ANAPSMH, P 8.

de désordre surtout dans la mutation de l'emplacement des matériaux ce qui rendra la lecture archéologique peu claire.

Dans les années 1980, un travail de coopération entre l'Algérie et l'atelier Polonais PKZ porte sur l'expertise de la Citadelle d'Alger. C'était pour la première fois que des recherches de ce type ont été effectuées sur ce site, afin de procéder à la reconnaissance générale de cet ensemble historique.

Le projet d'expertise a été établi et finalisé, par contre les travaux d'intervention en vue de sa restauration et mise en valeur sont reportés. L'année 1992, a été marquée par le classement de ce site avec l'ensemble de la Casbah comme patrimoine mondial. A compter de cette année, le site est devenu un champ d'étude aux étudiants, chercheurs, archéologues et architectes, etc. Parmi les monuments restaurés, on cite : le quartier des janissaires, l'ancienne mosquée et le pavillon de repos des femmes.

I-5. Conclusion

A travers ce contexte historique et l'étude monographique des sites nous pouvons conclure ce qui suit :

L'architecture des deux sites est conditionnée par diverses causes, qu'elle soit matérielle (climat, besoin, d'un abri, matériaux et techniques) ou sociale (économique, militaire et religieuse).

La diversité des mortiers et des techniques de construction nous renseigne sur les processus de création et l'évolution de la construction de ces sites. Le site de Djemila est construit selon trois techniques : Afriqanum, quadratum et testacium par contre celui de la citadelle d'Alger est construit selon ces deux dernières avec introduction des techniques anti-séismiques pour apporter une solution efficace aux différentes secousses telluriques qu'a connu la région depuis 1490. Quant aux systèmes d'appuis des constructions, les bâtisseurs avaient employé l'arc, la voûte et les colonnes.

Djemila

Cette recherche nous a permis de déceler l'existence de deux quartiers, le premier situé au Sud du site et qui remonte au I^{er} s, c'est à dire à la période militaire, le second se situe à l'Est du site et qui a été construit durant la période civile (la période de construction des maisons et des temples).

Citadelle d'Alger

Compte tenu du caractère militaire des édifices qui forment l'ensemble de la citadelle d'Alger, aucune étude historique n'a été faite sauf l'expertise de PKZ dans les années 1980. A travers cette dernière et certaines dates publiées dans des articles, on peut retenir le tracé historique indiqué ci-dessous et fera l'objet de diagnostic et de confirmation dans la phase expérimentale du notre présent travail.

Les principales périodes de construction des édifices de la citadelle d'Alger sont :

1516 – 1590 : Construction des remparts, les bastions et la poudrière.

1590 – 1817 : La construction des premiers niveaux des édifices.

1817 – 1830 : La construction des niveaux supérieurs des édifices.

CHAPITRE II

APPROCHE GENERALE SUR LES MORTIERS DE CONSTRUCTION.

II.1. Aperçu historique

L'homme préhistorique est né dans les bois et dans les cavernes à l'instar des animaux. Il a mis plusieurs siècles pour découvrir les matériaux nécessaires à la construction durable de son foyer d'habitat pour une meilleure sécurité des agents atmosphériques et autres..

La pierre a été le premier matériau utilisé et qui n'offre pas un habitat répondant à tous les critères de vie. L'homme à travers l'espace et le temps a pu améliorer le niveau de sa vie et de son environnement, en utilisant différents matériaux comme les mortiers, objet de notre étude.

La diversité des mortiers archéologiques nous a permis de réfléchir au premier liant utilisé, *la chaux ou le plâtre* ? Les deux sont des matériaux anciens, ils sont issus d'une cuisson : le plâtre, obtenu à partir de gypse cuit et broyé, et la chaux provenant de la calcination de calcaire, puis de l'extinction du produit obtenu.

Les différentes recherches et investigations dans le domaine archéologique ont montré des dates sur l'emploi de ces liants anciens qui appartenant aux différentes périodes. Au cours des fouilles de « çatal Höyük » en Turquie, des traces de l'enduit à base du plâtre sont trouvées et qui remontent au VI^{ème} av. J. c.

Vers III^e av. J.c., l'Amérique précolombienne a maîtrisé la fabrication de la chaux et son utilisation dans les mortiers, employés comme liant à bâtir. La matière première était obtenue en calcinant les coquillages. Les mortiers précolombiens sont constitués de chaux et de sable. Parfois ils comportaient du gravillon. Le mortier de la vallée de Mexico, très dur, a longtemps été considéré comme un ciment¹. Dans la même période et dans la région d'Abydos, le plâtre a été utilisé pour combler les vides de maçonneries cyclopéennes (tombes et pyramides).

L'Egypte hellénistique a suivi les méthodes de construction grecques. Des mortiers à base de chaux, des sables associés quelques fois à de brique pilée ont été utilisées. L'analyse du mortier de la pyramide de Saqqarah a permis de constater que l'enduit comportait trois couches successives, chacune faite d'un mélange d'argile, de chaux et de sable quartzeux².

Les romains ont tiré des leçons chez les Grecs. Ils ont multiplié l'utilisation de la chaux, ainsi l'amélioration du procédé de leur cuisson afin d'acquérir ces meilleures caractéristiques, surtout mécanique. Comme, ils ont introduit un mortier à base de chaux et de la pouzzolane qui favorise le développement de la construction en petit appareil, opus africanum.

Les Byzantins construisaient leurs maisons en brique à l'aide de mortier constitué de chaux, de sable et de brique pilée. Ainsi les façades des murs sont blanchies à la chaux, enduit et décorée en peintures polychromes.

1- Ecole d'Avignon. « Techniques et pratiques de la chaux », éd : Eyrolles, Paris 1997, P187.

2- Idem, Ecole d'Avignon. P 197.

L'influence romaine se ressent dans les aqueducs ou dans les citernes dont l'étanchéité était assurée par un corps d'enduit à base de chaux, brique pilée et de fibre d'origine végétale (les anas de lin, les poils de chanvre, etc.), recouvert d'enduit de finition³.

Depuis cette ère jusqu'à XVIII, des progrès techniques et architecturaux ont visé à perfectionner la maçonnerie et les supports des façades pour recevoir des décors peints. Toutes ces tentatives visent à l'amélioration de la qualité des mortiers, du type et de la qualité des liants utilisés, ainsi que les procédés de leur fabrication.

L'ajout de certains adjuvants, comme les suifs, le sang de boeuf, le blanc d'œuf et d'autres ajouts font aussi l'objet d'amélioration des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques des mortiers. Cependant, la préparation de mortier se fait avec un apport progressif d'eau et un brassage long, en respectant les proportions des constituants jusqu'à ce qu'on aura une pâte homogène.

La découverte de secret d'hydraulicité des ciments fait passer du savoir empirique au monde d'expérimentation qui permis d'établir et de traduire par des formules les compositions de ces mortiers.

Cependant, dans la construction, les mortiers répondent à plusieurs critères, à titre de rappel, nous citons quelques-uns dans des domaines différents :

- dans le domaine historique, ils sont des matériaux continuum ces caractéristiques techniques et esthétiques se combinent pour faire de celles-ci un matériau qui peut remplacer la pierre,
- dans le domaine de construction, ils forment des structures harmonieuses avec la maçonnerie (une bonne compatibilité et comportement mécanique à long terme),
- dans le domaine de l'aspect, ils sont des matériaux capables de réveiller la beauté des parements.

II.2. Définition du mortier

Le mortier, du latin *mortarium*, désignant d'abord l'auge du maçon, puis son contenu; le mot est demeuré avec sa signification originelle lorsqu'il désigne un récipient où l'on mélange où l'on broie⁴.

Le terme de mortier recouvre à la fois les mortiers employés au cœur de structure, afin de lier les différents éléments du mur, et ceux qui servent à la réalisation de revêtements d'enduits⁵. Les mortiers de revêtements servent à régulariser la surface des murs, à donner un aspect agréable aux parements et à protéger les maçonneries des intempéries et des infiltrations d'eau⁶. Ils contiennent des liants, des granulats et de l'eau; des adjuvants ou des colorants peuvent aussi être ajoutés.

II.3. Type de mortier

Selon la nature de liant, on classe les mortiers de construction en deux catégories, les premiers se durcissent uniquement à l'air libre et les seconds sous l'eau et à l'air libre.

3- Idem, Ecole d'Avignon. P 191.

4-- J. P. ADAM « La construction romaine, matériaux techniques ». Deuxième édition, G. M. Picard, Paris 1989. P 77.

5- Acte de la table ronde de Dijon / Enduits et Mortier archéologiques : Anne BOSSOUTROT « Analyse et restauration des enduits » les travaux antérieurs. Paris 1991.

6- « Pétroarchéologie de mortiers » GALLOS-ROMAINS application de méthodes analytiques à l'étude des thermes du vieil-Evreux, Paris 1993.

II.3.1. Mortiers hydrauliques

Depuis l'antiquité, les mortiers ont fait l'objet de recherches dans l'amélioration de leurs caractéristiques. Soit dans la nature du liant, le mode de préparation, le type d'agréats et la nature des adjuvants, on vise souvent à améliorer leur résistance mécanique à la compression.

Ces types de mortiers font leurs durcissements à l'air libre ou même sous l'eau, une fois qu'ils sont durcis, ils résistent à l'action destructrice de l'eau et même salée. Cette double fonction permet leurs vastes utilisations.

II.3.1.1. Mortiers de chaux

La chaux ne peut former le mortier hydraulique que par réaction avec la silice ou l'alumine. Cette réaction n'est possible qu'à haute température (ciment moderne) ou à température ambiante, si on utilise des formes de silice ou d'alumine très réactive (béton romain antique)⁷.

Pour faire augmenter la résistance de mortier, on lui fait subir une cuisson, cela est confirmé par G. TORRACA⁸ : « ... si l'on mélange énergiquement, ce qui entraîne une meilleure introduction d'air, on obtient aussi un matériau plus facile à travailler sans qu'il soit nécessaire d'ajouter trop d'eau. Ce type de mortier a un inconvénient principal, il s'agit de son durcissement très lent et peut même ne pas durcir du tout en atmosphère très humide ».

II.3.1.2. Mortier en terre

Les argiles non cuites sont les principaux liants de la terre. Ce principe est ancré dans la culture de la construction dans maintes régions du monde⁹. Ces cristaux sont dispersés irrégulièrement dans une forme floculée qui n'est pas très plastique, mais si on la laisse immergée pendant un certain temps et sous l'effet biologique, la disposition des cristaux change et passe à une forme dispersée qui permet aux argiles d'être plus plastique. Dans ce cas, l'argile prend et retrouve ses propriétés cohésives et peut alors lier la terre.

La plupart des terres sont constituées d'argile, d'une proportion de limon, du sable et des graviers. Les particules les plus grandes donnent à la terre sa structure, alors que l'argile la lie et lui donne sa cohésion.

Pour fabriquer un béton en terre, l'ajout d'un liant (chaux, plâtre) garantit une meilleure cohésion, une meilleure compacité et une durabilité de la construction, objet d'agression et d'attaque des agents climatiques extérieurs. Ainsi, l'ajout des matériaux fibreux (paille de blé ou de riz et poil animal, etc.) lui confère une augmentation de sa résistance à la traction de mortier. Aussi, l'ajout de certains additifs fait améliorer les performances des mortiers.

Les nombreuses recherches effectuées au moyen âge sur l'amélioration des performances de mortier, ont montré que plus on utilise un mortier chauffé plus on augmente ses performances mécaniques à savoir la résistance à la compression.

Quant au chaînage, les édifices peuvent être ou pas du tout chaînés. On réalise le chaînage d'une façon efficace en encastrant horizontalement des bois de 15 cm de diamètre environ assemblés aux angles.

7- Idem, G. TORRACA P71.

8- Opcit, G. TORRACA p 70.

9- www.craterre.archi.fr : CRA Terre - France, « L'architecture en terre », Année 2005.

Les rondins sont encastrés dans l'épaisseur du mur, noyés dans un bain de mortier de chaux et de sable s'ils sont en sapin, et dans du plâtre ou de la terre s'ils sont en chêne.

A travers les différentes études effectuées dans ce domaine, il a été démontré que le rapport entre la hauteur et l'épaisseur du mur est légèrement supérieur à 10. Ainsi les murs de 50 cm d'épaisseur permettent de monter jusqu'à 7m de hauteur. Quant à la construction plus basse, il ne sert à rien de diminuer l'épaisseur en dessous de 40 cm, est cela pour des raisons pratiques.

II.3.2. Mortiers aériens

Leurs noms indiquent la nature du liant utilisé c'est-à-dire à base du liant aérien qui fait leur durcissement uniquement à l'air libre.

II.3.2.1 Mortier de chaux aérienne

Dans ce type de mortier, on utilise la chaux aérienne en pâte mélangée avec les différents agrégats. La réaction entre les différents constituants nous amène souvent à la formation des mortiers hydrauliques.

La Fig. n° 03 explique les différentes étapes de transformation de la chaux aérienne avec ou sans ajout du sable et d'autres agrégats. L'ajout de cendre, de silice et de la terre contenant des agrégats, etc. conduit à l'hydraulicité des mortiers dans une opération dite : pouzzolanique.

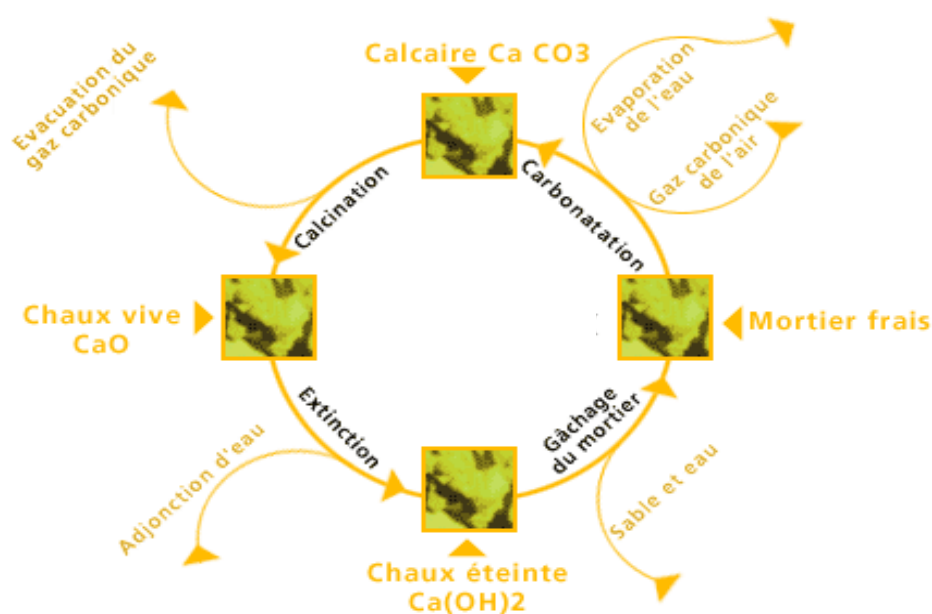
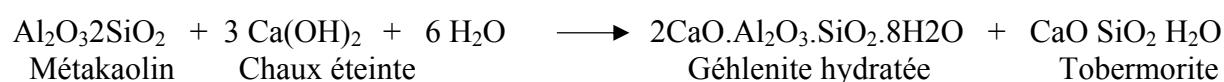


Fig. n° 03 : Schéma du cycle de la chaux aérienne¹⁰

La réaction entre la chaux éteinte et les matériaux pouzzolaniques peut se résumer dans la réaction suivante¹¹.



10- Idem, Ecole d'Avignon. P 44.

11- Idem, G. TORRACA, P 72.

Les silicates de calcium hydratés forment un réseau de cristaux fibreux ou un matériau amorphe et gélatineux qui peut être considéré comme la cause principale du phénomène de durcissement du mortier.

II.3. 2.2. Mortier de plâtre

On ne peut obtenir du mortier avec le plâtre ordinaire, néanmoins on peut l'obtenir avec le plâtre à plancher et le plâtre aluné (pierres reconstituées). Il peut être utilisé pour ouvrage léger, bien protégé de l'humidité avec l'emploi de gravillons et de sable, un rapport eau/plâtre ne dépasse pas 0,80, et un dosage en plâtre ne dépasse pas 300 à 350 kg de plâtre par mètre cube¹².

Avec ce liant, les résultats obtenus du point de vue mécanique n'en seraient pas améliorés, ce qui le distingue avec les bétons de ciment. On peut escompter une résistance à la compression, à 28j de prise, de l'ordre de 50 à 100 kg/cm², suivant la qualité du plâtre utilisé.

Ces valeurs s'entendent pour des bétons de plâtres bien secs car l'effet de l'humidité fait réduire leur résistance à des valeurs assez basses.

Dans certaines régions d'Algérie, par exemple dans les maisons mozabites, on trouve certains enduits de revêtement à base du plâtre et du sable, ce mortier est appelé timchent.

II.4. Constituants des mortiers

Le mortier est un mélange de plusieurs matériaux : le liant qui assure la cohésion entre les éléments de mortier, d'agréats qui forme le corps de mortier, des pigments qui donnent la beauté des ouvrages et d'autres ajouts pour améliorer ses caractéristiques.

II.4.1. Les liants

Les liants sont constitués d'un ou plusieurs minéraux, quand on les mélange avec l'eau ils forment une pâte plastique. Selon leurs origines, on distingue : la chaux, le plâtre et l'argile.

II.4.1.1. La chaux

Les premières traces de la fabrication de la chaux remontent à l'aube de la civilisation. Elle est utilisée pour la confection des mortiers liants les maçonneries de moellons. Son emploi a fait marquer un tournant dans l'histoire de l'architecture en permettant le développement et la construction de voûte dont les portées demeurent encore records.

La chaux est une substance caustique solide, blanche lorsqu'elle est pure. Elle est obtenue par calcination du calcaire et d'autres formes de carbonates de calcium.

La cuisson de la chaux dure trois jours, les pierres calcaires sont calcinées à 900 ÷ 1000⁰c¹³. La réaction de décarbonatation est la suivante :

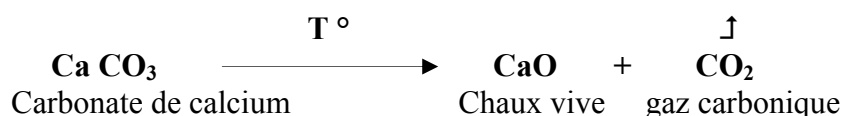
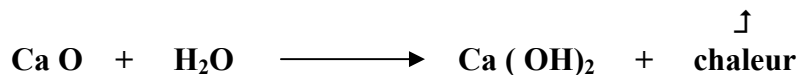


Fig. n° 04 : Four à chaux de Marcel Lavie située sur la route de Sedrata wilaya de Guelma.

12- G. DREUX – J. FESTA, « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». éd. Eyrolles, Paris 1969.

13- Y. M. FROIDEVAUX, « Technique de l'architecture ancienne : Construction et restauration ». éd. Pierre Mardaga, Bruxelles 1986. P 39.

On éteint ces pierres calcinées en les mélangeant à de l'eau dans un bac en tôle ou en bois. A côté de cette cuve, a été creusée une fosse de terre bien damée qui servira de bassin de refroidissement pour la chaux. On verse de l'eau à proportion de 35 l d'eau pour 70 l de chaux¹⁴. Cette seconde opération chimique s'exprime par l'équation suivante :



La chaux fusée devrait être malaxée avec beaucoup de patience, pour en faire une espèce de pâte jusqu'à la fin de l'ébullition. On laisse couler cette sorte de pâte dans la fosse, en prenant soin de retenir les morceaux de roche non encore fondus. On laisse reposer cette masse pendant 15 jours au moins, à l'air. Cette chaux peut être conservée pendant plusieurs années¹⁵. Telle est la méthode ancienne pour la fabrication de la chaux grasse.

L'Algérie a connu l'utilisation de la chaux dans les constructions comme mortiers à l'arrivée des romains, les différents sites et monuments restant sont le témoin de ceux-ci. Ainsi, durant la période médiévale, la chaux était utilisée dans les mortiers et les stucs. La Casbah d'Alger est l'illustre exemple à citer.

Selon la nature des matières premières utilisées dans la fabrication de la chaux, on constate de profondes modifications qui l'affectent aussi bien à l'extinction qu'à la prise. Suivant la teneur en argile, on classe les chaux comme suit :

a. Chaux aériennes

La prise de ces types de chaux s'effectue seulement en présence du gaz carbonique dans l'air, d'où la lenteur de la prise et la possibilité de conserver de grandes quantités de chaux éteinte. On distingue deux types de chaux :

- la chaux grasse, qui est obtenue à partir d'un calcaire pur,
- la chaux maigre, qui contient 2 à 8 % d'argile.

b. Chaux hydraulique (XHN)

Cette chaux est obtenue avec un calcaire contenant entre 8 et 20% d'argile. Cette dernière offre à la chaux les propriétés d'hydraulicité que Vicat* exprime par un indice appelé, l'indice d'hydraulicité, qui est le rapport de la fraction acide sur la fraction basique. On note que plus cet indice est élevé et plus la chaux est dense, résistante et à une prise rapide.



Fig. n° 05 : Différente chaux
 1- chaux vive 4- chaux hydraulique
 2- chaux éteinte 5- chaux aérienne
 3- chaux artificielle

La distinction entre les deux types de chaux, la Chaux aérienne et la Chaux hydraulique se fait par la composition du gisement, dès que la silice est présente, une XHN est obtenue.

- la chaux aérienne ne durcit, après gâchage, qu'au contact de l'air (CO₂)
- la chaux hydraulique après gâchage, durcit en contact de l'air (part aérienne) et avec l'eau (part hydraulique).

14- Idem, Y. M. FROIDEVAUX. P 40.

15- Idem, G. TORRACA. P 70

Cette distinction s'effectue aussi par la mesure de l'indice d'hydraulicité (i). Ce paramètre définit les chaux hydrauliques qui tiennent leurs propriétés de l'importance des éléments argileux de la roche mère.

$$i = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}{\%CaO + \%MgO}$$

La chaux grasse à un indice d'hydraulicité compris entre 0 et 0,10. Les chaux hydrauliques ont un indice d'hydraulicité entre 0,20 à 0,50.

II.4.1.2. Le plâtre

On attribue la découverte des bienfaits du plâtre à un berger utilisant du gypse comme foyer en plein air pour cuire des aliments : après une averse soudaine, il aurait constaté que les pierres faisaient corps en durcissement autour du foyer éteint¹⁶.

C'est une poudre blanche, obtenue de la cuisson d'une roche sédimentaire, le plâtre qui est un sulfate de chaux déshydraté $CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O$ et de couleur qui varie suivant les impuretés qu'il contient.

Sa fabrication dépendra de la provenance de la pierre à plâtre et le produit de base désiré : Entre 120 et 180⁰c, le gypse perd l'eau faiblement combinée en absorbant de la chaleur et on obtient le plâtre ordinaire $CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O$ ou semi-hydrate qui renferme encore 6,21% d'eau en poids.

Entre 180⁰c et 250⁰c, on obtient un plâtre à prise rapide, l'hydrate soluble $CaSO_4$, instable parce qu'avide d'eau. C'est un sur-cuit qui active la prise du plâtre (ou en ajoute dans le plâtre à mouler).

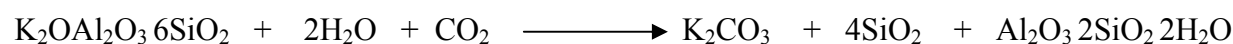
Entre 250 et 600⁰c, on obtient un plâtre inutilisable, l'anhydrite insoluble qui s'hydrate rapidement au début puis très lentement ou pas du tout.

Entre 600 et 900⁰c on obtient un produit inerte, le plâtre cuit à mort, incapable de faire sa prise. Au-dessus de 900⁰c et jusqu'à 1450⁰c, le produit obtenu retrouve sa faculté de prise : c'est l'anhydrite soluble à prise très lente (5h à 20j) mais d'un durcissement élevé.

II. 4.1.3. L'argile

L'argile est une roche sédimentaire, constituée essentiellement d'un mélange de silicates d'alumine hydratés. C'est une substance hydrophile avec une absorption d'eau allant jusqu'à 60%. Elle est caractérisée par sa plasticité qui est due au degré élevé de finesse de ses grains (< 5µm) et sa morphologie, c'est-à-dire son aspect de minces paillettes laisse l'eau capillaire s'insérer en couche faible.

Les matières minérales qui forment l'argile dans la nature résultent de la désagrégation de diverses roches, et principalement des feldspaths, sous l'action de l'eau et de l'acide carbonique. A titre d'exemple, les feldspaths et en particulier l'orthose, se décomposent en produisant de la kaolinite sous l'action de la vapeur d'eau et du gaz carbonique de l'atmosphère.



16- J. P. DELPECH, « Pratique du moulage ». III^{ème} éd : Eyrolles, Paris 1999, PP. 69- 70.

Le choix du type d'argile pour la fabrication de la céramique pilée a été une problématique de recherche depuis l'époque romaine. Ils voyaient la tuile broyée, appelé le tuileau est qui à base de l'illite est le meilleur agrégat pour la fabrication des bétons. D'ailleurs, cette hypothèse est confirmée actuellement par l'utilisation de l'argile expansive dans ce domaine.

II.4.2. Les agrégats

Le terme agrégat est le nom officiel des matériaux de construction, tels que les graviers, les sables et les cailloux, intervenant dans la confection des mortiers¹⁷.

Dans les textes de Vitruve¹⁸, il a désigné les agrégats, par : une espèce de sable de cave qui le distingue par différentes couleurs : le noir, le gris, le rouge et *carbunculus*. Pour lui le meilleur sable est celui qui fait du bruit lorsqu'on le frotte entre les mains.

Le rôle des agrégats dans les mortiers est inerte, il réduit la quantité d'eau de gâchage, le phénomène de retrait et il forme le squelette de ceux-ci. Ainsi, ils sont déterminants dans le choix de la résistance des mortiers.

II.4.2.1. Classification des agrégats : Selon l'origine et la nature, on classe les agrégats en :

a. Le sable

Le sable à une influence prépondérante sur la qualité des mortiers : il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange. Il provient de roches chimiquement inertes telles que : les calcaires durs, les granits et les quartzites. Selon la norme NFP 18 304, on classe les sables en construction :

- Les sables de 0,1 à 6,5 mm,
- Les graviers, type grains de riz de 4 à 10mm jusqu'à 30mm, pour les matériaux roulés,
- Les cailloux, supérieurs à 30 mm.

b. Les pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes¹⁹.

Elles sont composées d'un mélange d'alumine, de silice, de chaux et de fer, en proportions variables.

Biston²⁰ a décrit les pouzzolanes comme : une espèce d'argile ferrugineuse qui a éprouvé une forte température par le feu des volcans. Elle tire son nom de pouzzolane en Italie, et affecte toutes sortes de couleurs; on la trouve ordinairement à l'état d'une poussière mélangée de parties plus grossières et poreuses assez semblables à la pierre ponce.

Ce type d'agrégat est un constituant déterminant, car il conditionne la résistance des mortiers. Même Vitruve²¹ a confirmé dans son texte : ... la chaux, la pouzzolane et le tuf, engendrés par le feu, sont mêlés et joints ensemble par le moyen de l'eau, ils s'endurcissent promptement, et font une masse tellement solide, que les flots de la mer ne peuvent ni la rompre, ni la dissoudre.

17. Idem, école d'Avignon P10.

18. Vitruve, Les dix livres d'architecture corrigés et traduits en 1684 par C. PERRAULT. éd. pierre Mardaga, Paris. P76 .

19- M. Venuat, «la pratique des ciments, mortiers et bétons ». éd : Du Moniteur. Tome1, Paris 1989.

20- V. Biston, « Manuel théorique et pratique du chauffournier ». 1836, Réédition Léonce Laget, Paris 1981.

21- Idem, Traduction de Cl, PERRAULT, livre 2, 4,1.

A partir de là, on peut dire que les pouzzolanes sont des agrégats très durs, ils obtiennent cette dureté après leurs mélanges à d'autres constituants.

c. Les pouzzolanes artificielles

Certains matériaux peuvent être transformés en pouzzolanes artificielles qui sont : La poudre d'argile cuite ou la brique cuite pilée, ces substances concassées et broyées comme les poudres de pierre augmentent la dureté des mortiers.

Une étude effectuée par l'INSA, par l'équipe de MURAT entre 1981 et 1984 sur l'utilisation des argiles kaoliniques calcinées à température $700 \div 800^{\circ}\text{C}$, a abouti aux résultats suivants :

- Les meilleures résistances des mortiers sont obtenues avec un rapport argile calcinée/chaux est supérieur à 1.
- La résistance à 28 jours du mortier obtenu à partir du mélange, deux parties d'argile calcinée et une partie de chaux est égale à 14,50 MPa. Elle est équivalente à celle donnée par les mortiers de ciment portland.

On peut dire à partir de cette réaction II.3.2.1 que le mélange chaux aérienne- métakaolin est considéré comme chaux hydraulique avec l'ajout de l'eau. Donc, cette céramique peut être substituer et remplacer la pouzzolane naturelle.

d. Les micas

Sont des phyllosilicates à feuille élémentaire épais de $10\text{\AA}$ dont la composition chimique variable. Dans cette famille de roche, le Si^{+4} peut être substitué par un atome de Al^{+3} et un cation de valence égale à 1, par exemple le K^{+} ou le Na^{+} .



Fig. n° 06 : pierre de mica brute

Tous les micas sont monocliniques et se présentent en masses lamellaires ou écailleuses et ont une conductibilité thermique et électrique nulle, densité égale à 3 et une dureté égale $(2,5 \text{ à } 3)^{22}$. On distingue les micas noirs et les micas blancs alumineux.

La cuisson de cette pierre fait remplacer d'autres agrégats à savoir le sable et la pouzzolane, on trouve cette utilisation dans les mortiers de la Citadelle d'Alger (Fig. 06).

II.4.3. L'eau pour les mortiers

L'eau employée pour le gâchage du mortier doit répondre aux prescriptions de la norme NF P 18-303, « l'eau potable convient »²³.

L'eau dans les mortiers assure au minimum deux rôles essentiels; la plasticité du mélange et l'extinction de la chaux. Elle devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

II.4.4. Les ajouts

Les adjuvants sont utilisés, en règle générale, pour leurs propriétés plastifiants et fluidifiantes (diminuer la quantité d'eau ajoutée, améliorer l'ouvrabilité, augmenter la résistance mécanique, etc.) sans perdre certaines qualités de durabilité²⁴.

22- Dictionnaire des sciences de sol, minéraux définition. P 192

23- Document technique Unifié, n° 26.1, référence AFNOR DTUP 15-201 : Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Chapitre 2 : Matériaux, mai 1990.

Une bonne composition du mélange, l'utilisation de matériaux de qualité et une bonne technique qui permet habituellement d'obtenir une maçonnerie solide, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure et une technique défectueuse qui ne peut pas être corrigée par l'emploi d'adjuvants.

Les romains ajoutaient dans leurs mortiers des mélanges de vins, de moût de raisin, du vinaigre et des figues (tableau n° : 2)²⁵.

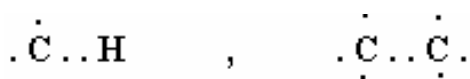
Tableau n° 2 : principaux types d'adjuvants et leurs rôles dans les mortiers.

Adjuvants	Rôles des adjuvants
Vinaigre, vin	Améliore la carbonatation et la résistance au gel.
Huiles de lin/ d'olive	Retard la prise de l'enduit liée à une évaporation trop rapide de l'eau; diminue le retrait et améliore la résistance au gel. L'inconvénient surtout de l'huile de lin est le jaunissement des enduits.
Le sucre	Retarde la prise
Le savon	Améliore la compatibilité des composants entre eux
L'œuf (blanc et jaune)	Améliore les propriétés physiques et mécaniques des mortiers
Le suif	Améliore l'étanchéité de l'enduit à l'eau.
L'alun	Aide à la fixation des pigments (sulfate double d'aluminium et de potassium)
Paille, poile de chèvre blanche	Améliore les propriétés mécaniques des mortiers

La quantité de produits ajoutés dans les mortiers est très variable. Leur détermination nécessite une expérience et un savoir-faire, car il s'agit d'une équation à quatre variables : le support, les quantités d'agréats, la température et l'humidité ambiante et le choix du type de chaux.

Matières organiques

L'ajout des matières organiques telles les huiles minérales, les corps gras sont principalement composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. Comme le carbone et l'hydrogène ont des électronégativités très voisines, les électrons mis en commun pour former la liaison carbone hydrogène sont repartis entre les deux atomes et il ne se forme pas de pôle électrique. Il en va de même pour la liaison carbone - carbone.



24- M. BENCHEIKH, M. BELOUADAH, M. CYR, et P. CLASTRES, « Effet des adjuvants sur la perméabilité et la porosité d'un béton à base de matériaux locaux sous conditions climatiques ». Séminaire Bebelzouar, juin 2003.

25- Idem, Ecole d'Avignon. P 24.

Cette matière non polaire, ne peut pas attirer de molécules d'eau puisqu'elle n'a pas de liaisons d'hydrogènes avec elles. Donc l'eau ne pénètre pas à la surface et l'angle de contact est très grand.

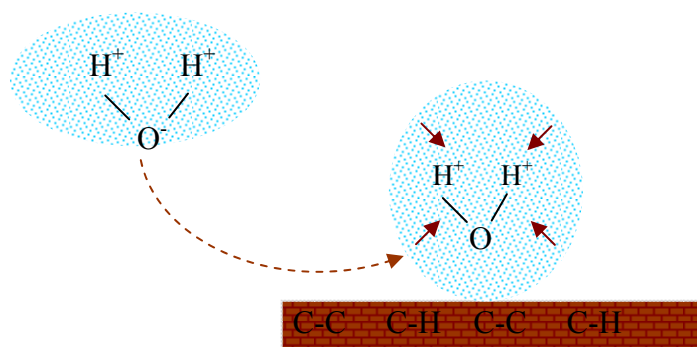


Fig. n° 07 : représentation d'une goutte d'eau sur une surface solide non polaire.

La figure n° 07, montre qu'il n'existe pas de force d'attraction entre la goutte d'eau et les parois des pores constituant le solide, cela explique la réussite dans la préparation des anciennes recettes qui sont riches en carbone, obtenu par calcination des os ou de la combustion du bois pour l'hydrophobisation des structures.

a. Cendre des os (Le noir animal)

Résidu de la calcination des os à l'abri de l'air, la cendre des os provenant de la décomposition de l'ossein.

Le noir animal retient énergiquement en surface les matières colorantes des solutions (décoloration des jus sucrés, des huiles, des vaselines, ...) ²⁶. Il forme une sorte de film dans le mortier et ne laisse pas l'eau à se pénétrer à l'intérieur du matériau.

b. Charbon de bois

On l'obtient par combustion du bois à l'abri de l'air, combustion qui fournit :

- des gaz combustibles (hydrogène, méthane, monoxyde de carbone)
- un résidu très homogène qui constitue le charbon de bois.

II.4.5. Pigments

L'emploi des pigments comme ajout dans les mortiers est connu depuis l'antiquité. Ils sont largement répandus à l'époque romaine, comme il a indiqué Vitruve ²⁷ dans son septième livre sur les techniques de construction : Il y a des couleurs qui se trouvent dans la terre qu'on tire de certains lieux : il y en a d'autres qui se font par artifice de la composition de plusieurs choses, qui étant mêlées ensemble, font dans les ouvrages le même effet que les couleurs simples et naturelles. De celles qui se tirent de la terre, celle que les Grecs appellent Ochra, est la première dont nous avons à parler. On la trouve en plusieurs endroits, et même en Italie ...

Au cours des années, il a été démontré que cet ajout a deux raisons : la première est décorative, dans ce cas, on ajoute un minéral au mélange chaux sable avant qu'il soit mouillé afin d'avoir une meilleure homogénéisation des façades enduites. La seconde raison est d'économiser les matériaux, dans ce cas cette terre joue le rôle d'une charge dans la composition de mortier, il peut arriver dans certains cas d'utiliser des agrégats colorés.

26- A. DESSART, J. JODOGNE, J. PAUL «chimie minérale notions de chimie nucléaire », Ed : A. DE BOECK. Tome II, Bruxelles 1979. P126.

27- Idem, Vitruve. P 103.

II.4.5.1. Pigments naturels

Il existe une multitude de pigments aux noms évocateurs : blanc de Venise, bleu de Prusse, de Brême, jaune de Naples, terre verte de Vérone, etc.

II.4.5.2. Pigments artificiels

Ils sont obtenus par réaction chimique sur les principaux métaux, par exemple l'oxyde de cuivre qui peut être de couleur verte et bleue.

a. Choix des colorants et absorption du rayonnement solaire

Dans la palette des couleurs, on caractérise les colorants par leur propre longueur d'onde, plus elle augmente, plus le colorant absorbe les rayons de soleil. Il est bien connu que les couleurs sombres absorbent beaucoup plus de lumière et la chaleur.

b. Les quantités

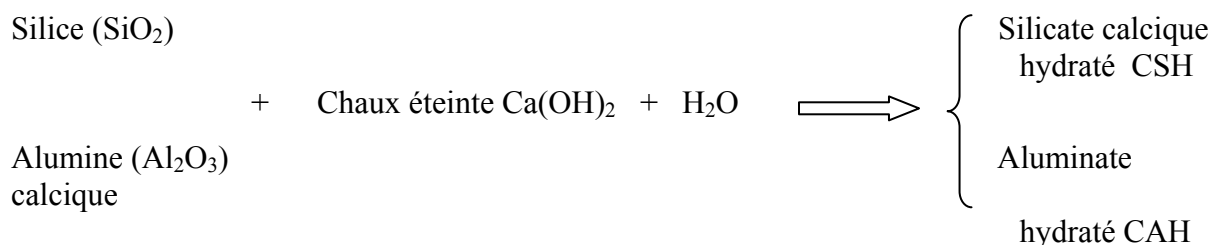
L'ajout des pigments nécessite un savoir-faire, il demande de prendre en considération plusieurs paramètres à savoir : le support, la température et l'humidité ambiante, le choix du type de chaux, etc.

II.5. Caractéristiques des mortiers

Depuis des années, les mortiers font l'objet de développement spectaculaire dans l'amélioration de leurs caractéristiques intrinsèques et extrinsèques qui sont dues sans doute d'une grande part aux meilleurs choix de composition.

II.5.1. Mortiers de chaux hydrauliques

Prise des chaux hydrauliques²⁸.



Avec l'eau, la chaux et d'autres éléments de silice, d'alumine de fer et de calcium forment des hydrates insolubles qui confèrent au liant un caractère hydraulique.

Par la suite, au contact de l'air humide, la chaux et les hydrates ainsi formés vont se carbonater (avec le gaz carbonique de l'air) pour redonner le carbonate de calcium et la silice d'origine. Cette réaction prend plusieurs mois : c'est la partie aérienne de prise.

II.5.2. Mortier du plâtre

Les mortiers du plâtre sont destinés généralement comme enduit de revêtement des maçonneries à l'intérieur des constructions. Parmi ces caractéristiques :

- isolant acoustique,
- régulateur d'hygrométrie (anti-condensation),
- isolant thermique, le coefficient de conductivité thermique est de 0.87
- corrode le fer et l'acier

28- Idem, Ecole d'Avignon. P 30.

- en raison de sa solubilité, le plâtre ordinaire ne peut être utilisé pour les extérieurs, sauf s'il est revêtu d'un enduit imperméable, une solubilité de 6.3 g/l.
- son PH est dans les environs de 6 à 6.5
- un enduit de plâtre, par sa structure monolithique, s'oppose à toute transmission de microbes et autres.
- la résistance à la compression peut varier entre 50 et 100 KgF/cm², suivant la qualité du plâtre employée. La résistance à la traction est de 5 à 10 kg/cm².

II.5.3. Mortier de terre

Ce type de matériau possède une certaine déformabilité en compression et cisaillement. Ce qui le qualifie comme un matériau intéressant pour le parasismique. Si l'on veut construire en terre dans les régions sismiques, il est possible de l'associer avec un autre matériau, résistant à la tension, le bois par exemple. C'est ce qui se fait à Arménia en Colombie ou le bâtiment ancien est constitué essentiellement de murs en treillis de bambou remplis de terre. Mais l'on peut aussi construire en utilisant des formes adaptées et validées par l'histoire, et c'est le cas en Italie, avec des murs en pierres bâties à la terre, comme sur la plupart des côtes méditerranéennes, plus épais en bas qu'en haut, ou en construisant en terre damée (pisé) avec des contreforts comme dans l'Alentejo portugais²⁹.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de normalisation pour tous les modes d'utilisation de la terre dans la construction. Seuls, les pays industrialisés ont mis au point des essais précis sur les performances minimales de matériau. Cette procédure permet aux entrepreneurs et aux compagnies une assurance d'apporter les garanties nécessaires dans un cadre de production contrôlée.

La résistance mécanique à la compression qui est une propriété importante dans ce genre de construction. Elle est de 50 à 100 kg/cm², dans le cas de la stabilisation au ciment par contre, elle est moins quand il s'agit de la stabilisation à la chaux : 30 à 80 kg/cm². Ainsi, dans ce genre de construction n'exclut pas l'effet de l'humidité, car la résistance à la compression du matériau humide réduit environ la moitié de sa résistance à sec. Sa résistance à la traction est de 1/5 de la résistance à la compression. Le module d'Young est : 700 à 70 000 kg/cm².

II.5.4. Mortiers bâtards

Ce sont des mortiers qui se constituent de plusieurs liants avec éventuellement d'ajout d'agréats et d'autres additifs.

II.6. Emploi des mortiers

Selon la composition et la résistance recherchée, on distingue plusieurs sortes de mortiers employés dans divers ouvrages, mais on se limite dans notre travail à présenter les mortiers d'hourdages et les enduits de revêtements.

II.6.1. Les mortiers de maçonnerie ou d'hourdage

C'est sous la forme de liant que la chaux est utilisée en maçonnerie, c'est-à-dire mélangé à des proportions variables des matériaux divers, soit des agrégats comme : le sable, la brique pilée, etc. ou l'argile. Sans les agrégats la chaux très épaisse se fissure en séchant à cause de la perte de volume.

29- J. TOURNON, « Construction en Terre et tremblements de terre ». Revue n° : 17 de l'hiver, publiée le, 4 février 2004.

La confection du mélange se fait avec un apport progressif d'eau et un brassage long et méthodique jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, cette opération dite gâchage.

II.6.1.1. Composition

Au terme de composition, il n'y avait pas de grande chose à signaler depuis la période romaine jusqu'au moyen âge, en suit à la lettre leurs recettes. Il y a une tendance plus à l'utilisation du mortier romain.

On trouve chez Vitruve³⁰ les recettes de préparation de bons mortiers et qui sont :

« ... Lorsque la chaux sera éteinte, il faudra la mélanger de la manière suivante : on mettra une partie de chaux avec trois parties de sable de cave, ou deux parties de sable de rivière ou de mer; telle est la juste proportion de ce mélange qui deviendra encore meilleur, si on ajoute au sable de mer et de rivière une troisième partie de tuileaux pilés et cassés ».

Dans ce paragraphe Vitruve³¹ montre l'usage de *testa* pour améliorer la résistance des mortiers. Plus loin au chapitre 6 du livre 2, il parle de la pouzzolane, cette poudre volcanique qu'on ajoute au mortier pour le faire durcir sans CO₂ de l'air. « Cette poudre, mêlée avec la chaux et les pierres cassées, rend la maçonnerie tellement ferme, que non seulement dans les édifices ordinaires, mais aussi sous l'eau, elle durcit. ... c'est pourquoi, lorsque la chaux, la pouzzolane et le tuf, engendrés par le feu, sont mêlés et joints ensemble par le moyen de l'eau, ils s'endurcissent promptement, et font une masse tellement solide, que les flots de la mer ne peuvent ni la rompre, ni la dissoudre ».

Si, on vient à résumer l'évolution de la résistance en fonction de la composition en constituants à l'époque antique, on se réfère aux travaux de Vitruve (tableau n° 3)³².

Tableau n° 3 : principales compositions des mortiers chez Vitruve.

Proportion en Liant	Proportion en agrégats	Quantité d'eau en pourcentage
1 partie de chaux	3 parts de sable de carrière	15 à 20
1 partie de chaux	2 parts de sable fluvial ou marin	15 à 20
1 partie de chaux	2 parts de sable fluvial + 1 part de testa pilée	15 à 20
1 partie de chaux	2 parts de pouzzolane	15 à 20

Les mortiers du haut moyen-âge étaient composés ainsi : 300 kg de chaux (CaO) pour 1 m³ de sable, soit 1/4 de chaux éteinte pour 3/4 de sable³³.

II.6.2. Les enduits

C'est une mince couche de mortier appliqué sur les parements d'un ouvrage.

Au moyen âge, VIOLLET-LE-DUC posait le problème du rapport entre structure et décore : Une conception architectonique comporte-t-elle sa décoration ou bien la décoration est-elle appelée

30- Idem, Vitruve. P55, livre (2, 5,2).

31- Opcit, Vitruve P55, livre (2, 5,2).

32- J. P. ADAM, « La construction romaine, matériaux techniques ». Deuxième édition, G. M. Picard. Paris 1989, P78.

33- Idem, Y. M. FROIDEVAUX. P39.

par l'architecte lorsque la composition de l'édifice est arrêtée ? Plusieurs réponses ont été adoptées, dans l'ensemble pour masquer la structure, régulariser les surfaces et les protéger des agressions extérieures³⁴.

Dans le bâtiment, un enduit désigne le plus souvent une ou plusieurs fines couches contenues d'un matériau plastique (plâtre, chaux, ciment ou mortier, terre, ...), dont on revêt un support en vue de son unité, et/ou de sa protection³⁵.

II.6.2.1. Composition

Les compositions des enduits changent selon les localités et les époques. Donc, il est très difficile de citer toutes les compositions utilisées. On s'arrêtera à les citer d'une façon globale. Ce sont des mélanges de liant (chaux grasse ou hydraulique, plâtre), des agrégats (sable, cailloux, céramique broyée), de l'eau et des adjuvants (huile d'olive ou de lin) posés en une ou plusieurs couches.

II.6.2.2. Mise en œuvre

Selon le mode d'application des enduits, on trouve plusieurs procédés, on se limite à la méthode classique. Généralement, cette dernière consiste à projeter directement à la truelle ou au pot de projection perpendiculairement à la paroi. Avant la prise, le mortier sera serré au bouclier par passes successives dans différentes directions.

La mise en œuvre des enduits s'effectue, soit en deux ou en trois couches. Les principales couches sont : le gobetis, le corps d'enduit et la couche de finition (Fig. n° 07).

Le gobetis est la première couche qui assure l'adhérence de l'enduit au support. Elle permet également d'uniformiser la porosité du support³⁶. Sa structure rugueuse doit favoriser l'accrochage de la seconde couche. Son épaisseur doit être faible, inférieure à 5mm.

La deuxième couche à une épaisseur environ 10 mm, est appelée le **corps d'enduit**. Cette dernière permet d'obtenir :

- une surface du support plane,
- une couche d'imperméabilisation d'enduit,
- une bonne adhérence avec la couche de finition.

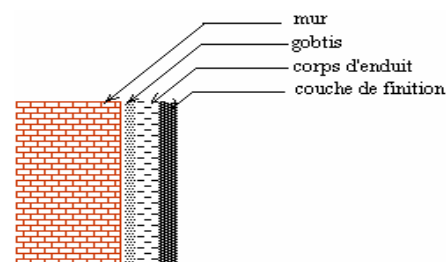


Fig. n° 07 : Différente couche d'enduit de recouvrement.

La troisième couche à un rôle décoratif (**couche de finition**); elle assure, en outre, la protection de la deuxième couche attribuée à la conservation de l'imperméabilisation de l'enduit³⁷. Cette couche à une épaisseur entre 5 à 7mm.

II.6.2.3. Rôle

Les enduits ont plusieurs rôles dans les édifices, on cite :

- La protection et l'isolation contre l'humidité due aux intempéries ou remontées capillaires,
- Isolation thermique et acoustique,
- Adhère aux matériaux, pour mieux transmettre les charges ou créer un écran durable contre les agressions externes, gaz, humidité, etc.
- La présentation, pour dresser les surfaces inégales.

34- Philippe Boudon et Philippe Deshayes, VIOLLET LE DUC. Le dictionnaire d'architecture. éd : Pierre Mardaga. Bruxelles 1979. P12

35- Idem, Ecole d'Avignon. P 67

36- Centre National d'Etude et de Recherches Intégrées du Bâtiment, CNERIB. Travaux d'enduit pour bâtiments : DTR E 6.1. Souidania Alger.

37- Idem CNERIB. P12.

Durcissement du mortier de chaux

Le durcissement de la chaux est dû à la formation d'un agrégat cristallin de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de très faible résistance de même que la formation du carbonate de résistances élevées à la surface du produit (mur). Le durcissement de la chaux aérienne est très lent. Les résistances des mortiers à base de chaux aérienne sont plus importantes seulement après le phénomène de carbonatation c'est-à-dire après la formation de la croûte de calcaire suivant le schéma de la fig n° : 8.

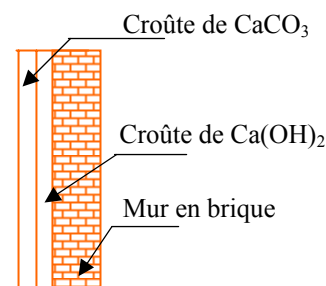
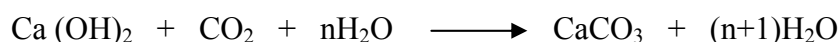


Fig. n° 08 : Vue d'une coupe d'un crépissage à base de chaux aérienne.

La croûte de calcaire formée se colmate et se densifie de plus en plus ce qui la rend pratiquement imperméable à l'eau, sa résistance ne cesse d'augmenter en contact de l'humidité.

II.7. Compatibilité des matériaux de construction

Les éléments de maçonnerie ont par nature un pouvoir absorbant, de sorte que l'eau est extraite du mortier dès que les éléments et le mortier sont mis en contact et par conséquent la quantité d'eau extraite du mortier varie considérablement. Comme la perte d'une quantité d'eau trop importante peut réduire l'ouvrabilité à tel point que le mortier ne peut plus former un liaisonnement complet avec l'élément suivant, l'ouvrabilité et le pouvoir de rétention d'eau devraient être adaptés aux caractéristiques d'absorption des éléments de maçonnerie. Les éléments de maçonnerie qui ont de forts coefficients d'absorption exigent des mortiers ayant une ouvrabilité et un pouvoir de rétention d'eau important.

D'autres facteurs qui agissent sur le durcissement du mortier et qui devrait être pris en considération sont les conditions atmosphériques. Au cours des périodes sèches le mortier doit avoir un bon pouvoir de rétention pour compenser en partie la perte d'eau par évaporation. En hiver, un pouvoir de rétention plus faible est souhaitable parce qu'il permet au mortier de perdre de l'eau avant que la congélation de celle-ci n'ait lieu.

Le bâti ancien est caractérisé sur le plan comportement par :

- des maçonneries sensibles aux déformations,
- des maçonneries sensibles à l'eau.

II.8. Conclusion

A travers cette approche théorique sur les mortiers, on peut dire que la chaux, le plâtre et l'argile servaient à la fabrication des mortiers et enduits durant la période allant de l'antique au médiévale. Ces liants sont mélangés à d'autres charges : le sable, la céramique pilée et d'autres agrégats qui forment le squelette du matériau, ainsi que d'autres ajouts qui améliorent les performances des mortiers qui sont cités dans le tableau n° 3.

La réussite des mortiers anciens dans l'hydrophobisation des structures réside dans l'ajout des matières riche en carbone, les cendres du bois, le noir animal, etc. Cet ajout ne dépasse pas une certaine limite que le maçon détermine par une forte manipulation.

L'enduit de revêtement est une couche sacrifice, sert dans la protection des façades des édifices contre toutes sortes d'agression climatique (température, humidité, ...). Son application doit obéir à une certaine règle de compatibilité avec le support (le derme et l'épiderme).

A noter que la construction ancienne faisait appel exclusivement aux matériaux locaux se trouvant sur le site ou à sa périphérie.

CHAPITRE III

ETUDE DES PHENOMENES DE FATIGUE DES MORTIERS DE CONSTRUCTION.

III.1. Introduction

Les causes d'altération et de dégradation des matériaux utilisés dans la construction des sites et monuments archéologiques sont nombreuses, et s'influencent mutuellement, en raison des multiples phénomènes physiques, chimiques, biologiques et mécaniques qui les régissent et en plus, en raison du couplage entre ces phénomènes¹. Cependant, pour mieux comprendre et expliquer le comportement des mortiers, il faut établir la liaison entre des phénomènes qui se déroulent à l'échelle microscopique et sub-microscopique et les propriétés du matériau².

Selon la situation géographique des sites retenus comme référence à notre recherche, on regroupe communément les risques de destruction et de dégradation en quatre grandes familles :

- aux comportements des mortiers sous contraintes,
- aux altérations chimiques,
- aux détériorations provenant de la préparation du mélange en constituants et à la mise en oeuvre,
- aux facteurs humains et les catastrophes naturelles.

La connaissance des matériaux a été basée depuis toujours, sur les données expérimentales, mais c'est à partir du XVII s., que des essais ont été organisés et programmés dans le but de parvenir à l'ingénieur de projeter et d'analyser les ouvrages, ces lois doivent être représentées de la façon la plus simple possible et telle que les méthodes de calcul mécanique disponibles soient raisonnablement exploitables³.

Aujourd'hui, vu l'avancement technologique, nous nous sommes en mesure d'effectuer des expériences très précises par l'utilisation des méthodes et des techniques de calcul pour évaluer différentes valeurs correspondantes aux effets appliqués. Le chapitre IV traite les principales caractéristiques que nous aurons à faire appel dans notre présent travail.

Des réactions chimiques entre constituants solides, liquides ou gazeux peuvent provoquer des changements de phase ayant des conséquences sur les propriétés physiques et les propriétés mécaniques des mortiers. A leur tour les modifications mécaniques entraînent une chute dans la résistance à la compression des mortiers.

A l'instar des facteurs cités ci-dessus, d'autres provoquent moins de menace sur la dégradation des sites, tels que les effets de l'homme lors de visite due au manque de sa sensibilisation et les catastrophes naturelles en particulier les effets séismiques qui peuvent être enregistrées.

III.2. Comportement du mortier sous contrainte de déformation

Selon la destination des mortiers, ils sont soumis toujours aux diverses contraintes menaçantes leur dégradation et leur disparition. Pour les enduits de revêtement, on enregistre les attaques climatiques. Par contre les mortiers d'hourdages, on pense aux charges excessives ou le poids propre des matériaux qui forment l'ensemble du bâti.

1- M. HAMIANE, M. FELAH et A. BOUKHANOUF, « Etude et essais sur les matériaux architecturaux des murs du site archéologique de la Citadelle d'Alger ». VI^{ème} séminaire international Forum UNESCO, Valancia, Espagne 2001.

2- w. KURZ JEAM, P. MERCIER GERALD ZAMBELLI : « Traite des matériaux de construction Introduction à la science des matériaux ». P7

3- J. DELBECQ et G. SACCHI, « Restauration des ouvrages et des structures », ed : Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris 1993, P55

Le comportement mécanique de mortier est souvent étudié à partir d'essai de compression ou de traction dans lesquels un échantillon est soumis à ces deux essais jusqu'à sa déformation. Cependant, on note que les anciens matériaux sont souvent dotés d'une très faible résistance à la traction par rapport à la résistance en compression.

D'après G. Torraca⁴, le module d'élasticité des matériaux de construction fragile n'est pas constant et on le mesure rarement. Il est préférable de connaître ce module, dans le cas des mortiers de maçonnerie par exemple, afin de pouvoir évaluer la déformation qu'un joint peut supporter. Pourtant, pour que ce module soit utilisable, comme il n'est pas constant, il faudrait spécifier sous quelle compression il a été mesuré, afin d'obtenir des résultats comparables. Les mortiers de chaux, par exemple, ont un module d'élasticité très inférieur à celui des mortiers de ciment; ils se déforment beaucoup plus facilement.

Lorsqu'on effectue des essais au laboratoire à la compression ou à la traction, la bonne préparation des éprouvettes est recommandée, afin de réduire le maximum possible les concentrations de contraintes (Fig. n° 09). Ce phénomène peut arriver dans les cas suivants :

- une irrégularité de la surface d'échantillon, pour les essais de résistance à la compression.
- une fissuration dans la surface d'échantillon, pour les essais de résistance à la traction.

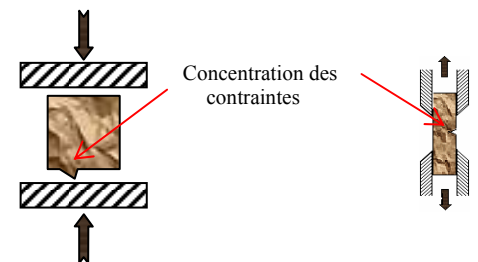


Fig. n° 09 : Effet de concentration des contraintes.

Cependant, certains mortiers à base d'argile (II, 2,3) quant ils sont soumis à des contraintes relativement fortes résistent, mais ils subissent une certaine déformation permanente, il est probable que des micro-fissures se soient formées dans les zones où la contrainte a été excessive. Ces micro-fissures se comportent comme des pores qui auront un effet négatif sur le comportement du mortier.

De point de vue de leur comportement mécanique, le mortier peut être défini comme « fragile » ou, plus précisément, comme dur, rigide et fragile.

La figure n° 1, représente le comportement du mortier qui est considéré comme fragile. Dans un cas idéal, pour les matériaux fragiles, la courbe devrait être une ligne rectiligne, indiquant que la déformation est proportionnelle à la contrainte imposée à l'échantillon. Le rapport contrainte / déformation, représenté par la pente de cette ligne droite, serait alors une constante qui donnerait une idée de la capacité du mortier de s'opposer à tout changement de dimension. Cette constante ne dépend pas de la forme de l'échantillon mais uniquement de la nature du mortier, est appelée « Module d'élasticité ou module de Young ». La valeur du module dépend de la force des liaisons qui relient les atomes et les cristaux à l'intérieur du mortier.

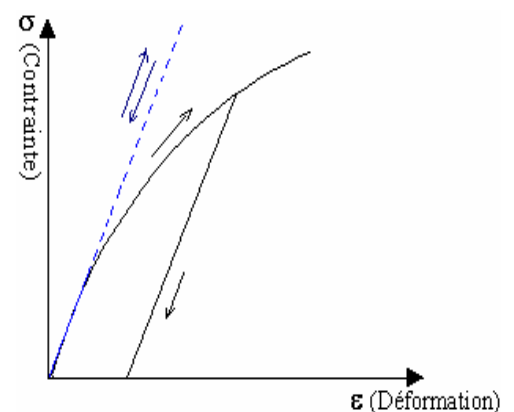


Fig. n° 1 : Contrainte de compression en fonction de la déformation du mortier.

4- G. TORRACA, « les matériaux de construction poreux, science des matériaux pour la conservation architecturale », Traduit de l'original anglais par C. DI MATTEO, éd. ICCROM. Rome 1986.

III.2.1. Cas de maçonnerie fissurée, calcul du déplacement et la rotation

La structure en maçonnerie, par exemple un arc, est composé d'un assemblage de brique dont le comportement peut être conçu comme rigide-parfaitement plastique, intercalés par des joints qui ne sont pas en mesure de supporter la traction (Fig. n° 2).

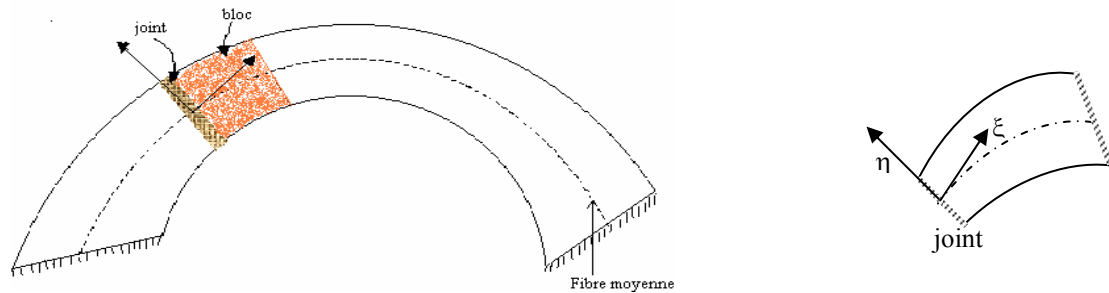


Fig. n° 2 : Présentation d'un arc en maçonnerie.

Le mécanisme de fissuration comporte, comme on peut voir sur la Fig. n° 2, une rotation φ des sections et une dilatation δ .

Les efforts M et N sont respectivement nommés, moment fléchissant et l'effort normal sont exprimés par les équations suivantes :

$$N = \sigma_L b \xi h \quad (1)$$

$$M = \sigma_L b \xi h \left(\frac{h}{2} - \frac{\xi h}{2} \right) \quad (2)$$

D'où

$$M = \frac{N h}{2} \left(1 - \frac{N}{N_0} \right) \quad (3)$$

En ayant posé

$$N_0 = \sigma_L b h \quad (4)$$

N_0 : est l'effort normal limite à moment fléchissant nul.

A partir de la Fig. n° 3, on constate que la rotation φ et la dilatation δ sont reliées par la condition de compatibilité suivante :

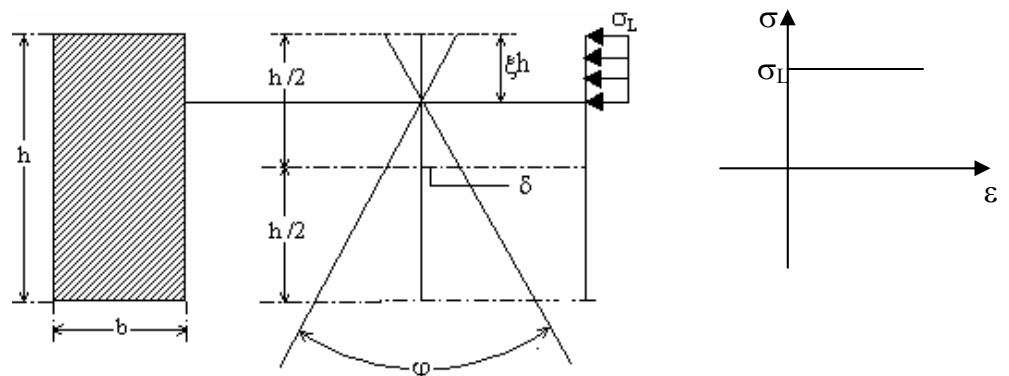


Fig. n° 3 : Présentation schématique du mécanisme de fissuration.

$$\varphi \left(\frac{h}{2} - \xi h \right) = \delta \quad (5)$$

ou encore :

$$\frac{\varphi}{\delta} = \frac{h}{2} (1 - 2\xi) \quad (6)$$

Compte tenu des équations 1, 4, et 6, on peut écrire :

$$\frac{dM}{dN} = - \left(\frac{\varphi}{\delta} \right) \quad (7)$$

L'interprétation géométrique de l'équation est très utilisée, puisqu'elle peut être étendue à plusieurs cas de comportement élasto-plastique des structures.

La représentation graphique de l'équation 4 est dessinée sur la Fig. n° 2. Il s'agit d'une parabole qui coupe l'axe N en $N = 0$. La valeur maximale de $M = M_{\max} = N_0 h / 8$ est atteinte pour

$N = N_0/2$. Sur la Fig. n° 4 sont dessinés les deux arcs de parabole pour M positif et négatif.

Si on définit ϕ_1 et ϕ_2 de la façon suivante :

$$\phi_1 = M - \frac{N h}{2} \left(1 - \frac{N}{N_0} \right) \quad (8)$$

$$\phi_2 = -M - \frac{N h}{2} \left(1 - \frac{N}{N_0} \right) \quad (9)$$

Les points intérieurs au domaine dont la frontière a pour équations :

$$\phi_1 = 0 \quad \text{ou} \quad \phi_2 = 0$$

Satisfont aux inégalités :

$$\phi_1 \leq 0, \quad \phi_2 \leq 0$$

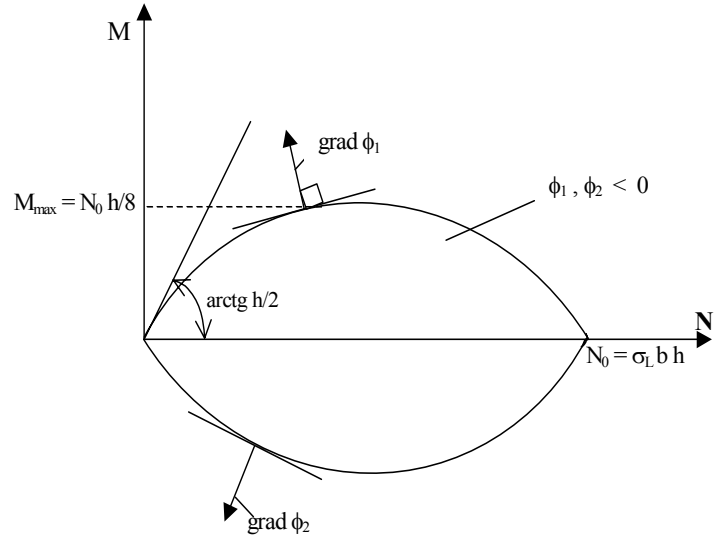


Fig. n° 4 : Présentation schématique du domaine d'interaction.

Qui caractérise tous les couples (N, M) de contraintes licites.

Le gradient des fonctions ϕ_i est représenté par un vecteur normal aux lignes $\phi_i = \text{const}$ dans la direction des ϕ_i croissantes. Il s'agit donc d'un vecteur sortant du domaine $\phi_i \leq 0$, de composantes :

$$\text{grad } \varphi_1 = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial N} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial M} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{h}{2} \left(1 - \frac{2N}{N_0} \right) \\ 1 \end{Bmatrix}$$

on aura donc :

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial N} \times \frac{1}{\frac{\partial \varphi_1}{\partial M}} = - \frac{dM}{dN} = \frac{\varphi}{\delta}$$

Enfin, on peut dire que le vecteur $\{\varphi, \delta\}$ du mécanisme de fissuration pour M et N donnés à la même direction que le gradient $\phi(M, N)$ calculé dans le même point M, N . Un tel comportement est donc standard, et les fissures présentent des déformations plastique en traction.

III.2.2. Critère de rupture pour la maçonnerie soumise à une charge centrée.

D'après HILSDORF⁵, le modèle de comportement basé sur le mécanisme d'interaction entre brique et joints de mortier.

On considère une maçonnerie soumise à une charge centrée (Fig. n° 5). Le frottement entre brique et mortier empêche que les dilatations transversales des deux éléments soient indépendantes, et une telle interaction crée un état de compression axiale et traction latérale bi-axiale dans les briques et un état de compression tri-axiale dans le mortier. La capacité portante de la structure peut donc être supérieure à celle correspondant à la contrainte limite uni-axiale du mortier.

Pour mieux montrer les effets des charges exercées sur la structure en question, on considère les figures n° 6a, 6b et 6c.

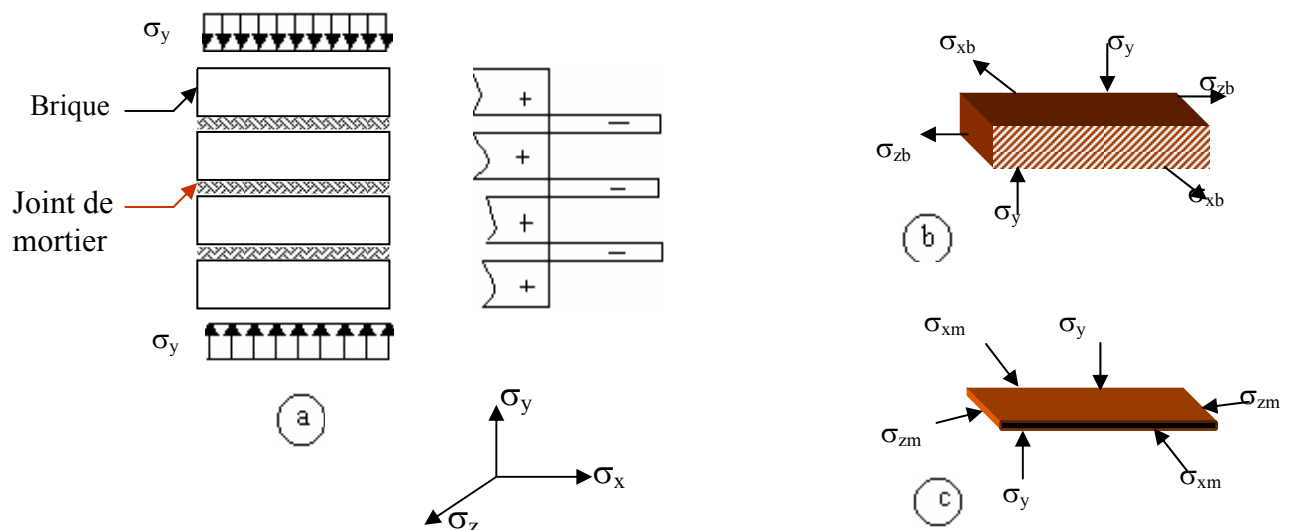


Fig. n° 6 : a- Présentation schématique d'une structure en maçonnerie ancienne.
b- Présentation schématique des efforts exercés sur une brique.
c- Présentation schématique des efforts exercés sur une couche du mortier.

HILSDORF met donc en évidence la nature bi-phasique du matériau en question et affirme que la rupture a lieu lorsque la contrainte efficace maximale $\sigma_y = U\sigma_{ym}$ est supérieure à la résistance à la compression de la brique. U est un coefficient de non-uniformité, rapport entre la contrainte normale maximale et la contrainte normale moyenne. U est fonction de la contrainte et de la résistance du mortier.

Le critère de rupture de HILSDORF pour des panneaux en maçonnerie soumis à une compression simple est schématisé dans la Fig. 7. La droite A représente, en acceptant la théorie de Mohr,

5- J. DELBECQ et G. SACCHI « Restauration des ouvrages et des structures », éd. Ecole nationale des ponts et chaussées, paris 1983, P 227.

l'interaction des contraintes de compression $\sigma_y = U\sigma_{ym}$ et de traction $\sigma_x = \sigma_z$ associée à la rupture de la brique.

L'équation de la droite est :

$$\sigma_x = \sigma_z = f_{bt} \left(1 - \frac{\sigma_y}{f_b} \right) \quad (1)$$

où :

f_b : est la résistance uni-axiale à la compression de la brique

f_{bt} : est la résistance bi-axiale pour $\sigma_x = \sigma_z$.

Les contraintes σ_x et σ_z agissent en même temps sur la couche de mortier. La droite C représente le comportement en régime tri-axial de compression du mortier et correspond à la contrainte latérale de la brique suffisante pour confiner le mortier. Le point $\sigma_2 = 0$ indique la résistance uni-axiale à la compression du mortier. On adopte pour la résistance tri-axiale du mortier la relation 2 :

$$\sigma_x = f_j + 4,1 \sigma_2 \quad (2)$$

où :

$\sigma_2 = \sigma_x = \sigma_z$: est la contrainte latérale de compression,

σ_y : est la contrainte de compression,

f_j : est la résistance uni-axiale de compression du mortier.

L'équilibre entre la résultante des contraintes latérales de traction σ_{xb} agissant sur la brique de hauteur b , et la résultante des contraintes latérales σ_{xj} de compression du joint de mortier d'épaisseur j est traduit par la relation suivante :

$$\sigma_{xb} b = \sigma_{xj} j \quad (3)$$

Puisque $\sigma_{xj} = \sigma_2 = \frac{1}{4,1} (\sigma_y - f_j)$, l'équation de la droite C est :

$$\sigma_x = \sigma_{xb} = \frac{j}{4,1b} (\sigma_y - f_j) = \alpha (\sigma_y - f_j) \quad (4)$$

La contrainte locale de rupture est définie par le point d'intersection des droites A et C ; c'est-à-dire :

$$\sigma_y = f_b \frac{f_{bt} + \alpha f_j}{f_{bt} + \alpha f_b} \quad (5)$$

A l'aide du coefficient U_u on a la valeur moyenne de la contrainte à la rupture :

$$\sigma_{ym} = \frac{\sigma_y}{U_u} \quad (6)$$

et en posant $\sigma_{ym} = f_m$ (résistance de la maçonnerie comprimée)

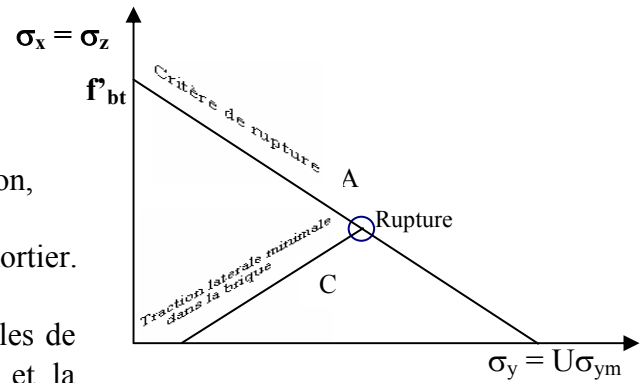


Fig. n° 7 : Critère de rupture HILSDORF pour des panneaux en maçonnerie.

$$f_m = \frac{f_b}{U_u} \frac{f_{bt} + \alpha f_j}{f_{bt} + \alpha f_b} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{j}{4,1b} \quad (7)$$

Hildsford a obtenu un bon accord entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques, et a remarqué que des difficultés importantes résident dans l'évaluation de f_{bt} et U_u . Le même auteur indique $1,1 \leq U_u \leq 2,5$ décroissant avec l'inverse de la résistance du mortier.

III.3. Contraintes externes

Les mortiers de construction subissent souvent des contraintes de leur environnement qui peut provoquer des dégradations, surtout dans le cas où les murs sont soumis à des contraintes de traction. Ces contraintes permanentes provoquent une accélération globale de la vitesse d'altération. Plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine de fortes contraintes, à savoir : les charges, expansion thermique, expansion due à l'humidité, contraintes provoquées par les travaux d'intervention, etc.

III.3.1. La dilatation thermique

Les écarts thermiques provoquent une expansion et une contraction variable selon la nature des minéraux qui composent la couche d'enduit. Il se crée des tensions internes par différentes dilatations entre les enduits et le support (brique, pierre, pisé, etc.).

Il arrive souvent, des maçonneries anciennes en contact avec des structures de renforcement modernes subissent une détérioration accélérée, qui peut s'expliquer par la présence de ces fractures microscopiques⁶.

III.3.2. Expansion à l'humidité

Les mortiers de construction se dilatent quand ils absorbent de l'eau et se rétractent quand ils le perdent. Cependant, l'effet provoqué par ce facteur est moins dangereux par rapport aux contraintes provoquées par les effets de la variation de température.

III.3.3. Détérioration provenant de la préparation du mélange en constituants et la mise en œuvre des mortiers

Dans les travaux d'intervention, il faut toujours veiller aux principes de conservation et de restauration.

Ainsi, il faut considérer un monument comme un malade, toute intervention doit être soumise à un bon diagnostic. L'exemple du mauvais choix de la composition du mortier de réparation au niveau du mur de soutènement de la balustrade des appartements du palais du Dey a provoqué la courbure du marbre exposé à l'abri des conditions environnementales. Ce phénomène est expliqué par la différence des coefficients de dilatations de ces matériaux (Fig. n° 8).



Fig. n° 8 : Effets du mauvais choix des mortiers de réparation (mortier à base du ciment).

Ce facteur peut se manifester par plusieurs effets entre autres : un manque d'adhérence, une perte de dureté, une Porosité importante, la présence de fissure, l'absence de cohésion.

6- Idem, G. TORRACA, P 30.

III.3.3.1. Le manque d'Adhérence

Le manque d'adhérence entre l'enduit et le support se traduit par un décollement en plaque, un gonflement ou un cloquage à la surface.

Pour les Enduits, il est conseillé d'effectuer systématiquement un sondage pour identifier la bonne tenue du revêtement en « sonnant à l'aide du doigt ou d'un outil, si l'enduit est bien accroché, il rendra le son de son support ».

Les décollements sont souvent accompagnés des fissures, il faut alors sonder l'enduit de part et d'autre de la fissure et constater, s'il sonne creux pour les peintures à la chaux, le manque d'adhérence s'observe par la formation d'écaille que l'on soulève avec l'angle.

III.3.3.2. La perte de Dureté

On évalue la dureté des enduits en testant le revêtement avec un objet métallique pointu (clou, tournevis), si l'enduit a perdu de sa dureté, le clou s'enfonce ou raye la surface. Pour les peintures à la chaux, la dureté s'apprécie en grattant à l'angle, un badigeon apparaît plus claire dans la partie dégagée.

III.3.3.3. la Porosité importante

Pour évaluer la porosité du support, il suffit de le mouiller, en faisant couler de l'eau sur le mur et en mesurant le temps d'absorption, sur support vertical, la hauteur du ruissellement est facile à apprécier, si l'eau est pompée rapidement, le support est trop absorbant.

III.3.3.4. Présence de fissure

Visibles à l'œil nu, elles apparaissent fines ou larges uniques ou en réseau. L'humidification du mur peut être un moyen de mieux localiser les fissures qui on peut classer en quatre types :

a. Le faïençage

Caractérisé par un réseau reconnaissable de petites fissures linéaires superficielles inscrites dans une surface d'environ 20 cm².

b. Les micro-fissures

Se sont des ouvertures discontinues d'une largeur inférieure à 0.2mm.

c. Les fissures

Elles sont plus larges que les micro-fissures (0,2 - 2mm).

d. Les lézards

Elles affectent l'enduit mais aussi le support et leurs largeurs sont supérieures à 2mm.

e. L'absence de cohésion

Elle se manifeste à l'œil nu par un effet de farinage du support, la vérification de la cohésion de l'enduit ou de la peinture s'opère au toucher. Le simple frottement de la main suffit à constater le phénomène. Le grain de l'enduit roule sous le doigt, le badigeon farine.

III.3.4. Action des charges

D'autres anomalies qui ont provoquées le déséquilibre de structures au niveau du palais du Dey, on note la partie Est étaie au rez-de-chaussée et au premier niveau depuis l'époque de PKZ (Fig. n° 9). L'étalement utilisé est en bois, le chaîne, qui se caractérise par une très bonne résistance à la compression.

L'effet de tassement des structures est l'un des facteurs réels dans la dégradation des monuments historiques. Le nombre d'étage et le poids volumique des matériaux sont parmi les facteurs que l'ingénieur devra veiller. A l'instar des ces facteurs qui répercute sur le vieillissement des bâtisses, le type d'intervention aussi à une action directe sur l'état des structures. L'exemple de la partie Est du palais du Dey est parmi la longue liste de ces facteurs.



Fig. n° 9 : Photo montrant une structure éayée, palais du Dey.

Les charges que subissent les murs du rez-de-chaussée ne s'effectuent pas d'une manière uniforme, il y a des zones qui se tassent et d'autres qui prennent leurs équilibres provoqués par les parties éayées au cours de la période des travaux d'urgence effectués dans les années 1980. En conséquence, une légère inclinaison provoquée dans cette partie de palais.

Afin de mettre en évidence ce phénomène technique, nous avons arrêté dans la partie pratique, chapitre III, un exemple du calcul statique de structure pour vérifier ces effets de tassement et d'autres facteurs en relation avec la détérioration des mortiers constituent cette façade.

III.3.5. Erosion alvéolaire

Ce phénomène se produit fréquemment sur les surfaces exposées aux vents forts ou l'évaporation de l'eau circulant dans les pores est accélérée⁷. Dans ce cas, les dommages causés par la cristallisation vont en s'accroissant au fur et à mesure que la cavité se creuse, il y a la formation de tourbillons d'air. Ces effets d'érosion alvéolaire sont fréquemment rencontrés dans les deux sites, mais celui de Djemila est exposé plus par rapport aux vents ce qui rend sa dégradation par cet agent est importante, cela se manifeste par les surfaces des murs rigoureuses (Fig. n° 10).

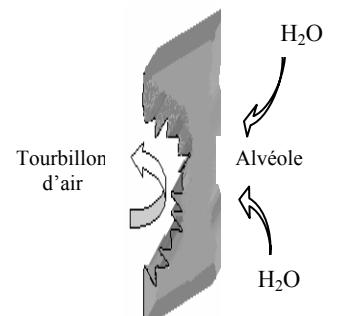


Fig. n° 10 : Effet alvéolaire Sur une paroi

III.4. Contraintes internes

Les mortiers peuvent subir à l'intérieur des pores des contraintes quand les cristaux de glace se forment, et cela sous l'effet du gel ou quand l'eau s'évapore et laisse à l'intérieur des pores des cristaux de sels. Dans les deux cas, par diverses formes de croissance des cristaux, qu'ils remplissent le pore, et exerce des contraintes sur ces parois qui peuvent se finaliser par sa destruction.

III.4.1. Le gel/dégel

L'action du gel et dégel est le facteur le plus dangereux et qui provoque le péril des matériaux, il faut toujours prendre les mesures nécessaires dans ces types de climats !

L'eau logée dans les pores des matériaux sous l'effet de la chute de température (température de congélation d'eau) augmente son volume. S'il n'existe pas suffisamment d'espace vide dans les capillaires pour permettre l'expansion de l'eau, elle exerce de pression qui peut engendrer la destruction du matériel.

Ces phénomènes ne sont pas toujours purs; il existe souvent des hétérogénéités locales c'est à dire, il y a dans certaines points des teneurs en eau plus élevée ou des gradients de température

7- Idem, G. TORRACA, P31

qui provoquent des sollicitations dans des zones particulières. Donc, il peut arriver la détérioration du mortier qui a subi la fatigue, dû à la répétition des contractions et des expansions sous l'effet de gels et dégels consécutifs.

Le site de Djemila est menacé par ce type d'agent. Il est soumis au climat très froid en hiver, où la température peut être baissée jusqu'à -10°C . A cette température, l'eau se transforme entièrement en glace dans les pores et les capillaires des mortiers qui exercent diverses contraintes sur les proies. La fig. n° 11, montre les ruines de Djemila sous la neige qui provoque l'humidification des structures et la congélation de l'eau existante dans les pores des mortiers des charges supplémentaire qui peuvent provoquer à leur tour des dégâts.



Fig. n° 11 : Photo montrant les ruines de Djemila sous la neige.

Malgré ce site est tombé en ruine, on pose toujours la question sur le reste des structures qui restent jusqu'à présent. *Quel est le secret de la durabilité de ces mortiers ?*

III.4.2. La cristallisation des sels solubles

Si on fait réagir un acide sur une base, on obtient un sel et de l'eau. En effet, les sels qui sont dangereux pour les mortiers sont les sels solubles dans l'eau.

L'action de l'eau sur le mortier est de dissoudre les sels qui pourront faire une liaison avec les composants de ce matériau. Dans le cas de carbonate de calcium, sa solubilité dans l'eau est évaluée à $1,6 \text{ g/cm}^3$.

Quand le mortier sèche, la quantité d'eau contenue dans ce dernier diminue tandis que celle des sels ne change pas.

Des tensions apparaîtront au moment où les grands pores seront pleins de cristaux, s'il reste de la solution dans les petits pores. Dans ce cas aussi, le rapport du volume des petits pores à celui des grands déterminant l'intensité de la contrainte. Les tensions les plus fortes ont toujours lieu dans les matériaux ayant une proportion importante de petits pores⁸.

Généralement, les sels qui forment des cristaux hydratés (sulfate de sodium, carbonate de sodium, sulfate de calcium, etc.) sont des sels volumineux. Quand ils se forment à l'intérieur des pores des mortiers, ils occupent facilement ses vides, et provoquent une poussée avec plus d'intensité (Fig. n° 12 a et b).

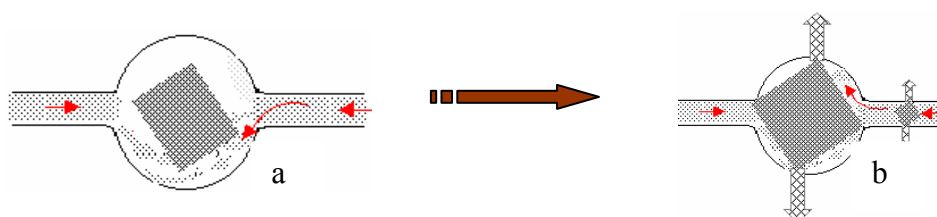


Fig. n° 12 : Effet de la cristallisation des sels soluble.

a- Formation et croissance du cristal

b- Le cristal remplit le pore, une pression se crée.

8- Idem, G. TORRACA, P 31.

Ces sels hydratés sous l'effet de la température ambiante se transformant en cristal moins hydraté, en libérant quelques molécules d'eau, le volume final est plus grand de celui du cristal d'origine, provoquant ainsi des contraintes qui engendrent la déformation des mortiers.

L'effet des sels sur les mortiers des deux sites est très rependu surtout dans le cas du site de Djemila (Fig. n° 13), par contre celui de la Citadelle d'Alger, on les rencontre surtout dans les mortiers de couleur blanche sous forme d'aiguilles.

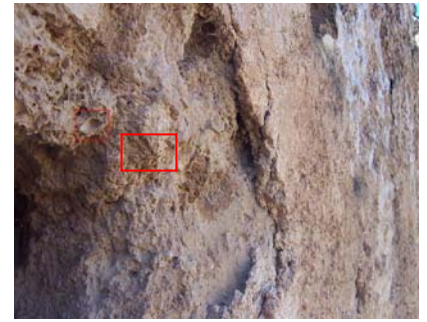


Fig. n° 13: Photo montrant le vieillissement d'une structure et formation des sels dans les pores.

III.5. Altérations chimiques

L'action de l'eau est indispensable pour expliquer le mécanisme d'altérations chimiques. Le mouvement de l'eau est fonction des caractéristiques de la structure : porosité, capillarité, perméabilité⁹. Ces caractéristiques sont liées directement au dosage en constituants, au mode de préparation et à la mise en œuvre des mortiers.

Une étude menée par G. Mamilan¹⁰ sur le phénomène de détérioration des pierres due à l'effet de porosité et vérifiée sur l'étude des pierres de « Tervoux » qui sont constituées de pores qui dans l'ensemble sont inférieurs à 5μ et les pierres de Savonnières, constituées de gros pores compris entre 4 et 40μ . Cette importante quantité de gros pores permet d'expliquer la plus faible absorption de la pierre de Savonnières par rapport à la pierre de « Tervoux », qui est pourtant beaucoup moins poreuse. Il a constaté que l'eau monte plus facilement dans les structures à canaux fins.

III.5.1. Action de l'eau de pluie

L'eau existant dans la couche des mortiers en particulier les enduits de recouvrement peut véhiculer et entraîner la dissolution des sels solubles qui seront transportés et déposés à la surface par évaporation. Ces sels se manifestent par diverses taches d'efflorescences : blanchâtres, verdâtre, etc. sur la surface extérieure (Fig. n° 14).



Fig. n° 14 : Photo montrant la présence des taches d'efflorescence sur la surface du mur- Citadelle d'Alger

La durabilité des mortiers exposés aux intempéries ou aux remontées d'eau provenant du sol chargé des sels, dépendra essentiellement de la nature du gel et du gonflement provoqué par ces sels.

D'après G. Torracca¹¹, les matériaux qui contiennent de l'argile, la dilatation sous l'effet de l'humidité est importante, elle peut provoquer des contraintes importantes, notamment entre la surface et sa partie interne quand la surface est mouillée, le cas de pisé.

III.5.2. Efflorescence

La résistance mécanique des mortiers dépend directement de sa porosité. Cette dernière que contiennent les matériaux depuis son durcissement peut s'agrandir sous l'effet de l'humidité.

9- Idem, G. TORRACA, p 31

10- M. MAMILAN « Pathologie et restauration des constructions en pierre », Rome 1972. P 19.

11- Opcit, G. TORRACA, P 31

L'action de cette humidité peut dissoudre certains sels solubles et sous l'effet de la chaleur se rendront sur la surface du support. Ces sels s'effritent facilement, laisse ainsi une porosité. Cette accumulation de dégradation agisse sur la durabilité des mortiers.

III.5.2.1. Les principales couleur des taches des sels et leurs nocivités

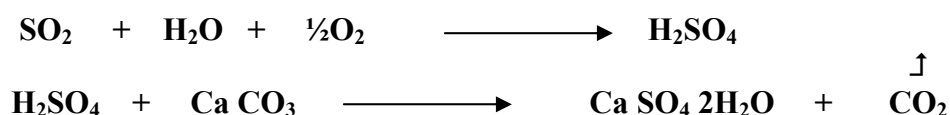
La présence des taches sur la face de l'enduit de recouvrement nuit à l'esthétique du mur. Les taches d'efflorescences peuvent provenir, soit de la composition du mélange, en contact des autres matériaux ou d'une origine accidentelle (tableau n° 4).

Tableau n° 4 : principales couleur des tâches des sels et leurs effets

Sels	Taches	Effets	Nocivité
Carbonate de calcium, des sulfates, des chlorures, ...	Blanchâtre	Efflorescences	Moins nocifs
Sels alcalins (provenant des ciments)	Brunâtres ou Rougeâtres	Cryptoflorescences	Nocifs
Principal composé des lichens	Verdâtres	-	Moins nocifs

III.5.3. Action des fumées

La détérioration peut provenir de la réaction chimique entre les mortiers de maçonnerie et les gaz de l'atmosphère. L'anhydride sulfureux, sous l'action de la vapeur d'eau, du brouillard, de neige, de pluie, le SO₂ se dissout pour produire l'acide sulfureux H₂SO₃. Il se dépose sur la surface des mortiers et forme le sulfate de calcium hydraté.



III.5.4. Dégradation provoquée par la corrosion des métaux

Les métaux à leur tour participent dans la dégradation des mortiers. Cette dernière ne se fait que dans des milieux humides dans lequel les éléments de fer réagissent avec certains éléments de mortier. Cette réaction affaiblie les deux éléments aux même temps. La corrosion se manifeste sous forme d'efflorescence qui par la suite agisse sur le comportement du matériau.

III.5.5. Cycle d'humidification -Assèchement (phénomène de condensation)

Dans les milieux humides ou les jours de brouillards, la condensation d'eau sur la surface du support recouvert en général par un enduit de revêtement provoque plus de dégâts que l'action directe de la pluie (Fig. 15.a), parce qu'elle se réagit lentement avec toutes les fractions de particules existantes sur le support. Cette solution acide formée va être absorbée par le matériau et provoque ainsi leurs effets (Fig. 15.b), mais cette eau revient en surface pour s'évaporer quand les conditions d'assèchements prévalent (Fig. 15.c).

La répétition de ce cycle humidification / assèchement crée des détériorations dans la phase d'humidification (à cause de l'attaque acide) et dans la phase assèchement (à cause de

la cristallisation des agents polluants et des produits de réaction)¹². L'évaluation des dégâts est facilement reconnaissable par la formation d'une patine fragile sur la surface des enduits.

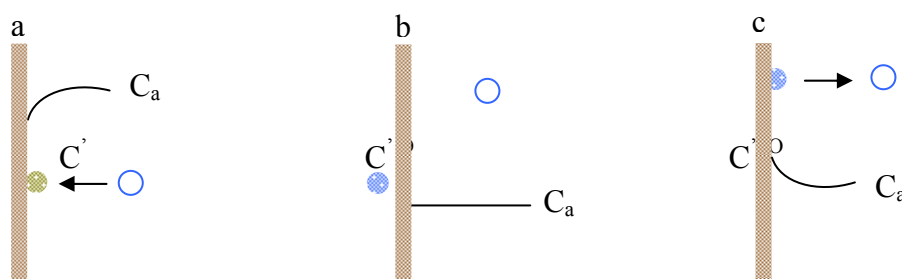


Fig. n° 15 : représentation schématique du cycle d'humidification – Assèchement

a : condensation de la vapeur d'eau sur une surface,

b : surface humide,

c : surface humide, il peut se produire une évaporation.

C_a : Concentration de la vapeur dans l'air ambiant

C' : Concentration maximale de la vapeur

Ainsi, ce phénomène provoque la fatigue de l'enduit ce qui engendre son détachement sur le support.

III.5.6. Attaque dans une atmosphère polluée

Elle provient surtout de la composition des hydrocarbures qui produisent de l'anhydride sulfurique qui en temps humide se transforme en acide sulfurique. Cet acide en contact du mortier, va former un sel légèrement soluble dans l'eau; le gypse (sulfate de calcium).

L'eau chargée d'anhydride carbonique ne peut plus réagir qu'avec le carbonate de calcium. La faible acidité de la solution transforme lentement le carbonate de calcium en bicarbonate soluble, puis il se re-dépose sur la couche picturale en un voile plus ou moins épais (calcite peu soluble), efflorescence¹³.

Sur les surfaces exposées aux intempéries, le gypse est dissout par l'eau; l'enduit reste saint et se salit assez peu. Parfois cette eau mélangée de gypse est absorbée par le sol et l'enrichit aux sels solubles qui peuvent pénétrer dans l'enduit de la façade et provoquent des endommagements. Dans le tableau n° 5 présent les principaux polluants qui peuvent agir et détériorer les mortiers de construction.

Sur les façades moins exposées à l'eau de pluie, il se forme une couche de gypse qui fixe les poussières et lui donne une couleur noirâtre (Fig. n° 16).

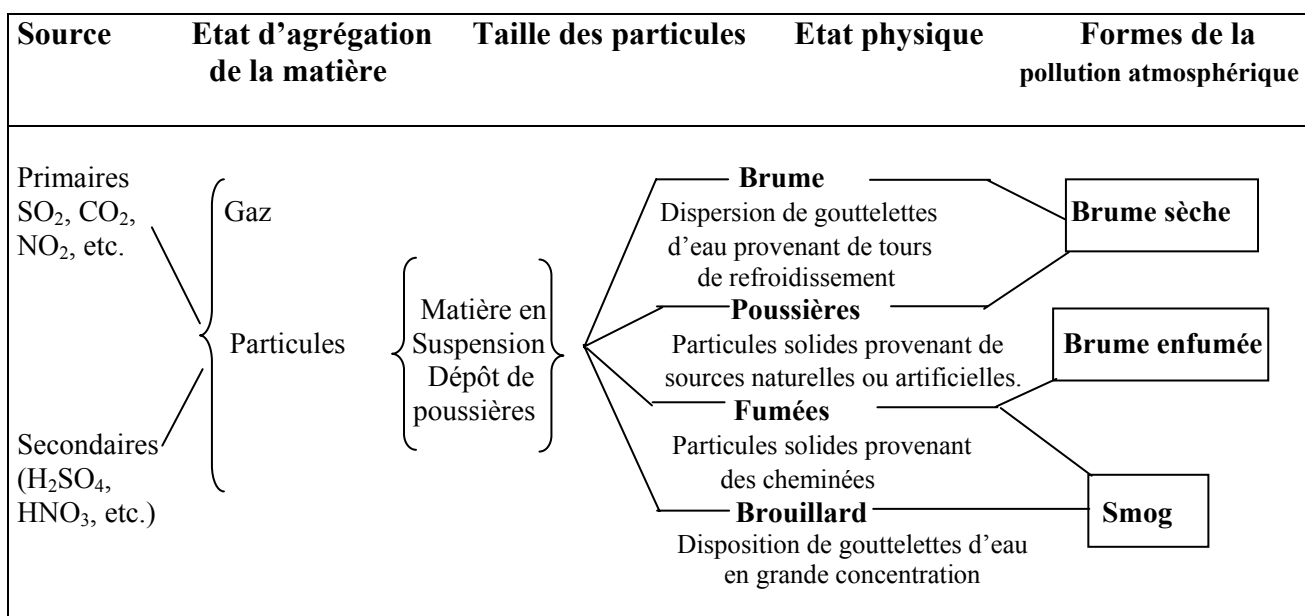


Fig. n° 16 : Photo montrant l'effet de la pollution atmosphérique

12- Idem, G. TORRACA. P 42.

13- M. Cl. Berducco, « la conservation en archéologie ». ed. Masson, Paris, Milan, Barcelone, Mexico 1990. P 309

III.5.6.1. Tableau n° 5 : Classification des polluants¹⁴



III.5.7. Climatologie de la pollution atmosphérique

Le degré de pollution de l'air est lié directement à la quantité d'agents polluants produite et aux facteurs météorologiques à savoir : l'humidité et la température. Les effets produits n'ont pas assez d'influences sur les sites étudiés, surtout celui de Djemila.

III.6. Actions des agents biologiques

Si la pollution chimique et les phénomènes physiques et mécaniques sont les principaux facteurs d'altération des matériaux, l'activité microbienne peut également être à l'origine de certains dégâts, que l'on désigne par le terme général de bio-détériorations¹⁵.

La biodégradation est plus ou moins importante suivant la composition, elle dépende directement de la composition des mortiers et du milieu environnant. L'activité de ces micro-organismes demande un climat favorable pour développer leurs effets dangereux sur les mortiers. Les organismes microscopiques, la croissance des plantes, sont aussi générés par ce milieu. L'explication des effets de dégradation des mortiers par cet agent est très compliquée, on se limite aux effets des algues, les lichens et les plantes supérieures.

III.6.1. Les algues

Végétal chlorophyllien, sans racines ni vaisseaux vivant dans l'eau de mer, l'eau douce, ou moins dans l'air. Elles peuvent former des patines ou des couches d'étendue, d'épaisseur, de consistance et de couleurs variables. Les patines sont minces, dures, parfois vertes mais généralement grises ou noires dans les endroits bien éclairés et relativement secs; elles sont épaisses, gélatineuses et de couleurs variables dans les endroits peu éclairés et humides¹⁶.

L'effet provoqué par les algues est fréquent en atmosphère humide, ils peuvent contribuer à la production de certains acides qui seront responsable de la dégradation des mortiers.

14- « La dégradation et la conservation de la pierre, textes des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre ». Publie sous la direction L. LAZZARINI, R. PIEPER, CC/88/WS.8, P95.

15- A. PHILIPPON, D. JEANNETTE, RRR. A. LEFEVRE, « La conservation de la pierre monumentale en France ». Presse de CNRS, ISBN 2-87682-059-5. France 2002, P95.

16- Petit dictionnaire LAROUSSE en couleur. Montparnasse, Paris VI^e – P 29.

La présence des algues sur les façades des murs de la Citadelle d'Alger est constatée dans les murs où les conduites de canalisation en terre cuites sont descendues des terrasses des monuments (Fig. n° 17).



Fig. n° 17 : Présence d'algues sur le mur intérieur des cuisines du Dey.

III.6.2. Les lichens

Végétales vivant sur le sol, les arbres, les pierres, formé d'un thalle aplati ou rameux, ils vivent associés avec un champignon ou une algue, les lichens appartiennent à la classe des thallophytes, elles résistent à des conditions extrêmes de température et de sécheresse¹⁷.

Les lichens jouent un rôle important dans la colonisation des mortiers, ils altèrent les mortiers en exerçant une action aussi bien chimique que mécanique. Ces actions chimiques se caractérisent par : Production d'acide carbonique; excrétion d'acide oxalique; production de composés lichéniques hydrosolubles qui peuvent former des complexes métalliques solubles

Le gaz carbonique produit par la respiration se dissout dans l'humidité retenue par le thalle et forme de l'acide carbonique qui peut altérer le substrat.

Par l'action de mouillage- séchage, les thalles lichéniques exercent une force physique sur ces surfaces par contraction et expansion mécanique, ce qui conduit au détachement des fragments minéraux du substrat en s'incorporant au thalle.

Pour les mortiers, les acides produits par les lichens réagissent directement avec ses minéraux, provoquant leur destruction par épuisement des cations basiques tels que le Magnésium (Mg^{++}) et le Calcium (Ca^{++}) et un détachement au niveau de son épiderme.

III.6.3. Les plantes supérieures

Les mortiers à base d'argile sont souvent menacés par les racines des herbes, des buissons ou des arbres qui peuvent provoquer la rupture des structures en maçonnerie. Ce type de mortier, peut constituer la nourriture des plantes surtout s'ils sont fragilisés par l'eau.

III.7. Facteurs humains et catastrophes naturelles

Ces catastrophes occasionnent aux biens culturels les dommages les plus importants et les plus brutaux. Survenant épisodiquement dans la vie des hommes, leur pouvoir de destruction est trop souvent négligeable mais c'est le pire qui puisse arriver à un monument. Pour apprécier le degré de risque d'un site, l'histoire de ce site doit être consultée, les archives et la mémoire humaine fournissant les éléments d'appréciation¹⁸.

Il faut ajouter à ces attaques naturelles, celles qui sont dues à l'homme et celles provoquent par les vandalismes graffitis.

III.7.1. L'homme

L'homme, par ses actions multiples, est le principal acteur de la détérioration des sites archéologiques.

17- D. Guillemard & C. Laroque, « Manuel de conservation préventive », gestion et contrôle des collections. Université Paris I, année 2001

18- Idem, D. Guillemard. P 5.

Un tourisme incontrôlé et anarchique est un danger potentiel pour le patrimoine culturel en général et pour le patrimoine archéologique en particulier. Il ne s'agit pas simplement de faire visiter les sites parce que cela rapporte de l'argent mais il faut aussi établir des normes et des règles à respecter sur place.

Les touristes, lorsqu'ils ne sont pas sensibilisés et avertis des dangers que leur présence peut représenter pour les sites archéologiques constituent une véritable menace pour ces derniers. La Fig. n° 18, montre la sensibilisation des élèves d'écoles.



Fig. n° 18 : Photo montrant la place des sèvres.

III.7.2. Vibration due au trafic et leurs effets sur les constructions.

D'après G. TORRACA, le trafic routier provoque des vibrations du sol et des constructions.

L'amplitude de ces vibrations comprise entre 2 à 25 microns à des fréquences de 10 à 30 HZ.

L'effet provoqué par ce facteur est de fragiliser les structures. Cette menace a déjà provoqué en juin 2004 l'effondrement d'une partie des Casemates, côté Est de la Citadelle.

III.7.3. Les facteurs sismiques

La régularité structurale permet de répartir correctement les charges sismiques sur les éléments porteurs et d'optimiser ainsi le comportement dynamique de la structure. Il est préférable d'opter pour¹⁹ :

- la superposition des éléments porteurs verticaux,
- des travées régulières,
- une même longueur libre pour tous les poteaux participant au contreventement,
- une rigidité horizontale comparable des différents niveaux, sous peine d'entraîner un « effet de niveau flexible ».

19- « Guide de la conception parasismique des bâtiments », association française du génie parasismique, éd : Eyrolles, Paris 2004, P 50.

III.8. Conclusion

La dégradation des sites archéologiques est liée directement aux phénomènes naturels qui sont une menace sérieuse pour leur pérennité; mais, celle liée aux actions de l'homme est la plus préoccupante. L'analyse et le constat effectués montrent que les causes de dégradation des mortiers de construction sont engendrées essentiellement par :

Djemila

Ce site tombé en ruine depuis des années se trouve de plus en plus en péril, nécessite une politique visant sa conservation et sa mise en valeur. Sa richesse en matériaux et techniques de construction d'une part, et la diversité des facteurs d'altérations et de dégradations d'autre part, mérite d'être étudié afin de tirer des leçons et d'enrichir nos bibliothèques.

L'état d'altération et de dégradation des mortiers du site archéologique de Djemila est très avancé car plusieurs facteurs influent d'une façon directe sur ce matériau, ces actions se résument dans : l'action du gel/ dégel, altérations chimiques et catastrophes naturelles. Cette complexité des agents de dégradation est aggravée par l'absence d'une politique de préservation solide, ces facteurs sont les causes directes qui provoquent le risque de la disparition de la structure du site.

La Citadelle d'Alger

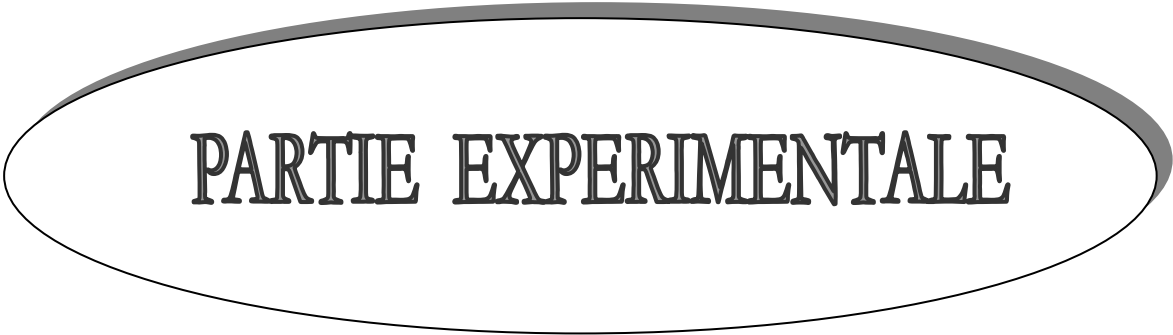
La poussée d'arbre sur ou à proximité des murs témoigne de la présence importante de l'humidité dans les maçonneries et de la matière organique dans les mortiers. Il est à remarquer que ce facteur est très agressif vis-à-vis de la stabilité de la maçonnerie. En effet, les racines pendant leur évolution exercent des poussées très importantes qui provoquent des craquements, et parfois même des arrachements.

L'état de fissuration avancé de certaines parties des murs favorise d'avantage l'infiltration des eaux qui altèrent les mortiers qui sont essentiellement constitué de terre. Ce phénomène engendre la perte de sa compacité et sa rigidité.

Les mortiers sont altérés aussi sous l'action combinée des eaux de pluie et de celle de la pollution atmosphérique.

Il apparaît donc clairement que les mortiers de maçonnerie et des enduits de revêtement de la citadelle d'Alger sont depuis longtemps agressés par des facteurs naturels dont le manque d'entretien, et accéléré le processus de vieillissement et de dégradation. Cet état de conservation est aggravé par l'absence des systèmes d'étéaiements dans certaines parties de l'ensemble architectural, dans d'autres étaient depuis les années 1980 à ce jour. Ce dernier joue actuellement le rôle inverse parce que dans les tronçons étayés, le tassement s'effectue différemment des autres parties de la structure.

En fin, grâce à une volonté conjuguée de la part de l'ANAPSMH et aux efforts consentis par le ministère de la culture, ce patrimoine culturel pourra survivre encore et restera le témoin potentiel du passé.



PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I

METHODOLOGIE D'ESSAI ET CARACTERISATION DES MORTIERS ARCHEOLOGIQUES.

I.1. Présentation

Le diagnostic visuel est important dans l'étude des mortiers de construction d'un site historique, la référence aux diverses sources documentaires s'avère très fructueuse pour dater certains monuments et préciser les matériaux utilisés.

Afin de confirmer ces constatations et informations historiques, l'appel à la caractérisation des mortiers au niveau du laboratoire est plus que nécessaire. Ces analyses peuvent se résumer en quatre types :

- analyses chimiques,
- analyses physiques,
- analyse mécaniques,
- analyse structurale.

Dans l'analyse chimique, on fait appel tout d'abord aux techniques d'analyses traditionnelles, aux différents tests avec l'acide chlorhydrique, à l'acide sulfurique, le PH des solutions et par la suite on procède à l'analyse par fluorescence aux rayons X.

La connaissance de la technologie des mortiers se base sur la détermination des caractéristiques physiques tel que: la masse spécifique, la masse volumique, la porosité, l'absorption d'eau, etc.

Cependant, l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques : analyse chimique, minéralogique et l'étude d'imagerie obtenue au moyen du microscope électronique à balayage, etc. sont les principales investigation pour une meilleure connaissance de la technologie des mortiers employés.

L'étude du comportement mécanique des mortiers de construction à long terme est un problème très compliqué, il dépend au moins de trois paramètres essentiels à savoir : la technologie de préparation, les conditions de mise en oeuvre et leur environnement dans lesquels ils sont mis en place. Dans ce contexte, nous avons procédé à la détermination de la résistance mécanique à la compression, la friabilité et le coefficient de ramollissement.

I.2. Choix des échantillons

Le choix des échantillons est toujours une question de préoccupation des chercheurs. Il est considéré comme un besoin vital et une base pour toute caractérisation des mortiers archéologiques. Ce choix demande beaucoup de prélèvements, ce qui contredit les principes de conservation des biens culturels.

Dans le prélèvement et le choix des mortiers, il faut prendre trois considérations :

- les mortiers sur support architectural (pierre, brique, bois, pisé, etc.) exposé aux agressions climatiques,
- les mortiers sur support architectural biens préservés,
- les mortiers détachés de support architectural.

Suivant les objectifs tracés dans le présent travail (caractérisation des mortiers, connaissance de la technologie ancienne, état de préservation des mortiers, etc.) nous avons opté aux deux derniers cas cités ci-dessus. A noter que la détermination des compositions de mortiers nécessite un choix des échantillons les mieux préservés, par contre l'étude de préservation des mortiers nécessite un choix des échantillons les moins préservés (cas défavorable).

I.3. Description des méthodes d'essais

L'analyse de la texture et la détermination des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des mortiers composant les murs sont d'une importance déterminante, car elles sont liées étroitement à leur usage.

Afin de procéder à cette caractérisation, il faut considérer les mortiers comme étant des roches pour lesquelles on applique les différentes méthodes d'essais, et par conséquent on tire les particularités et les informations recherchées.

I.3.1. La texture

L'observation visuelle à l'œil nu et au moyen de la loupe binoculaire à un agrandissement jusqu'à 50 fois est l'étape initiale de l'étude de la texture. Elle permet d'avoir les informations sur : la couleur de la matrice, l'abondance des pores, la dimension des squelettes, la répartition des squelettes et particules, etc. Ainsi, dans le but d'approfondir ces analyses de structure, on procède à des observations au microscope électronique à balayage.

I.3.1.1. Microscope électronique à balayage

Les propriétés d'un matériau ne dépendent pas seulement de la composition chimique, mais aussi de la structure, cette dernière peut être observée depuis la loupe jusqu'au microscope électronique à balayage¹.

L'imagerie électronique par microscope électronique à balayage (MEB) va permettre l'étude de la texture à l'échelle du micromètre ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$).

Cette méthode révèle la microtexture de l'ensemble liant – terre active – agrégat par étude d'échantillons en section, mais aussi l'état de surface des échantillons par l'étude de fragments bruts.

Le principe du microscope électronique à balayage consiste à utiliser un faisceau d'électrons lancés à grande vitesse pour voir l'objet (Fig. n° 19). La lumière émise par l'échantillon est collectée par un système optique de collection sous vide et analysée sur un banc de spectroscopie à l'extérieur du MEB. On obtient ainsi le spectre de luminescence de l'échantillon, et à partir des informations du spectre, on peut réaliser des images monochromatiques et faire une cartographie localisée de la lumière émise par l'échantillon. L'imagerie par Microscope Electronique à Balayage permettra d'étudier la texture à l'échelle micromètre dans laquelle on peut identifier dans le cas des mortiers archéologiques :

- la présence de cristaux non luminescents,
- la texture de mortier, présence de la brique pilée, du mica, les os, etc.
- la présence d'adjuvants dans les pores, la cendre du bois, le noir animal, etc.

1- T. PERDIJON, « aide mémoire : contrôle des matériaux », éd : DUNOD. Paris 2003, P 57.

L'appareillage utilisé au laboratoire CRD de Boumerdes est un microscope électronique à balayage JEOL JSM 820.

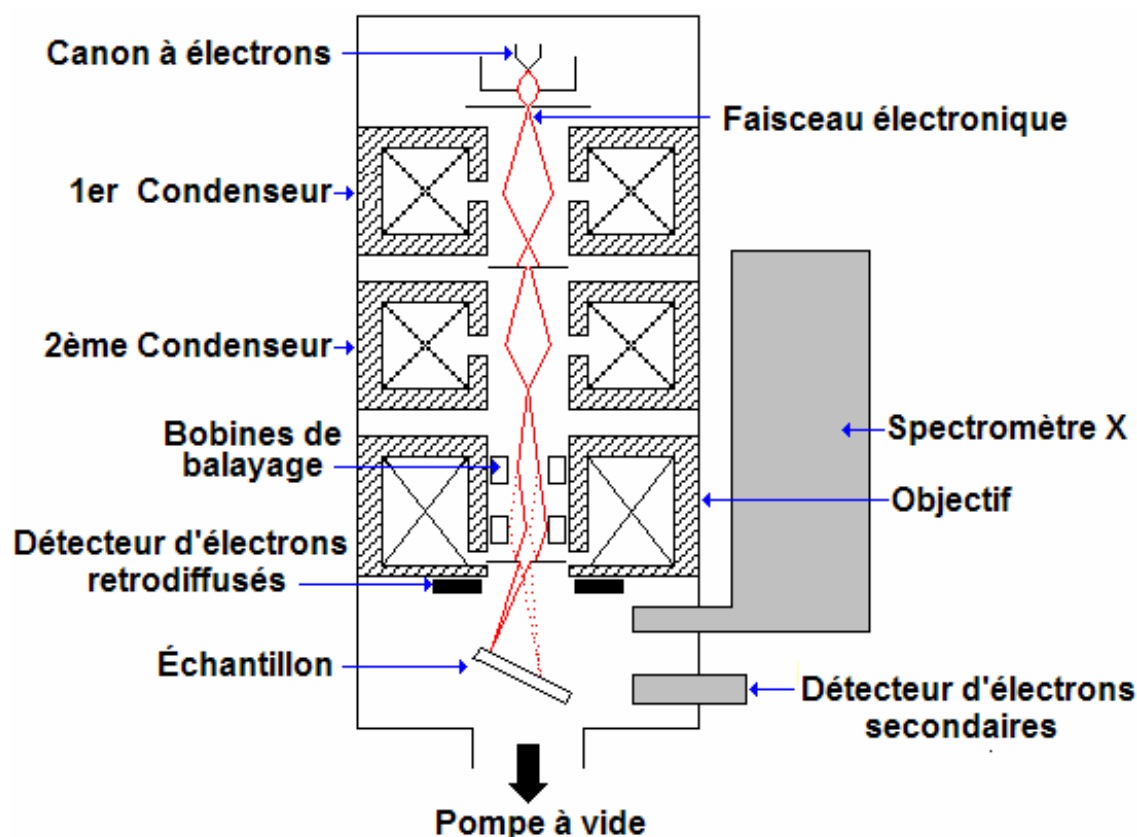


Fig. n° 19 : Schéma du principe de Microscope Electronique à Balayage (MEB).

I.3.2. Caractéristiques physico-chimiques

La détermination des caractéristiques physico-chimiques est un moyen qui permettra de trouver tous les symptômes et les informations sur la construction des sites, la composition et l'état de dégradation des mortiers de construction.

Les analyses et les tests programmés sont : le test à l'acide chlorhydrique, le test à l'acide sulfurique, essai au PH, essai de la combustion, essai de la friabilité, Essai de l'abondance de la fraction inférieure à 50 µm, la masse volumique, la masse spécifique, la porosité, l'absorption d'eau, essai à l'humidité, Analyse chimique, l'analyse minéralogique.

I.3.2.1. Essai à l'acide chlorhydrique (HCl à 2N)

Cet examen de l'attaque chimique à l'aide l'acide chlorhydrique, HCl à 2N nous renseignent sur la présence du carbonate de calcium dans les mortiers composant les structures des sites de Djemila et la Citadelle d'Alger.

Cette solution est préparée au niveau du laboratoire céramique et verre de département Génie des Matériaux.

I.3.2.2. Essai au PH des solutions aqueuses des mortiers

Pour effectuer cet essai, on procède avant tous à la préparation des solutions aqueuses des mortiers. Cette dernière consiste à submerger dans l'eau distillée et dans les conditions ambiantes les échantillons à l'état de motte et une fois broyés pendant une durée de quinze jours jusqu'à la dissolution maximale des sels contenant les mortiers.

La mesure du pH des solutions est effectuée au niveau du laboratoire céramique et verre de département Génie des Matériaux à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA instruments HI 8521 de précision 10^{-2} . Les résultats obtenus sont inscrits dans les tableaux n° 7 et 8.

I.3.2.3. Essai à l'acide sulfurique (H_2SO_4 à 33%,)

Les sédiments (le précipité) extraits lors de la préparation des solutions aqueuses que subissent le test de pH sont séchés jusqu'à leurs pertes de leurs solubilités. Ils subissent le test de l'attaque chimique avec l'acide chlorhydrique, HCl à 2N. Les solutions obtenues sont subies aussi le test avec l'acide sulfurique, H_2SO_4 à 33%, préparé au niveau du laboratoire céramique et verre de département Génie des Matériaux. Les résultats obtenus sont inscrits dans les tableaux n° : 09 et 10.

I.3.2.4. Essai de la friabilité

Les échantillons de mortier sont exposés dans une cuve aux ultrasons pendant 3h. Après ce temps, on recueille les particules détachées de l'échantillon initial, pour les sécher et les peser. Cette quantité, rapportée à l'échantillon total, exprime l'aptitude du mortier à se désagréger². Cet essai est effectué au niveau du musée national des antiquités, Alger.

I.3.2.5. Essai de l'abondance de la fraction inférieure à 50 μm

On détermine cette fraction inférieure à 50 μm sur les sédiments récupérés au cours de l'essai de friabilité. Les mortiers sont désagregés par un broyage doux et on prend garde à ne pas casser les grains. Ils sont ensuite trempés dans de l'eau oxygénée (60 vol) pendant 24h. Après un nouveau broyage léger, puis tamisé sur une maille de 50 μm (on vérifie que la matrice est totalement désagregée), Le tamisât est décanté, sécher et pesé. Cette fraction fine représente essentiellement le liant utilisé dans la confection du mortier³.

I.3.2.6. Essai de la combustion

On met les échantillons dans un four rapporté à une température qui sera déterminée en fonction de la composition de l'échantillon et de la nature du constituant recherché. Le résultat du test est basé sur plusieurs critères d'étude entre autres : la nature d'odeur dégagée, la perte de masse, le changement de couleur obtenu, etc.

I.3.2.7. Essai de la masse volumique

La masse volumique d'un matériau est la masse de ce matériau par unité de volume, en tenant compte des pores et capillaires. On la détermine au moyen d'un cylindre gradue. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$M_v = \frac{M_1 \rho}{M_3 - M_2} , \quad (g/cm^3)$$

2- Revue : Table ronde de Dijon « Enduit et mortiers archéologique médiévale et moderne », sous la direction de Christian Sapin, COLARDELLE et A. LOEBELL : Etude sommaire des mortiers. éd : CNRS, Paris 1993, P 63.

3- Idem, revue : Table ronde de Dijon, P 64.

avec :

M_1 : masse d'échantillon sec; g.

M_2 : masse de flacon rempli d'éther de pétrole; g.

M_3 : masse de flacon plein d'éther de pétrole contenant l'échantillon totalement immergé; g.

ρ : masse spécifique d'éther de pétrole, $\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$.

Elle est calculée à partir de la moyenne de 5 essais.

I.3.2.8. Essai de la masse spécifique

La masse spécifique d'un matériau est la masse de ce matériau par unité de volume sans tenir compte des pores et des capillaires. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$M_s = \frac{(M_1 - M)(d_t - d_a)}{M_3 + (M_1 - M) - M_2}, \quad (\text{g/cm}^3)$$

avec :

d_t : densité du toluène; $d_t = 0,65$.

d_a : densité de l'air; $d_a = 1,29$.

M_1 : Masse de pycnomètre vide; g.

M_2 : Masse de pycnomètre avec la poudre de l'échantillon (environ 5g); g.

M_3 : Masse de pycnomètre avec toluène; g.

La masse spécifique est calculée à partir de la moyenne de 5 essais.

I.3.2.9. Essai de l'absorption d'eau

L'absorption d'eau est la capacité d'un matériau d'absorber ou de retenir l'eau. L'importance de la détermination de cette caractéristique réside dans le test de la compacité du mortier, plus elle est faible plus le mortier est plus étanche ou compact. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\text{Abs} = \frac{M_{se} - M_s}{M_s} \cdot 100, \quad (\%)$$

avec :

Abs : absorption d'eau; %.

M_s : masse de l'échantillon sèche; g.

M_{se} : masse de l'échantillon saturé d'eau; g.

Cette absorption est calculée à partir de la moyenne de 5 essais.

I.3.2.10. Essai de la porosité

La porosité d'un matériau est le rapport du volume des pores et des capillaires que contient ce matériau par rapport à son volume total. Elle est calculée à partir des valeurs de la masse spécifique et la masse volumique. La relation qui détermine cette porosité commune est la suivante :

$$P_c = \left(1 - \frac{M_v}{M_s}\right) \times 100, \quad \text{en } \%$$

d'où :

M_s : Masse spécifique de l'échantillon, g/cm^3

M_v : Masse volumique de l'échantillon, g/cm^3

I.3.2.11. Essai de l'humidité

L'essai de l'humidité d'un mortier constitue un indicateur essentiel de sa durabilité. En effet, la pénétration des agents agressifs s'effectue dans le mortier principalement par diffusion à travers la phase liquide interstitielle.

L'ajout d'adjuvant influe directement sur la microstructure du mortier. Il réduit les zones particulières des vides des aréoles de transition, ce qui favorise l'interconnexion pâte-squelette. Il réduit le plus possible les vides et produit un matériau plus compact, et plus durable.

Cet essai consiste tous d'abord à créer un milieu humide dans lequel on fait tester la capacité de rétention d'humidité, à une température ambiante ($t = 24 \pm 2$ °C) pour un temps en minutes (3, 6, 9, 15, 30, 60, 90, 120, 240 et 8640). La teneur d'humidité retenue par les échantillons est calculée par la formule suivante :

$$M_h = \frac{m_f - m_i}{m_i} \cdot 100 \quad , \quad (\%)$$

d'ou :

m_h : teneur en humidité en %

m_f : masse de l'échantillon finale en g

m_i : masse de l'échantillon initiale en g

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau n° : 21.

I.3.2.12. L'analyse minéralogique

Pour identifier la nature de la structure des produits cristallisés (roche, mortier, cristaux, argile, etc.) on utilise la diffraction des rayons X, DRX.

A l'aide d'un montage mécanique (goniomètre $\theta - 2\theta$) on fait varier de la même valeur l'angle d'incidence (les angles dièdres) d'un faisceau de rayons X sur un échantillon et la position du détecteur de photons.

Cet appareil comporte :

- une anticathode de cuivre ($\lambda = 15$ nm, $V = 40$ Kev, $I = 30$ mA)
- un détecteur siemens type F mesurant l'intensité du rayonnement X diffracté
- un porte échantillon.

L'acquisition est effectuée par une unité informatique et le traitement des diffractogrammes s'effectue à l'aide d'un logiciel basé sur les données des fiches ASTM.

L'analyse des échantillons PB₂ et D₄ aux rayons X est effectuée au niveau du laboratoire de l'université de Cracovie en Pologne, par contre celle des échantillons P₁, P₂ et PD₁ est effectuée au niveau de USTHB. Les résultats d'analyse sont représentés dans les figures : 23, 24, 25, 26 et 27.

I.3.2.13. Analyse chimique

L'étude de la composition élémentaire ou chimique du matériau est fondamentale. Elle aide dans la caractérisation technologique des mortiers. Cette analyse est effectuée au niveau du laboratoire des matériaux minéraux et composites, université de Boumerdes à l'aide d'un fluorescence X de type multicanal panalticol de la société Philips. Les résultats d'analyse sont

donnés par le tableau n° 22. Le principe de l'essai consiste à enregistrer l'intensité du rayonnement en choisissant, bien entendu, une longueur d'onde convenable caractéristique de l'élément à doser.

I.4. Propriétés mécaniques

Dans le domaine de la construction, on choisit un matériau pour ses qualités de tenue mécanique dans les conditions d'emploi prévues : déformation pour son caractère élastique ou plastique pour son caractère ductilité sans rupture, résistance à la pénétration par sa dureté ou à la fatigue par son endurance. Ce genre d'analyse est très important surtout en ce qui concerne les mortiers d'hourdages. Elle permet de déterminer leurs résistances qui nous informent sur l'aptitude des mortiers de leurs déformations sous l'action d'une charge, toutes en conservant sa cohésion jusqu'à une certaine limite.

I.4.1. Résistance mécanique à la compression

Cet essai est effectué au niveau du centre de recherche spécialisé en géologie, CETIM. Pour effectuer cette analyse, on procède avant tout, à la préparation de la surface des échantillons d'une manière plate et qui devra avoir des dimensions requise. Cette propriété est en relation directe avec la forme d'échantillon.

La préparation de l'échantillon s'effectue comme suit : on réalise un prélèvement 50×50×50 mm au moyen d'un disque tournant qui utilise l'eau comme lubrifiant de coupe. Cette opération est suivie d'un polissage qui est assuré par deux types de disques de polissage : un polissage dégrossissage et un polissage finition.

Pour procéder à cet essai, on place l'échantillon entre les plateaux d'une presse permettant, par sa construction et ses possibilités de réglage, d'effectuer les essais avec une dispersion aussi faible que possible. Il est placé de façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur.

La charge croît à une vitesse telle que l'écrasement se produit entre vingt et quarante secondes après le début de mise en charge. La formule qui donne cette contrainte est la suivante :

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \quad , \quad (\text{MPa})$$

avec :

P : charge de rupture; KN.

S : section transversale de l'échantillon; Cm^2 .

Cette résistance est calculée à partir de la moyenne de 3 essais.

I.4.2. Coefficient de ramollissement

On appelle coefficient de ramollissement le rapport entre la résistance mécanique à la compression d'un matériau saturé d'eau (σ_w) et à l'état sec (σ_c). Ce coefficient est un facteur important, car il caractérise la résistance opposée à l'action de l'eau. On calcule ce coefficient de ramollissement par la formule suivante :

$$C_r = \frac{\sigma_w}{\sigma_c}$$

Le coefficient de ramollissement varie de zéro (pour les matières argileuses) à 1, matériau dont la résistance mécanique n'est pas modifiée par l'action de l'eau, tels que : le verre, etc.

Le Geopyc 1360 et le Pycnomètre Accupyc 1330 sont deux appareils utilisés dans la détermination de la densité, la masse volumique et la porosité des mortiers. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau n° 17.

1.5. Description de l'appareillage

1.5.1. Geopyc 1360

Est un analyseur rapide et automatique de la densité d'enveloppe ou de la densité tassée d'un échantillon en utilisant un procédé unique de mesure de déplacement d'un piston.

La densité d'enveloppe d'un produit correspond au rapport entre sa masse et son volume en incluant le volume des pores ouverts et des petites cavités.

La densité tassée d'un produit correspond au rapport entre sa masse et son volume quand il est soumis à force de tassement définie.

1.5.2. Pycnomètre Accupyc 1330

Est un pycnomètre rapide, automatique et précis permettant la détermination de la densité et du volume d'une large variété d'échantillons comme les poudres, les liquides ou les massiques. Le temps d'analyse est d'environ 2 à 3 minutes sans sacrifier à la précision en appliquant le principe des gaz parfaits.

CHAPITRE II

RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS.

L'état de préservation des mortiers de maçonnerie et d'enduit de recouvrement n'est pas satisfaisant, ils sont craquelés, ils s'effritent, cela est provoqué par plusieurs agents cités dans la partie bibliographique, chapitre III. Ces effets ont une part d'influence sur les résultats de notre recherche.

Pour répondre aux objectifs tracés dans notre travail, nous avons procédé à la détermination de différentes caractéristiques des mortiers à savoir : les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques ainsi que l'état structural des lots d'échantillons représentatifs.

II.1. Procédure de prélèvement

Pour procéder aux prélèvements, on se réfère tout d'abord à l'étude historique objet du chapitre I. Elle nous conduira à un meilleur choix sur la typologie des mortiers composant les sites.

Pour mener cette opération, on doit respecter les règles de conservation et de restauration dans lesquelles on cherche toujours l'originalité du monument. A cet effet, nous nous sommes retrouvés contraint d'ignorer une phase de l'histoire de ses sites, il s'agit de la période coloniale française.

Dans le souci d'arriver à un meilleur prélèvement, nous avons identifié tous les types de mortiers de réparation qui remontent à la période coloniale Française, en suite nous avons procédé aux prélèvements tout en se basant sur les critères du choix et de distinction entre les échantillons suivants :

- la couleur et la texture de la matrice,
- les éléments et particules,
- l'abondance des pores,
- la répartition et la dimension des granulats dans la masse de mortier,

Cette recherche in situ, nous a permis de prélever cinquante échantillons (Fig. n° 20) et de faire les constations suivantes :



Fig. n° 20 : Photo montrant l'ensemble des échantillons,
(a) - Citadelle d'Alger (b)- Djemila

II.1.1.Djemila :

Les premières investigations, nous a permis de constater que le site est riche en technique de construction, ce qui nous a fait penser la même chose pour les mortiers. Après analyse des différents échantillons prélevés, nous avons constaté l'inverse de cette hypothèse, cela peut être dû à l'utilisation des mêmes gisements durant la longue période romaine. Malgré cette pauvreté en typologie des mortiers, nous avons essayé d'aller plus loin, en prélevant sept échantillons dans différents monuments et qui sont repartie comme suit :

- trois échantillons de mortiers de maçonnerie,
- deux échantillons d'enduit de revêtement,
- un échantillon de mortier de pose de la mosaïque, ce dernier est retenu à cause de sa compacité et sa résistance.

II.1.2. Citadelle d'Alger

Quant au second site, il est riche en typologie des mortiers, cela probablement dû à l'utilisation de plusieurs gisements à savoir : TELA OUMLIL et la carrière DJOBERT qui sont sis à environ un Kilomètre au Sud-est et à l'Ouest de la Citadelle.

La recherche dans les agrégats prélevés nous a permis de constater trois types différents : les agrégats de rivière, les agrégats à base d'argile cuite et des agrégats à base de mica, ces derniers sont extrait in situ.

Le nombre total d'échantillons prélevés est de quarante-trois échantillons reparti comme suit :

- vingt trois échantillons de mortier de maçonnerie,
- vingt échantillons d'enduit de revêtement.

II.2. Description des échantillons

Les échantillons d'analyse ont été prélevés sous forme de débris irréguliers de quelques centimètres et d'une épaisseur moyenne de 2cm. L'observation visuelle à l'œil nu et au moyen d'une loupe à un agrandissement jusqu'à 50 fois, et après une légère humidification des échantillons, montre que la couleur de ces deux lots d'échantillons varie du blanc jusqu'au jaune-ocre pour Djemila et au rouge foncé pour les échantillons de la Citadelle d'Alger. Les différentes observations retenues sur les mortiers des deux sites sont :

II.2.1. Djemila

Les échantillons des mortiers de maçonnerie et d'enduit de recouvrement prélevé sont de couleur jaune-ocre, par contre celui de la pose de la mosaïque est de couleur beige. Ils sont formés d'un mélange de terre calcaire mélangés avec les agrégats à base d'argile, soit cuite ou non cuite. La granulométrie des agrégats varie de quelques millimètres (Fig. n° 21). L'ensemble des mortiers se raye et s'effrite à l'angle quand ils sont humides, cela explique leur faible dureté. En exception le mortier de pose de la mosaïque et avec un degré moins pour l'enduit de revêtement.



Fig. n° 21 : Photo montrant l'emploi des agrégats céramique crus.

II.2.2. Citadelle d'Alger

Ils sont de couleur distinguée par rapport aux mortiers de Djemila. Ils varient du blanc au rouge foncé. Ce sont des mortiers qui sont composés d'au moins de deux liants, soit de la terre – chaux ou chaux – plâtre mélangé éventuellement de différents agrégats du sable de rivière, d'agrégats céramiques pillés ou d'agrégats de micas cuits. Dans les niveaux inférieurs des monuments qui date de la première et la seconde période, les agrégats sont à base d'argile kaolinitique ou illitique. Par contre dans les niveaux supérieurs qui date de la dernière période de construction du site, on constate l'emploi de la roche mica (l'origine du sol de la Citadelle) cuit à une température qui la rende rouge. Son emploi est utilisé pour alléger les structures (principe de base des bétons légers).

La granulométrie des agrégats varie à partir de quelques millimètres jusqu'à une dizaine de millimètres, surtout dans le cas des mortiers de couleur blanche.

Les additifs (la paille rencontrée dans les enduits de revêtement, le blanc d'œuf, la cendre du bois, l'os) sont des ajouts qui permettent d'améliorer certaines caractéristiques recherchées des mortiers. Dans la Fig. n° 22, on observe la présence des os dans le mélange, cela explique leur rôle dans l'enrichissement des mortiers en calcium et par conséquent l'augmentation de la résistance des mortiers. Ainsi, dans la même photo, on observe la cendre d'os ou le noir animal (en cadre vert), ce qui explique que ces types de mortiers ont subi une cuisson au cours de leur préparation.

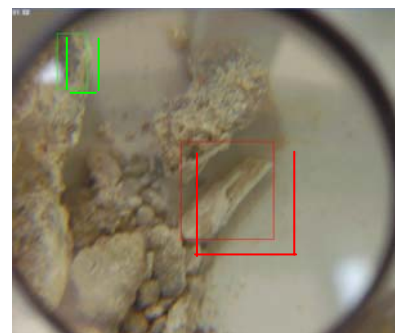


Photo n° 22 : Présence des os dans le mortier de construction de la poudrière.

La plus part des échantillons sont rayés à l'angle quand ils sont humidifiés, ce test confirme la sensibilité de ces mortiers contre l'humidité.

II.3. Chronologie des sites

La confirmation du tracé historique conclu dans la partie bibliographique, chapitre I est vérifiée par la comparaison entre les différents mortiers de construction composants les murs des monuments. Les différentes constatations se résument comme suit :

II.3.1. Djemila

L'utilisation des mêmes gisements durant toute la période romaine rend l'établissement de la chronologie difficile. Pour cette raison, nous avons fait appel aux techniques de construction employées afin d'arriver à une meilleure sélection d'échantillons qui peuvent témoigner des différentes phases de construction du site. L'étude de ces techniques a montré l'existence de deux quartiers qui appartiennent à deux périodes de construction différentes.

II.3.2. Citadelle d'Alger

A travers l'analyse visuelle des différents échantillons prélevés sur différents monuments, on constate :

la même nature de mortier utilisé à la fois dans le second et le troisième étage de palais du Dey, de la salle de prière de la nouvelle mosquée, du deuxième et troisièmes étages et la terrasse de palais des Beys ainsi des murs extérieurs de la poudrière, avec une très légère différence parfois dans la nuance des couleurs. Cette observation se traduit par l'utilisation de la même composition et les mêmes procédés de préparation des mortiers au cours de la dernière période de construction de la Citadelle.

En référence à la partie bibliographique, I.2.2.4, la poudrière est construite bien avant l'installation de l'avant dernier Dey à la Citadelle. Cette hypothèse contredit la lecture archéologique effectuée sur les mortiers et les techniques de construction employées, donc on peut dire qu'elle est construite postérieurement.

Le mortier de couleur blanche employée dans la construction des murs intérieurs de la poudrière est utilisé aussi dans la construction des murs Sud et Nord de palais du Dey, le mur qui forme l'entrée des cuisines du Dey, comme il a été employé dans la réparation de la Skifa et certaine autre partie du palais du Dey (la salle du musique). Cet emploi confirme que le mortier blanc utilisé pour la réparation des murs du palais est effectué probablement dans la dernière période de la construction de la Citadelle.

La seconde période de construction de la Citadelle est marquée uniquement par l'amélioration des locaux et les résidences des janissaires ainsi l'adaptation des batteries aux systèmes de défense.

Enfin, la première période de construction de la Citadelle est marquée par la construction de l'enceinte extérieure et les casemates entourant les quatre ailes de la Citadelle. L'épaisseur des murs qui forme l'enceinte dépasse quelque-fois 1.20m.

II.4. Choix des échantillons après une sélection visuelle

Pour mieux étudier et établir les compositions employées et le comportement ou le degré de préservation des mortiers, nous avons opté à une pré-sélection en retenant quatorze échantillons dont huit échantillons de maçonnerie et six d'enduit de recouvrement (Fig. n° 23, tableau n° 6). Ces échantillons ont subi différents essais d'ordre physico-chimiques.



Fig. n° 23 : Photo montrant l'ensemble des échantillons retenus.

Tableau n° 6 : Présentation des échantillons

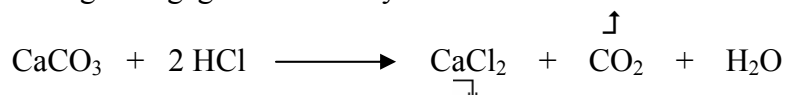
Site	Monument	Abréviation	Nature d'échantillon	Observations
Djemila	Anciens bains	D ₁	Mortier de pose de la mosaïque	
	Bains Est	D ₂	Enduit de recouvrement	
	Bains Est	D ₃	Mortier de maçonnerie	mur interne
	Bains Est	D ₄	Mortier de maçonnerie	mur externe
Citadelle d'Alger	Palais du Dey	PD ₁	Mortier de maçonnerie	1 ^{er} niveau Sud-Est
		PD ₂ (A, B)	Enduit de recouvrement	salle de musique
		PD ₃	Mortier de maçonnerie	appartement du Dey
	Palais des Beys	PB ₁	Enduit de recouvrement	la terrasse du palais
		PB ₂	Mortier de maçonnerie	1 ^{er} étage
	Poudrière	P ₁	Mortier de maçonnerie	intérieur
		P ₂ (A, B)	Enduit de recouvrement	extérieur
	Nouvelle Mosquée	NV	Mortier de maçonnerie	intérieur

II.5. Résultat des essais physico-chimiques

Pour une meilleure sélection des échantillons représentatifs, on complète l'analyse visuelle par la détermination des caractéristiques physico-chimiques. Ces dernières sont : l'essai de pH, l'attaque par l'acide chlorhydrique à 2N, l'attaque par l'acide sulfurique à 33%, la combustion, la friabilité, l'abondance de la fraction inférieure à 50 μ m.

II.5.1. Résultats des essais à l'acide chlorhydrique (HCl à 2N)

Le test de l'attaque chimique effectué sur les échantillons pré-sélectionnés ont montré une forte effervescence, surtout les échantillons composants le lot de Djemila et l'échantillon PD₂ de la Citadelle d'Alger. Le gaz dégagé est le dioxyde de carbone. La réaction se déroule comme suit :



II.5.2. Résultats des essais au pH des solutions aqueuses des mortiers

Les résultats obtenus montrent que les échantillons submergés en motte n'ont pratiquement aucun changement de pH de l'eau, par contre les échantillons submergés en poudre ont contribué à l'augmentation du pH, ce qui témoigne de la dissolution et de l'alcalinité des solutions surtout dans le cas des échantillons D₂, D₃, D₄ et PD₂ (B), PD₃, P₂, NV. Pour le reste des échantillons D₁, PD₁, PD₂ (A), et P₁ leur pH est légèrement inférieur à 8, cela probablement due au phénomène de déshydratation /séchage qui rend les mortiers neutres dans les structures. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau n° 7 et 8.

Tableau n° 7 : Résultat de pH (Djemila)

Echantillons	pH des solutions après 15 jours
D ₁	7,87
D ₂	8,85
D ₃	8,42
D ₄	8,18

Tableau n° 8 : Résultat de pH (Citadelle d'Alger)

Echantillons	pH des solutions après 15 jours
PD ₁	7,81
PD ₂	enduit A - B 8,77 7,85
PD ₃	9,04
P ₁	7,50
P ₂	enduit A - B 8,50 8,02
PB ₂	7,99
NV	8,55

Le pH des échantillons supérieurs à 8, indique la présence encore du carbonate de chaux qu'est responsable de la résistance du mortier.

II.5.2.1. Résultats d'identification des solutions obtenues

Afin de pouvoir identifier les solutions qui ont subi le test de pH, nous avons procédé à la séparation du filtrat et du substrat dans des capsules. On constate que les substrats des échantillons D₂, D₃, D₄ et PB₂ sont riches en corps gras.

Quant au filtrat, après 24h, on observe dans la majorité des solutions à leur surface la présence d'une fine couche de carbonate de calcium à la surface de l'eau calcaire. Par contre le substrat extrait grâce à l'évaporation d'eau a perdu sa solubilité et quand soumis au traitement avec l'acide chlorhydrique exhalaient des bulles de bioxyde de carbone.

II.5.3. Résultats des essais à l'acide sulfurique (H₂SO₄)

Dans les solutions de l'acide sus mentionné, après l'ajout de quelques millilitres de solution d'H₂SO₄ à 33%, on observe la formation et la cristallisation des aiguilles caractéristiques de plâtre. Les observations obtenues sont rapportées sur les tableaux n° 9 et 10.

Tableau n° 10 : Résultats de l'attaque d'H₂SO₄ (Citadelle d'Alger)

Echantillon	Attaque d'H ₂ SO ₄ à 33%								
	Cristaux du plâtre	Sable blanc	Sable Noir (selex)	Sable jaune	Sable gris	Céramique broyée	Agrégats Micas et autres	Cendre du bois	OBS
PD ₁	+			++				+	Précipite gras
PD ₂	+++ +++		+			++	+	+	— Précipite gras
PD ₃							+++	+	Peu gras
P ₂	++ +	+	+		++		++ ++	+	— Précipite gras
P ₁	+++		+++					+	Présence d'os
PB ₂ (A)	+			++			++	+++	Précipite gras
NV	—	+					+	++	peu gras

- Absence des cristaux du plâtre
- +
- ++
- +++

On constate une forte présence des cristaux du plâtre dans le cas des échantillons PD₂ (enduit de recouvrement) et P₁ de la Citadelle d'Alger.

Tableau n° 9 : Résultats de l'attaque d'H₂SO₄ (Djemila)

Echantillon	Attaque d'H ₂ SO ₄ à 33%							
	Cristaux de plâtre	Sable blanc	Sable jaune	Sable gris	Céramique broyée	Autres agrégats	Cendre du bois	OBS
D ₁	—	—			+++	—	+	—
D ₂	+	—	++		++	—	—	Précipite gras
D ₃	—	—		++	—	+++	+++	Précipite gras
D ₄	—	+		+	—	+++	++	Précipite gras

II.5.4. Résultats des essais de la combustion

Les mortiers de maçonnerie D₁, PD₁, NV, PD₂ (B), P₁(B), PD₃, lors de leur combustion dans des creusets en porcelaines ne dégagèrent aucune odeur caractéristique des substances organiques et ne se carbonisèrent pas. Par contre les échantillons D₂, D₃, D₄, PB₂, PD₂ (A), et P₁(A) dégagèrent en revanche une odeur typique de certains esters ou de certains acides gras. Ce dégagement d'odeur constatée est une preuve de la carbonisation des matières organiques que contiennent les mortiers.

II.5.5. Résultats des essais de la friabilité

Après l'essai et la récupération des particules désagrégées, on aboutit aux résultats inscrits dans le tableau 11 et 12 suivants :

Tableau n° 11 : Résultats de l'essai de friabilité (Djemila)

Echantillons	Masse d'échantillon récupéré sèche (g)	Fraction des grains récupérés (%)
D ₁	0,72	13,40
D ₂	3,34	66,80
D ₃	4,25	85,00
D ₄	3,92	78,40

Tableau n° 12 : Résultats de l'essai de friabilité (Citadelle d'Alger)

Echantillons		Masse d'échantillon récupéré sèche (g)	Fraction des grains récupérés (%)
PD ₁		3,42	68,40
PD ₂	enduit A - B	3,32	66,40
		2,63	52,60
PD ₃		3,15	63,00
P ₁	enduit A - B	3,25	65,00
		2,19	43,8
P ₂		4,01	80,02
PB ₂		3,28	65,60
NV		2,99	59,80

Les valeurs obtenues se situent entre 13,40 ÷ 85% pour Djemila et 43,80 ÷ 66,40%, 59,80 ÷ 80,02% respectivement pour les enduits de recouvrement et les mortiers de maçonnerie de la Citadelle d'Alger.

Les échantillons D₃, D₄ du lot du Djemila se désagrègent très rapidement par rapport à ceux de la Citadelle d'Alger, cela est expliqué par la perte de la rigidité du liant.

II.5.6. Résultats de la fraction inférieure à 50 µm

Après la récupération des particules désagrégées au cours de l'essai de friabilité et le séchage, nous avons obtenu les résultats inscrits dans le tableau 13 et 14 suivants :

Tableau n° 13 : Résultats de la fraction inférieure à 50 µm (Djemila)

Echantillons	Masse d'échantillon récupéré sèche (g)	Fraction inférieure à 50 µm (%)
D ₁	0,33	45,83
D ₂	2,55	76,35
D ₃	3,06	72,00
D ₄	3,07	78,32

Tableau n° 14 : Résultats de la fraction inférieure à 50 µm (Citadelle d'Alger)

Echantillons	Masse d'échantillon récupéré sèche (g)	Fraction inférieure à 50 µm (%)
PD ₁	2,62	76,61
PD ₂	3,33	91,73
enduit A - B	2,17	65,36
PD ₃	2,52	73,68
P ₂	2,03	92,67
enduit A - B	2,34	72,00
P ₁	1,30	32,42
PB ₂	2,08	63,41
NV	2,31	77,25

A partir des résultats obtenus, on peut dire que les mortiers D₂, D₃, D₄ ont la même fraction, donc on pense qu'ils sont de même origine. L'échantillon D₁ a montré la dispersion sous l'action de l'eau, cela est remarqué par leur fraction par rapport à D₂, D₃, et D₄.

On constate que les agrégats que contient D₃, D₄ ne résistent pas à l'action de l'eau, cela explique qu'ils sont préparés d'une matière qui n'est pas bien traitée ou à la perte de la rigidité du liant. Quant aux résultats obtenus sur les échantillons de la Citadelle d'Alger, on constate que PD₁, PD₃, NV sont pratiquement de la même fraction. On constate également le même

pourcentage obtenu pour les premières couches d'enduit (couches d'accrochages) PD₂ (B), P₂(B).

II.6. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des mortiers ont une grande influence sur la durabilité des mortiers. L'étude de ces caractéristiques (porosité, masse volumique, masse spécifique, absorption d'eau) peut fournir des informations assez précieuses sur l'état de préservation des mortiers. Les résultats d'analyses sont représentés dans les tableaux n° 15 et 16.

Tableau n° 15 : Résultats d'analyse physique (Djemila)

Echantillons	Masse volumique (g/cm ³)	Masse spécifique (g/cm ³)	Absorption d'eau (%)	Porosité totale (%)	Porosité ouverte (%)
D ₁	1,384	2,429	18,551	34,788	16,237
D ₂	1,114	2,680	21,630	45,298	23,668
D ₃	1,296	2,568	24,410	49,533	25,123
D ₄	1,879	2,623	23,860	47,426	23,566

Tableau n° 16 : Résultats d'analyse physique (Citadelle d'Alger)

Echantillons	Masse volumique (g/cm ³)	Masse spécifique (g/cm ³)	Absorption d'eau (%)	Porosité totale (%)	Porosité ouverte(%)
PD ₁	1,970	2,630	20,860	25,095	4,235
PD ₂	enduit A - B	1,690	18,610	24,212	5,600
		1,211	24,766	31,966	7,200
PD ₃		2,050	17,889	25,209	7,320
P ₁	enduit A - B	1,819	23,765	29,578	5,813
		1,322	22,666	34,08	12,242
P ₂		2,130	17,640	25,784	8,144
PB ₂		2,120	20,322	23,290	2,968
NV		2,010	23,550	29,225	5,675

II.6.1. Résultats la masse volumique et la masse spécifique

Dans la détermination de la masse volumique, le mortier ne doit pas être soluble dans le liquide et le résultat peut dépendre de la durée d'immersion (imbibition), par contre la masse spécifique ne dépend pas de l'aspect des mortiers.

L'analyse des résultats nous a permis de constater un rapprochement de certaines valeurs surtout dans les échantillons P₂, NV et PD₃. Cela indique que les échantillons peuvent avoir la même composition.

II.6.2. Résultats de l'absorption d'eau

L'absorption d'eau des mortiers donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores), c'est l'un des moyens de tester leur compacité. Plus le mortier est compact plus son absorption d'eau est faible.

L'analyse des résultats de lot de Djemila nous a permis de constater que les échantillons de mortiers de maçonneries testés ont pratiquement les mêmes valeurs d'absorptions d'eau. Ces teneurs représentent la moitié de la porosité totale de ces échantillons. Alors, ils peuvent résister au cycle gel / dégel. Ce résultat est dû probablement à la présence de la cendre du carbone ou autre matière organique dans les pores des échantillons. Ainsi, le lot d'échantillons de la Citadelle d'Alger représente des valeurs aussi importante qui sont dues à leur porosité ouverte qui est provoquée par divers agents de dégradation. On constate que les échantillons PD₁ et PB₂ ont les même teneurs d'absorption d'eau, ainsi que pour les échantillons P₂ et PD₃, malgré qu'ils sont de couleur différente.

II.6.3. Résultats de la porosité

On remarque clairement les grandeurs de la porosité totale pour le lot de Djemila : 34.788, 45.298, 49.533, 47.426%, ces pourcentages confirment l'état de dégradation indiquée en III.3.2. Quant à celles de la Citadelle d'Alger sont remarquées par deux valeurs qui dépasse 30% pour les couches d'accrochages des enduits PD₂(A) et P₂(A).

On remarque que les échantillons D₂, D₃ et D₄ du lot de Djemila possèdent des valeurs de porosité ouverte assez remarquable, cela peut être expliqué que ces matériaux sont exposés aux agents de dégradation plus sévère que ceux de la Citadelle d'Alger. Ainsi, cet état de cause peut expliquer aussi par l'effet des charges des structures sur les couches de mortier qu'elles compressent et deviennent très compactes.

II.6.4. Résultats accupyc 1330 et Geopyc 1360

Les résultats d'analyse sont donnés dans le tableau 17

Tableau n° 17 : résultats obtenus par accupyc 1330 et Geopyc 1360

Echantillons	Masse spécifique g/cm ³	Masse apparente g/cm ³	Volume des pores cm ³ /g	Porosité totale %	Porosité ouverte %	Porosité fermée %
PB ₂	2,6977 ± 0,0018	1,5039 ± 0,0016	0,3014	45,3000	45,2998	0,0002
D ₄	2,6576 ± 0,0009	1,6661 ± 0,0132	0,2232	37,2000	37,0000	0,2000

Par comparaison aux résultats obtenus par les méthodes classiques de détermination de la masse volumique, de la masse spécifique et de la porosité totale, on constate :

- Un rapprochement des résultats de ces caractéristiques pour l'échantillon D₄.

La porosité de l'échantillon PB₂ obtenue par la méthode classique est deux fois moins que celle obtenue par accupyc 1330 et geopyc 1360.

II.6.4. Résultats de la masse volumique des agrégats

A partir des résultats obtenus dans tableau 18, on constate qu'il avait une amélioration dans l'utilisation des agrégats. Les premiers agrégats emploient D₃, D₄ de l'époque antique sont aux moins deux fois plus grand que celles employés à la fin de la période médiévale. Par contre celles utilisées dans la première et la seconde période de construction de la Citadelle d'Alger ont des valeurs intermédiaires.

Tableau n° 18 : Résultats de la masse volumique des agrégats

Echantillons	Masse volumique (g/cm ³)
D ₃	2,666
D ₄	2,613
PD ₁	2,006
PB ₂	1,934
PD ₃	1,333
NV	1,421

II.7. Choix final des échantillons représentatifs

Pour une recherche approfondie sur la technologie et le comportement mécanique des mortiers, nous avons procédé à la sélection finale des échantillons représentatifs. Ces échantillons ont subi différentes analyses chimiques, minéralogiques, résistance à la compression et analyses de structure. Les échantillons retenus en total sept dont deux mortiers d'enduit de recouvrement et qui sont les suivants : D₂, D₄, PD₁, PD₃, P₁, P₂, PB₂.

II.8. Résultats de la caractéristique mécanique

Dans ce volet nous avons effectué l'essai de la résistance à la compression sur les mortiers de maçonneries, qui se trouve moins préservés dans les sites. Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau n° 19 et 20.

Tableau n° 19 : Résultat de l'essai de la résistance mécanique à la compression (djemila)

Echantillons	Résistance à la compression(MPa)		Coefficient de ramollissement (R _w)
	A sec	Saturée d'eau	
D ₄	1,440	0,430	0,300

Tableau n°20 : Résultat de la l'essai de la résistance à la compression (Citadelle d'Alger)

Echantillons	Résistance à la compression (MPa)		Coefficient de ramollissement (R _w)
	A sec	Saturée d'eau	
PD ₁	2,611	1,634	0,629
PD ₃	3,007	2,014	0,670
P ₁	3,555	2,602	0,732
PB ₂	2,545	1,572	0,618

La résistance mécanique à la compression des mortiers est une caractéristique d'importance pour savoir l'état de préservation des structures. Elle est en relation directe avec la porosité des mortiers.

La résistance des mortiers de Djemila est très faible par rapport à celles obtenues lors de l'essai sur les mortiers de la Citadelle, cela est approuvé par les résultats de l'essai de la porosité.

Le calcul du coefficient de ramollissement nous indique sur la capacité des mortiers de résister au climat humide. On constate que les échantillons de Djemila possèdent un faible coefficient de ramollissement et cela est vérifié par le test de friabilité.

Concernant les mortiers de la Citadelle d'Alger, on trouve le mortier de construction des murs intérieur de la poudrière qui possède une valeur proche à celle obtenue avec D₄, parce que ce type de mortier se trouve aujourd'hui bien conservé, et moins de charges exercées sur cette maçonnerie.

Enfin, on constate que la plus part des échantillons testés sont perdus en partie leur résistance mécanique. Cet effet est confirmé qu'avec un ongle on peut extraire des particules, ce qui témoigne de la perte de certaines caractéristiques des liants.

II.9. Caractéristiques physico-chimiques

II.9.1. Résultats de l'essai à l'humidité

L'objectif de cet essai est de tester la capacité d'absorption de l'humidité par les échantillons représentatifs. Pour cela, nous avons préparé un milieu à 96% d'humidité au moyen de la solution d'H₂SO₄. Les résultats de cet essai sont inscrits dans le tableau n° 21.

Tableau n° 21 : Résultats de l'essai à l'humidité

Temps (Min) / Masse de l'échantillon (g)	0	3	6	9	15	30	60	120	240	8640
D ₄	0	3,010	4,600	4,923	5,013	5,023	5,873	5,869	6,900	6,910
D ₁	0	3,987	4,222	4,767	4,903	5,036	5,0766	5,080	5,091	5,092
P ₁	0	4,333	7,981	8,0122	8,230	8,501	8,580	8,590	8,910	9,929
PD ₃	0	2,293	3,54	4,333	4,465	4,554	4,678	4,785	4,987	4,998
P ₂	0	3,012	3,456	3,567	3,666	5,830	5,123	5,333	5,432	5,410
PD ₁	0	1,877	2,333	2,940	2,900	3,013	3,333	3,455	4,110	4,121
PB ₂	0	2,134	2,980	3,144	3,200	3,750	4,001	4,666	4,700	4,810

On constate que l'échantillon P₁ (mortier blanc) présente une absorption à 3 et à 8640 minutes plus importantes, le double de la quantité absorbée par les échantillons PD₁, PD₃ et PB₂ et cela est due à la nature de leurs constituants et à leur porosité ouverte.

II.9.2. Résultats des analyses chimiques

Les résultats des analyses chimiques sont inscrits dans le tableau n° 22. L'étude de cette analyse nous a permis de constater que la teneur de CaO est très élevée dans le cas des échantillons PB₂, P₁, D₃ et D₁, ces teneurs comprises entre 41,823 et 45,810 % par contre les échantillons PD₂ et PD₃ ont des valeurs de 36,286 et 37,310%. Quant au dernier échantillon PD₁ possède une valeur inférieure, mais il est riche en Al₂O₃ (8,382%) et en oxydes de Fe₂O₃ et TiO₂ par rapport au reste des échantillons.

Tableau n° 22 : Résultats de l'analyse chimique

Oxyde échantillon n	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
D ₁	11,360	2,465	1,861	45,248	0,554	0,376	0,275	0,563	0,150	0,240	0,031
D ₄	20,984	4,746	2,497	35,940	0,742	0,140	0,470	0,476	0,322	0,289	0,020
P ₁	10,095	3,065	2,435	45,810	0,832	0,243	0,659	0,786	0,248	0,137	0,088
PD ₃	18,771	7,058	4,581	37,319	0,755	0,139	1,030	0,517	0,458	0,06	0,117
P ₂	15,642	6,520	4,114	36,286	1,012	0,287	1,341	1,951	0,403	0,049	0,113
PD ₁	22,360	8,382	5,096	32,628	0,931	0,542	1,458	0,854	0,590	0,109	0,126
PB ₂	12,818	4,215	2,637	41,823	1,065	0,850	0,865	1,591	0,286	0,104	0,099

II.9.3. Résultats des analyses minéralogiques

Les résultats d'analyse aux rayons X sont représentés dans les figures : 24, 25, 26, 27 et 28.

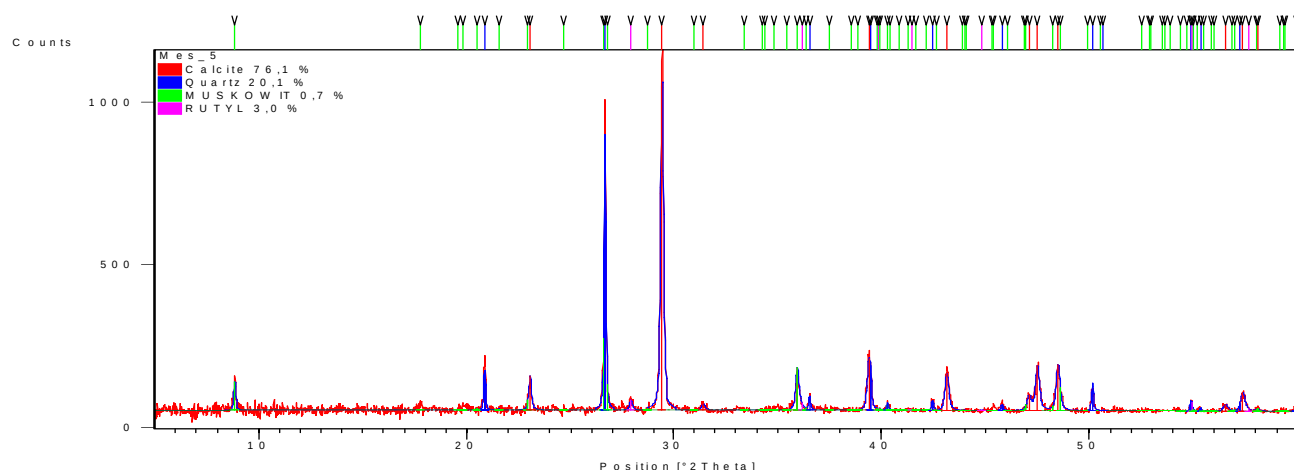


Fig. n° 24 : Radiogramme RX de l'échantillon D₄

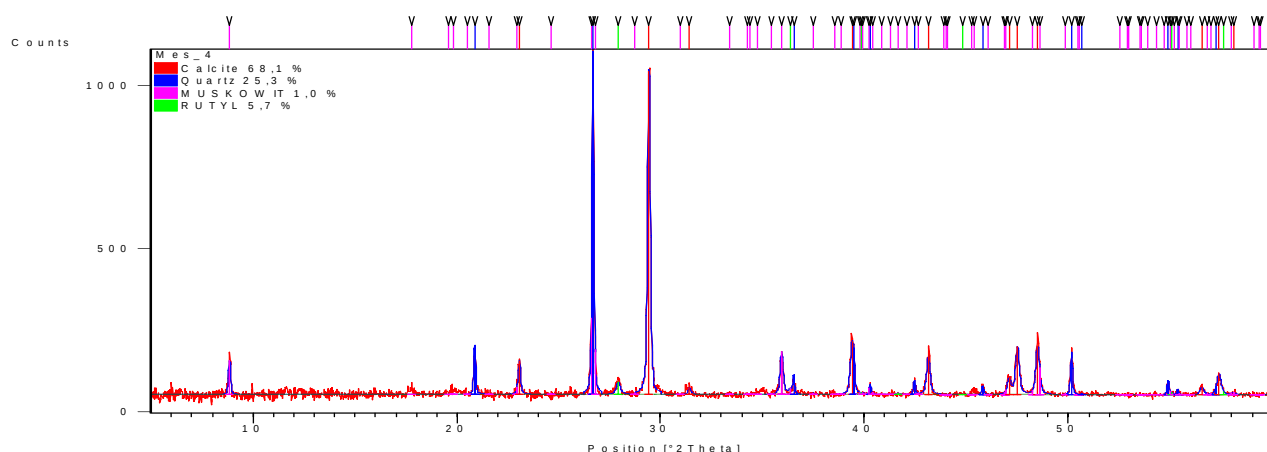


Fig. n° 25 : Radiogramme RX de l'échantillon PB₂

D'après les figures n° 24 et 25 des radiogrammes RX, les échantillons PB₂ et D₄ sont composés essentiellement de la calcite, caractérisée par les raies de diffraction : $d = 3.856 \text{ \AA}^\circ$, $d = 3.028 \text{ \AA}^\circ$, $d = 2.84 \text{ \AA}^\circ$, $d = 2.285 \text{ \AA}^\circ$, $d = 2.095 \text{ \AA}^\circ$, $d = 1.928 \text{ \AA}^\circ$, $d = 1.912 \text{ \AA}^\circ$, $d = 1.876 \text{ \AA}^\circ$.

La formation de ce minérale est traduite par la réaction suivante :



La présence de quartz, caractérisée par les raies de diffraction : $d = 4.255 \text{ \AA}^\circ$, $d = 3.343 \text{ \AA}^\circ$, $d = 2.457 \text{ \AA}^\circ$ qui est due à l'ajout de la terre active au mortier.

La présence des traces de la moscovite, caractérisée par les raies de diffraction : $d = 5,049 \text{ \AA}^\circ$, $d = 3.370 \text{ \AA}^\circ$, $d = 2.570 \text{ \AA}^\circ$ qui provienne de l'ajout de la terre active et d'agréats céramiques. Ainsi que le rutile (TiO₂)

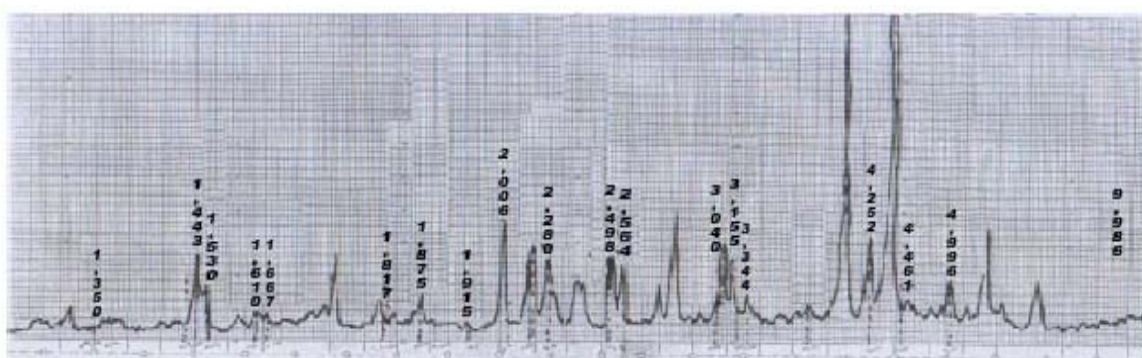


Fig. n° 26 : Radiogramme RX de l'échantillon P₁

L'analyse du spectre RX de l'échantillon P₁ de la figure n° 26 a montré :

La présence de quartz (SiO₂), caractérisée par les raies de diffraction : $d = 4.252 \text{ \AA}^\circ$, $d = 3.344 \text{ \AA}^\circ$ et $d = 3.040 \text{ \AA}^\circ$, est due à l'ajout des agrégats de silex (sable de rivière) au mortier.

L'étude de radiogramme RX de la figure 28, nous a montré :

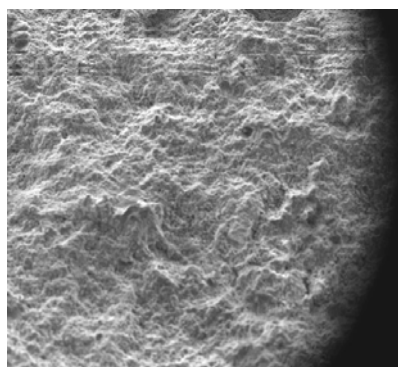
La présence de la calcite dans les raies de diffraction $d = 4.238 \text{ \AA}$, $d = 3.842 \text{ \AA}$, $d = 3.035 \text{ \AA}$, $d = 2.277 \text{ \AA}$, $d = 1.910 \text{ \AA}$, $d = 1.870 \text{ \AA}$.

La présence de l'apophyllite, $\text{KCa}_4[(\text{F}, \text{OH})|(\text{Si}_4\text{O}_{10})_2] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, caractérisée par les raies de diffraction : $d = 3.176 \text{ \AA}$, $d = 3.023 \text{ \AA}$, $d = 1.665 \text{ \AA}$, $d = 1.600 \text{ \AA}$, $d = 1.438 \text{ \AA}$, $d = 1.252 \text{ \AA}$ qui est due à l'ajout des agrégats de mica et de la terre active.

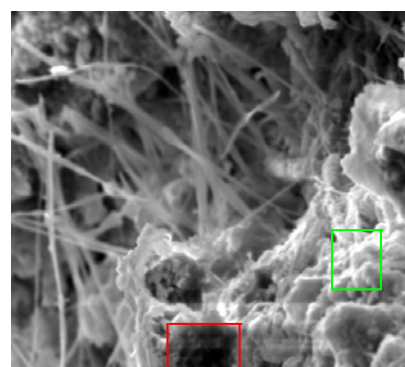
La présence de quartz $d = 4.258 \text{ \AA}$, $d = 3.342 \text{ \AA}$, $d = 1.972 \text{ \AA}$ qui est due à l'ajout des agrégats de mica et de la terre active.

II.9.4. Résultats des analyses structurales (MEB)

Les résultats d'analyse au microscope électronique à balayage, MEB sont représentés dans les figures n° : 29, 30, 31, 32 et 33.

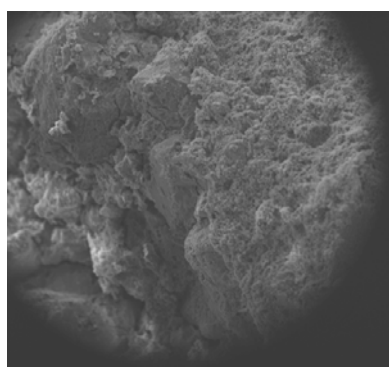


AG. $\times 67$

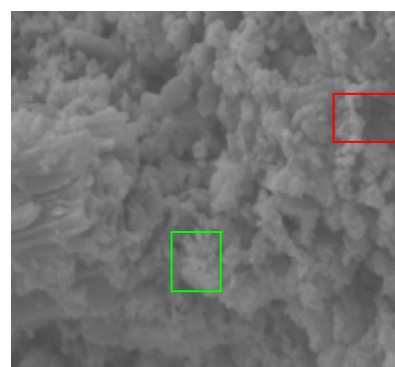


AG. $\times 1000$

Fig. n° 29 : Echantillon D₄.

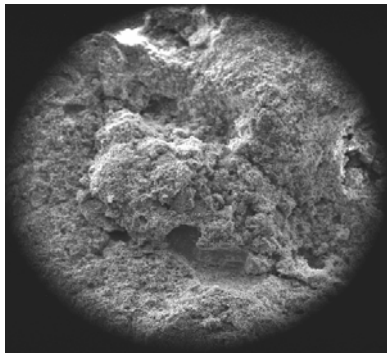


AG. $\times 50$

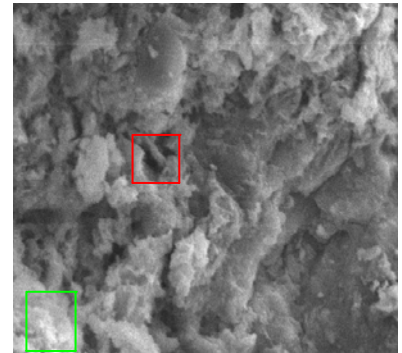


AG. $\times 1500$

Fig. n° 30 : Echantillon P₁.

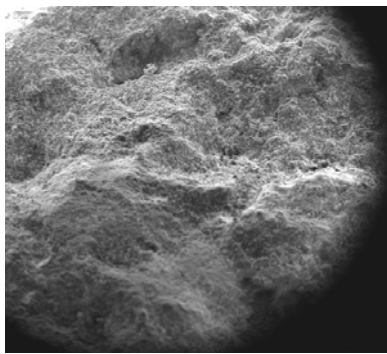


AG. $\times 30$

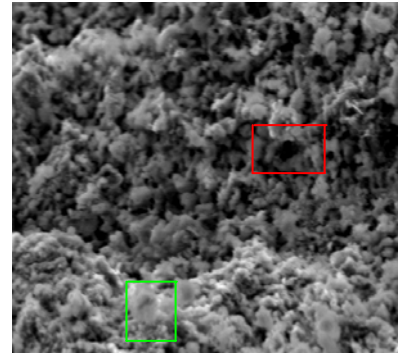


AG. $\times 2091$

Fig. n° 31 : Echantillon P₂.

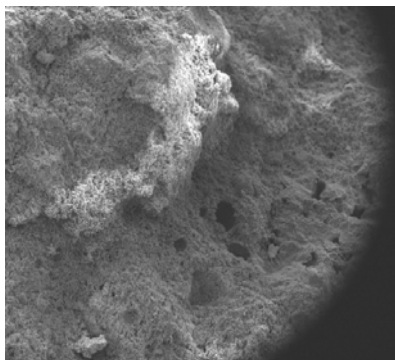


AG. $\times 1045$

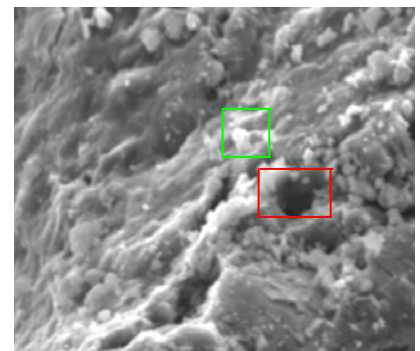


AG. $\times 1000$

Fig. n° 32 : Echantillon PD₃.



AG. $\times 40$



AG. $\times 1500$

Fig. n° 33 : Echantillon PB₂.



Agrégat céramique.



Calcaires fins remplissant les pores

AG : Agrandissement

L'analyse des résultats montre la présence d'un calcaire fin remplissant les pores des échantillons et la disposition des agrégats constituant les différents mortiers.

On ne constate aucune ressemblance entre les textures des différents échantillons étudiés, même entre le mortier de maçonnerie P_1 et l'enduit de revêtement P_2 malgré qu'ils ont les mêmes constituants de liant (plâtre et chaux). A cet effet, plusieurs paramètres rentrent en cause, on cite le facteur environnement, la composition et le mode de préparation de ces mortiers.

CAPITRE III

APPLICATION PRATIQUE DES RESULTATS DE LA CARACTERISATION DES MORTIERS.

Pour mettre en exergue cette caractérisation, nous avons donné deux applications, la premier est une estimation de l'état de préservation de la façade Est du palais du Dey (partie bibliographique, III.2.3.3, Fig. 8) et dans la seconde, nous avons donné une composition de mortier pour la restitution des murs des façades. 6

III.1. Estimation de l'état de préservation de la façade Est du palais du Dey

Notre démarche commence par un calcul statique de la façade en question afin d'estimer la contrainte théorique exercée sur les mortiers composant les murs de la partie inférieure (rez-de-chaussée) du monument. Parallèlement, on détermine la contrainte exercée sur les mortiers constituant les murs de la même partie au niveau du laboratoire.

Le rapport entre ces contraintes pratique et théorique donne l'état de préservation de cette façade du palais.

III.1.1. Hypothèse des calculs statiques

Les hypothèses sont posées sur les masses volumiques déterminées au laboratoire et certains dimensions des structures retenues dans l'étude de PKZ.

a. Masses volumiques des matériaux adaptés pour les calculs statiques.

Mortier de pose et brique de construction

$$M_v = 1970 \text{ Kg/ m}^3$$

Couche de remplissage sur les planches, on a adapté le poids moyen des gravats céramique, de l'argile, de chaux et de la pierre calcaire

$$M_v = 1800 \text{ Kg/ m}^3$$

Le bois

$$M_v = 1000 \text{ Kg/ m}^3$$

III.1.2. Poids des éléments de construction adaptés pour les calculs statiques

a. Structure d'un plancher en bois

La structure ancienne d'un plancher en bois est un assemblage de planches posées sur des rondins. Pour calculer le poids de cette structure, on calcule séparément le poids de plancher et celui des rondins.

La planche

$$P_{\text{plancher}} = M_v \cdot e \quad , \quad e : \text{épaisseur du plancher en m.}$$

$$P_{\text{plancher}} = 1000 \times 0,015$$

$$P_{\text{plancher}} = 15,00 \text{ Kg/ m}^2$$

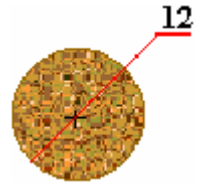
Les rondins

On a admis que les rondins de diamètre égale à 12 mm et sont espacés $t = 250$ mm.

$$\text{La surface du rondin } S = \frac{3,14 \times (0,12)^2}{4}$$

$$P_{\text{rondin}} = \frac{s \times M_v}{t}$$

$$P_{\text{rondin}} = \frac{\frac{3,14 \times (0,12)^2}{4} \times 100}{0,25} \quad P_{\text{rondin}} = 45,2 \text{ Kg/m}^2$$



- Calcul le poids de la structure du plancher en bois égale (P_{sp})

$$P_{sp} = P_{\text{plancher}} + P_{\text{rondin}}$$

$$P_{sp} = 60,20 \text{ Kg/m}^2$$

On prend

$$P_{sp} = 61 \text{ Kg/m}^2$$

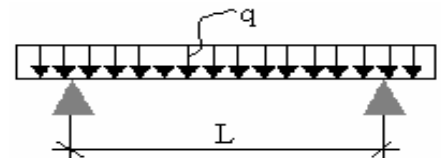
b. Calcul le poids du mur entre les pièces AE – 005 et AE 001 (plan de coupe, annexe Fig. 3 et 4).

Pour calculer le poids exercé sur le mur en question, on calcul avant tout le poids de chaque plancher constituant les pièces de l'espace AE – 005 et AE 001 puis le poids exercé par les murs pour chaque étage. La somme de ces charges est le poids exercé sur le mètre linéaire de la structure (mL).

Calcule des charges

$$P_i = (M_v \times e + P_{sp}) \times L$$

où L : longueur du plancher, en m



Charges appliquée sur chaque pièce en mètre linéaire

Plancher au-dessus de la pièce AE – 301

$$P_1 = (0,32 \times 1800 + 61) \times 1,3$$

$$P_1 = 828 \text{ Kg/mL}$$

Plancher au-dessus de la pièce AE 307

$$P_2 = (0,20 \times 1800 + 61) \times 1,97$$

$$P_2 = 830 \text{ Kg/ mL}$$

Plancher sur la pièce AE 202

$$P_3 = (0,24 \times 1800) \times 1,30$$

$$P_3 = 562 \text{ Kg/ mL}$$

Plancher sur la pièce AE 203

$$P_4 = (0,16 \times 1800 + 61) \times 1,95$$

$$P_4 = 681 \text{ Kg/ mL}$$

Plancher sur la pièce AE 102

$$P_5 = (0,36 \times 1800 + 61) \times 1,27$$

$$P_5 = 901 \text{ Kg/ mL}$$

Plancher sur la pièce AE 105

$$P_5 = (0,53 \times 1800 + 61) \times 1,90$$

$$P_6 = 1929 \text{ Kg/ mL}$$

Plancher sur la pièce AE 005

$$P_6 = (0,23 \times 1800 + 61) \times 1,25$$

$$P_7 = 594 \text{ Kg/ mL}$$

Poids exercé sur les murs de chaque étage en mètre linéaire

Mur du 3^{ème} étage

$$P_7 = 0,46 \times 3,27 \times 1970$$

$$P_8 = 2964 \text{ Kg/ mL}$$

Mur du 2^{ème} étage

$$P_8 = 0,50 \times 2,73 \times 1970$$

$$P_9 = 2689 \text{ Kg/ mL}$$

Mur du 1^{ème} étage

$$P_8 = 0,65 \times 4,07 \times 1970$$

$$P_{10} = 5212 \text{ Kg/ mL}$$

Mur du rez-de-chaussée

$$P_8 = 0,70 \times 3,87 \times 1970$$

$$P_{11} = 5337 \text{ Kg/ mL}$$

- Poids total entre les pièces AE – 005 et AE 001

$$P_T = \sum_{i=1}^{11} P_i$$

$$P_T = 22\,527 \text{ Kg/ mL}$$

c. Contrainte exercée au niveau du rez-de-chaussée provoquée par le poids propre de la structure (sans les charges de service).

$$\sigma = \frac{P_T}{F} \quad F : \text{surface du palais du Dey}$$

$$\sigma = \frac{22\,527}{100 \times 70} \quad \sigma = 3,22 \text{ MPa}$$

Les contraintes exercées sur les murs obtenues par essai de compression sur les mortiers de rez-de-chaussée (échantillon PD₁) égale : 2,611MPa.

III.1.3. Conclusion

Le rapport entre ces contraintes pratiques et théoriques est égal à 81,09%. Ce résultat indique que la structure constituant les pièces AE – 005 et AE 001 a subi une dégradation environ de 19%.

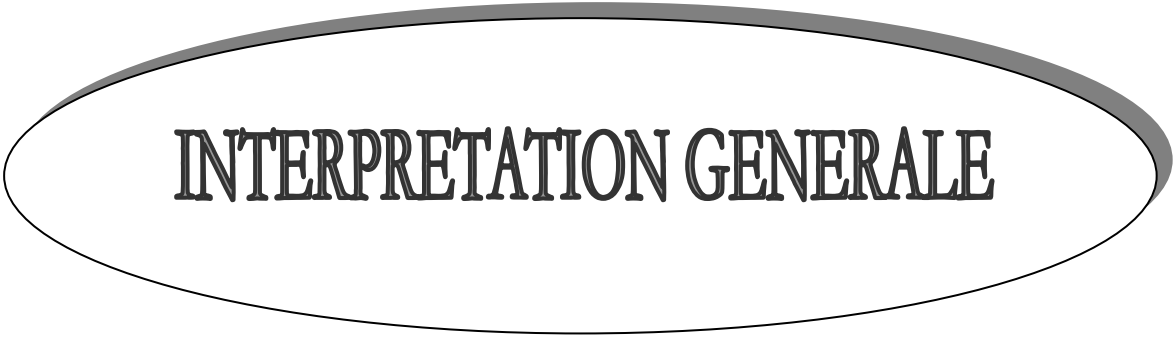
III.2. Proposition d'une composition de mortier de maçonnerie pour la restitution des murs

Pour la restitution des mortiers du dernier niveau du palais du Dey, nous avons proposé la composition représentée dans le tableau n° : 23. Ce mortier est de même aspect physique et il est de 4 fois plus résistant à la compression (R_C) que l'ancien. Sa préparation nécessite de suivre les indications ci-après :

- La granulométrie de la terre active est de 0 à 3mm
- La granulométrie de la cendre du bois est de 3 à 5mm
- L'agrégat du mica cuit à une température supérieure à 850°C
- On utilise l'eau potable pour le gâchage
- On laisse la chaux aérienne dans l'eau pendant 15 jours à une température normale (22 ± 2°C).

Tableau n° 23

Composants	chaux aérienne en pâte	terre active	Agrégats de mica cuits	eau	cendre de bois	R_C (MPa)
Pourcentage (%)	25	40	20	12	3	8,12



INTERPRETATION GENERALE

• INTERPRETATION GENERALE

Cette recherche que nous avons menée sur la caractérisation des mortiers archéologiques des sites historiques de Djemila et la Citadelle d'Alger sur divers plans : chimique, physique, mécanique et structurelle, nous a permis d'arriver aux résultats suivants :

• Sur le plan de caractérisation

L'analyse visuelle reste une analyse qualitative dans notre choix des échantillons. La référence à la détermination de certaines caractéristiques physico-chimiques est le moyen qui nous a permis de choisir les échantillons les plus représentatifs et de passer du cinquante échantillons aux sept qui sont : D₂, D₄, PD₁, PD₃, P₁, P₂ et PB₂.

Les mortiers de construction du site de Djemila n'ont pas donné une nette différence entre ces caractéristiques, cela en raison de sa pauvreté en typologie. Par contre, les mortiers du site de la Citadelle d'Alger ont donné une nette différence entre ces caractéristiques.

L'essai de friabilité a montré que les agrégats de Djemila s'effritent plus facilement par rapport à ceux de la Citadelle d'Alger. Ainsi, la quantité de la fraction inférieure à 50µm des échantillons de Djemila est plus grande à celle de la Citadelle d'Alger ce qui montre la fatigue du liant utilisé.

La détermination de la masse volumique des agrégats nous a permis de constater qu'il avait leur amélioration à travers le temps. Les agrégats composant les échantillons D₃, D₄ (2,666, 2,613 g/cm³) de l'époque Romaine sont deux fois plus grand que celles employés à la fin de la période médiévale, échantillon PD₃ (1,333 g/cm³).

Les échantillons saturés d'eau perdent plus d'une partie de leur résistance à la compression, cela est confirmé par la détermination des coefficients de ramollissement des échantillons PD₁, PD₃, P₁, PB₂ (0.629, 0.670, 0.732, 0.618).

L'essai à l'humidité a montré que les mortiers utilisés dans la construction des sites de Djemila et de la Citadelle d'Alger sont étanches, cela est constaté par les quantités d'humidités absorbées au bout de 3 min qui ne changent pas qu'au bout de 4h. Elle est due à l'ajout des hydrophobisants.

L'échantillon PD₁ a montré la plus faible teneur d'humidité en opposition par rapport aux autres échantillons à savoir : D₄, D₁, P₁, PD₃, P₂ et PB₂, cela explique que cet échantillon est riche en élément hydrophobisant à la surface.

• Sur le plan technologique

L'étude des lots d'échantillons nous a permis de connaître les compositions utilisées dans la préparation des mortiers et l'amélioration de la masse volumique des agrégats utilisés à ces époques (antique et médiévale).

Composition des mortiers

Les mortiers de Djemila sont constitués de la terre active, de la chaux, des agrégats céramiques crus ou cuits et de la cendre de bois. Ce mélange est composé des minéraux; de calcite, de quartz, de rutile et de moscovite

En ce qui concerne les enduits de recouvrement, ils sont préparés de la même façon et sont utilisés en mono-couche.

Quant aux mortiers de la Citadelle d'Alger, on constate le transfert technologique pratiqué durant la période antique, cela est démontré par l'utilisation de mêmes compositions dans la construction des monuments, durant le début de construction du site, cela est remarqué dans les étages inférieurs (échantillon PB₂). Par contre dans les derniers étages de sa construction, il a été procédé à l'utilisation de la roche mica cuite qui remplace les agrégats céramiques qui sont plus lourds. Ainsi, on constate l'absence de l'utilisation de la cendre du bois dans les mortiers de construction des étages supérieurs (échantillon PD₃). Ces derniers sont composés des minéraux : de calcite, de quartz et de l'apophyllite.

Le mortier de couleur blanche utilisé dans la construction des cloisons intérieures de la poudrière et certaines parties des murs de palais du Dey, il est composé d'un mélange de chaux, de gypse et d'agrégats en silex (sable de rivière grossier) avec un ajout d'os. Le mélange subit une cuisson qui permet la transformation d'os en cendre, dit cendre animale qui améliore l'hydrophobisation des mortiers. Il est composé des minéraux : de calcite, de quartz, de caoxite, de plâtre hydraté et de phlogopite.

L'enduit de recouvrement est composé selon sa destination sur le support : de gobtis qui est en général de même composition que les mortiers de maçonnerie, cela pour une meilleure compatibilité entre les matériaux. Cette couche d'égalsation est recouverte d'une couche de finition, composée de chaux, de plâtre et d'agrégats céramiques fins.

Il n'est pas exclu que la silice présentée dans les mortiers, proviennent des aluminosilicates ainsi que des terres actives du type scorie volcanique.

Quant à l'ajout des matières organiques qui assurent l'imperméabilisation des mortiers, nous n'avons pas constaté des traces qui témoignent de leur emploi, elles peuvent être dégradées. Par contre on a retenu l'existence de la cendre du bois dans les échantillons des deux sites et la présence d'os (le noir animal) uniquement dans les échantillons de la Citadelle d'Alger.

Agrégats

Dans les charges qui composent les mortiers de Djemila, nous avons démontré une évolution dans l'emploi des agrégats, en partant de celles moins résistants à l'eau à base d'argile crue qui à une masse volumique égale 2,666 g/cm³, en passant par un agrégat résistant à l'eau et cela après son amélioration par un processus thermique. Il a été procédé à l'emploi du même agrégat céramique bien cuit résistant à l'action de l'eau et participe dans la résistance mécanique des mortiers et qui a une masse volumique égale 1,833 g/cm³. Cette amélioration dans les agrégats est le fruit de naissance des bétons romains.

Dans le même contexte d'emploi des agrégats, nous avons constaté aussi une amélioration dans leur emploi dans le cas des mortiers de la Citadelle d'Alger. Cette amélioration réside dans la substitution d'agrégats plus lourds à ceux qui sont légers à base de la roche mica cuite, qui a une masse volumique égale à 1,333 g/cm³, et cela dans la construction des monuments à savoir : les étages supérieurs du palais du Dey et des Beys, la nouvelle mosquée et les murs extérieurs de la poudrière.

Le sable en tant que l'un des composants de mortier de construction dans le processus de sa préparation n'a pas été constaté.

- **Sur le plan de préservation**

Le site Djemila est tombé en ruine depuis des années et se trouve de plus en plus en péril, à cause de la fatigue provoquée par divers facteurs de dégradations à savoir : l'action du gel/dégel, les facteurs biologiques, le vieillissement naturel et le facteur humain.

Nous avons constaté dans l'essai de la résistance mécanique sur les échantillons saturés d'eau que leurs résistances sont diminuées de leurs moitiés.

Compte tenu de l'état de préservation de la Citadelle d'Alger, Nous avons procédé à une évaluation de l'état de préservation d'une façade du palais du Dey qui se trouve menacée par divers facteurs de dégradation à l'instar : des charges exercées par les structures, l'effet de l'humidité, les variations de température et les facteurs de vibration. Ce calcul permis d'estimer cet état de préservation de la façade à environ 81%. Ce résultat montre la nécessité d'une intervention urgente avant tout risque d'effondrement.

Les mortiers de construction ne sont pas les seules références à la détermination de l'état de préservation de la façade du palais, car les murs du monument sont constitués de plusieurs matériaux, chacun d'eux suit un comportement mécanique à long terme et ayant une résistance vis-à-vis des agents de dégradation.

- **Sur le plan chronologique**

En résultat de cette caractérisation, nous sommes arrivés à confirmer la chronologie de construction des monuments composant le site Citadelle d'Alger assignée par les historiens et les archéologues :

1516 – 1590 : Construction des remparts, les bastions, les premiers niveaux des palais du Dey et des Beys, le rez-de-chaussée de la nouvelle mosquée et la poudrière qu'à connue l'extension après l'arrivée de l'avant Dey Ali Khodja.

1590 – 1817 : Construction des seconds niveaux et adaptation des batteries au système de défense.

1817 – 1830 : La construction des niveaux supérieurs des édifices (deuxième et troisième étage palais du Dey, la poudrière, la nouvelle mosquée et le troisième et quatrième niveau du palais des Beys).

CONCLUSION GENERALE

• CONCLUSION GENERALE

. Les mortiers de maçonnerie et de recouvrement de Djemila sont préparés à base d'un mélange de la terre active, de la chaux, des agrégats céramiques crus ou cuits et de la cendre de bois avec éventuellement un ajout d'eau.

. Pour les mortiers de la Citadelle d'Alger, il a été procédé à l'utilisation de la roche mica cuite qui remplace les agrégats céramiques qui sont plus lourds que ces derniers. Concernant le mortier de maçonnerie de couleur blanche utilisé dans la construction des cloisons intérieures de la poudrière et certaines parties des murs du palais du Dey, il est composé d'un mélange de gypse, de la chaux, d'agrégats en silex (sable de rivière grossier) et des os. Le mélange a subi une cuisson qui transforme les os en cendre, dit cendre animale qui améliore l'hydrophobisation de ces mortiers. De plus, on a constaté dans le mortier de recouvrement des murs de même monument la substitution des agrégats en silex par la terre active riche en agrégats de mica.

. Au long de ces deux périodes (antique et médiévale), nous avons constaté une amélioration dans la masse volumique des agrégats $2,666 \text{ g/cm}^3$ (site de Djemila) et $1,333 \text{ g/cm}^3$ pour ceux des mortiers de construction des niveaux supérieurs de la Citadelle d'Alger. Comme nous avons évalué l'état de préservation de la façade Est du palais du Dey qui est conservée à environ 81 %. Ce résultat montre que le calcul à la base des mortiers n'est pas suffisant pour une évaluation exacte de l'état de préservation de la façade du palais.

. En résultat de cette caractérisation, nous sommes arrivés à confirmer la chronologie de construction des monuments composant le site Citadelle d'Alger assignée par les historiens et les archéologues : la première période entre 1516 – 1590, la seconde période entre 1590 – 1817 et la dernière période entre 1817 – 1830.



BIBLIOGRAPHIE GENERALE

• BIBLIOGRAPHIE GENERALE

Ouvrages

- 1- A.DESSART & J.JODOGNE & J.PAUL «Chimie minérale notions de chimie nucléaire », Tome II, éd. A. DE BOECK. Bruxelles 1979.
- 2- C.ALZONNE «l'algerie », éd. Fernand NATHAN. Paris VI 1938.
- 3- D. Guillemard & C. Laroque «Manuel de conservation préventive, gestion et contrôle des collections », Université Paris I. Paris 2001.
4. Ecole d'Avignon «Technique et pratique de la chaux », VIII^{ème} tirage, éd. Eyrolles. Paris 1997.
- 5- George TORRACA « les matériaux de construction poreux, science des matériaux pour la conservation architecturale » Traduit de l'original anglais par C. DI MATTEO. ICCROM. Rome 1986.
- 6- Georges DREUX & Jean FESTA «Nouveau guide du béton et de ses constituants » éd. Eyrolles. Paris 1969.
- 7- G. MARCAIS « l'architecture musulmane d'occident » Paris 1952. P438.
- 8- H. KHEIN «Feuillet d'El Djair, le vieil Alger et sa banlieue » Tome III, Archive du ministère de la guerre. Paris 1912.
- 9- J. DELBECQ & G. SACCHI « Restauration des ouvrages et des structures » éd. Ecole nationale des ponts et chaussées. Paris 1993, P551.
10. Jean-Marc LAURENT « Restauration des façades en pierre de taille » éd. EYROLLES. Paris 1994.
- 11- J. P. ADAM « La construction romaine, matériaux techniques » II^{ème} éd. G. M. Picard. Paris 1989.
- 12- J. P. DELPECH « Pratique du moulage » III^{ème} éd. Eyrolles. Paris 1999.
- 13- M. Cl. BERDUCCO «La conservation en archéologie » éd. Masson. Paris 1990, P 309.
- 14- M. FEILDEN & J. JOKILEHTO «Guide de gestion des sites du patrimoine culturel mondial » Traduit de l'anglais par J. Dubois, éd. ICCROM. Rome 1996.
- 15- Marc. MAMILLON « Pathologie et restauration des constructions en pierre» série 00184 Rome 1972.
- 16- M. Venual «La pratique des ciments, mortiers et bétons » Tome1, éd. Moniteur. Paris 1989.

- 17- N. GAID « l'Algérie sous les Turcs » éd. Mimouni. Alger 1991, P236.
- 18- S, M. JOHNSON «Dégradation, entretien et réparation des ouvrages de génie civil » Traduit par M. LONDEZ, éd. Eyrolles. Paris V 1969.
- 19- Tean PERDIJON «Aide mémoire : contrôle des matériaux » éd. DUNOD, Paris 2003.
- 20- Philippe BOUDON & Philippe DESHAYES «VIOLLET-LE-DUC : le dictionnaire d'architecture » éd. Pierre Mardaga. Bruxelles 1979.
- 21- Vitruve « Les dix livres d'architecture » Corrigés et traduits en 1684 par C. PERRAULT. éd. Pierre Mardaga. Paris.
- 22- V. Biston « Manuel théorique et pratique du chauxfournier, 1836 » Réédition Léonce Laget. Paris 1981.
- 23- Y. M. FROIDEVAUX « Technique de l'architecture ancienne : construction et restauration » éd. Pierre Mardaga. Bruxelles 1986.
- 24-Wilfried Kurz Jeam & P. Mercier Gerald Zambelli « Traite des matériaux de construction : Introduction à la science des matériaux ». Paris 1996.

Actes et séminaires

- 1- A. BOSSOUTROT « Enduits et Mortier archéologiques » Analyse et restauration des enduits : les travaux antérieurs, éd. CNRS. Paris 1991.
- 2- MEBROUKI & N. BELAS BELARIBI & N. BOUHAMOU & M. CYR « Contribution à l'étude de l'influence de la pouzzolane de BENISAF sur les caractéristiques mécaniques des mortiers ». Séminaire Bebelzouar 2003.
- 3- M. BENCHEIKH & M. BELOUADAH & M. CYR & P. CLASTRES « Effet des adjuvants sur la perméabilité et la porosité d'un béton à base de matériaux locaux sous conditions climatiques ». Séminaire Beb El Zouar 2003.
- 4- M. HAMIANE & M. FELAH & A. BOUKHANOUF « Etude et essais sur les matériaux architecturaux des murs du site archéologique de la Citadelle d'Alger ». VI^{ème} séminaire international Forum UNISCO, Valenncia, Espagne 2001.
- 5- Revue : « Pétroarchéologie de mortiers GALLOS-ROMAINS application des méthodes analytiques à l'étude des thermes du vieil-Evreux » éd. CNRS. Paris 1993.

Thèse de magister

- 1- A. KHELLASSI «Casbah d'Alger : Citadelle et palais de Dey » Institut d'Archéologie, université d'Alger 1985.
- 2- GHERNOUTI Youcef «Les bétons à hautes performances » Thèse de Magistère en science des matériaux. Université Boumerdes 2003.

Document Technique Unifie et Normes

- 1- ASTM d 560 influence des fillers des déchets de briques sur la rétention d'eau et la résistance au gel du béton de sable de dunes Mourad Hadjoudja, Madani Bederina, Laboratoire de Génie Civil, Institut de Génie Civil, Université de Laghouat
- 2- Document Technique Unifie, n° 26.1, référence AFNOR DTUP 15-201 : Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Chapitre 2 : Matériaux, mai 1990.
- 3- «Guide de la conception parasismique des bâtiments », association française du génie parasismique, 2^{ème} tirage, éd. Eyrolles. Paris 2004.

Dictionnaires

- 1- Dictionnaire encyclopédique, Petit Larousse. éd. Librairie Larousse. Paris VI, 1984. P360.
- 2- Dictionnaire des sciences de sol, minéraux définitions. Paris 1982. P 192
- 3- Petit dictionnaire LAROUSSE en couleur, éd.17, Montparnasse. Paris VI^e 2003

Cours international

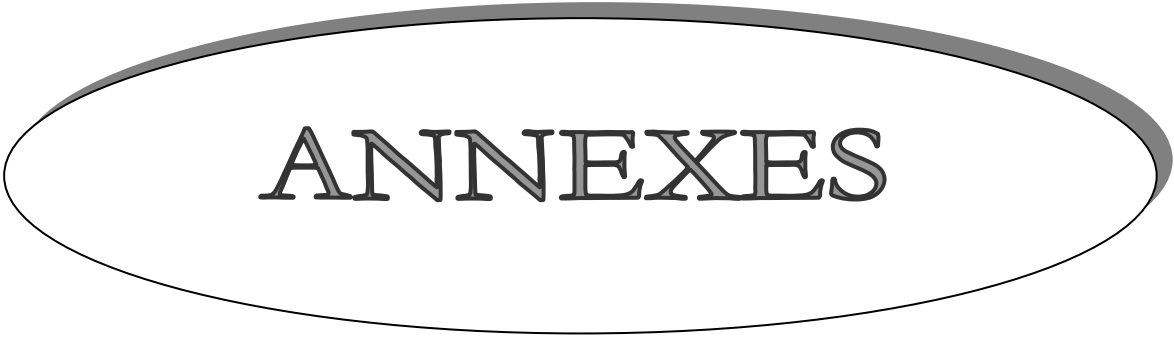
- La dégradation et la conservation de la pierre, textes des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre. Publie sous la direction L. LAZZARINI, R. PIEPER, CC/88/WS.8. ICCROM 1988.

Sites internet

- 1- www.passerelleco.info, consulte le, 13 avril 2005. Revue : J. TOURNON, Construction en Terre et tremblements de terre. Revue n° 17 de l'hiver, publie le, 4 février 2004.
- 2- www.Inti.be/ecotopie/pise.html, consulte le, 10 mars 2005. P. DE NEYER, Construction en pise, terre actualités. Octobre 2003.

Rapports

- 1- Alessandra Melucco Vaccaro, la vulnérabilité des sites archéologiques (rapport final ICCROM), février 2002.
- 2- Centre National d'Etude et de Recherches Intégrées du Bâtiment, CNERIB. Travaux d'enduit pour bâtiments : DTR E 6.1. Souidania Alger.
- 3- Ministère de l'urbanisme et de l'habitat. ETAU. UNESCO/DWD atelier Casbah. Projet de revalorisation de la Casbah d'Alger. Alger 1984.
- 4- Y. ALLAIS « Rapport : Histoire de la ville de Djemila », Archive ANAPSMH, (17 pages). Alger 1948.



ANNEXES

Annexes A

Plans de masse des sites.

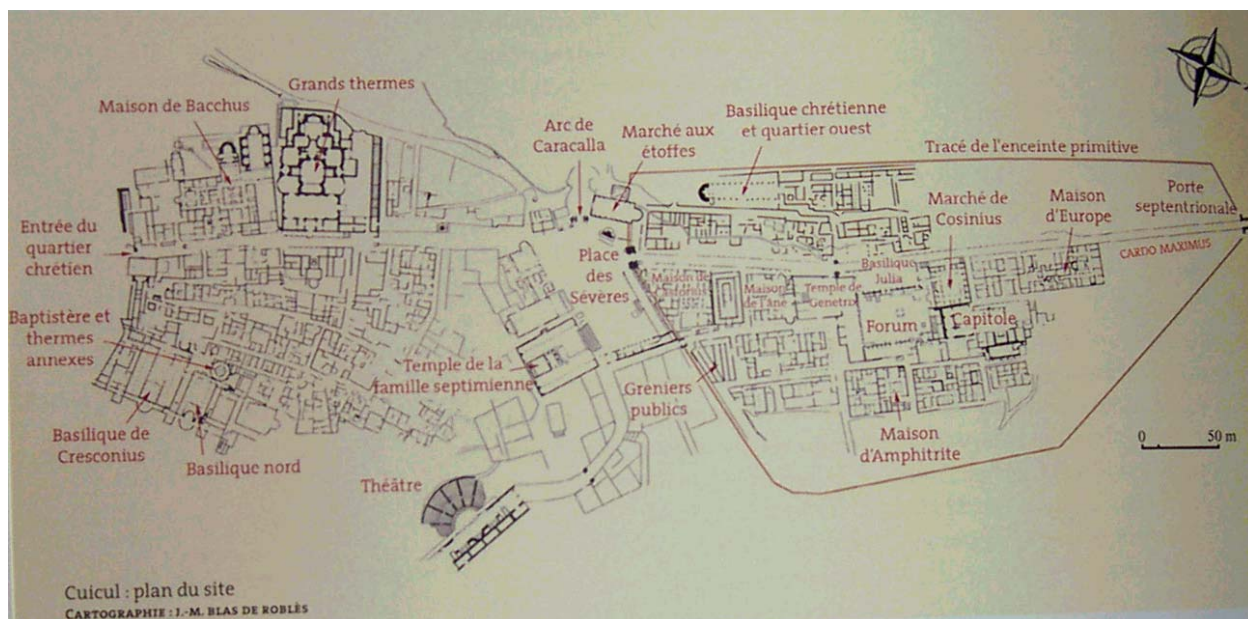


Fig. n° 1 : Plan de masse du site de Djemila (ancien ville encadrée en rouge).

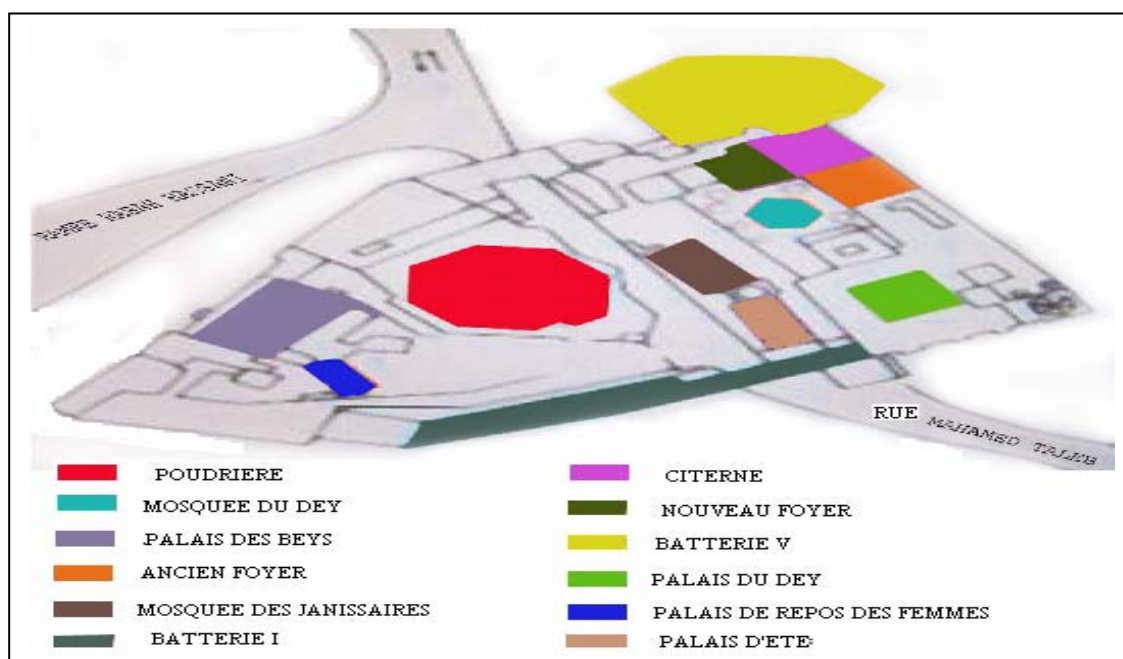


Fig. n° 2 : Plan de masse de la Citadelle d'Alger.

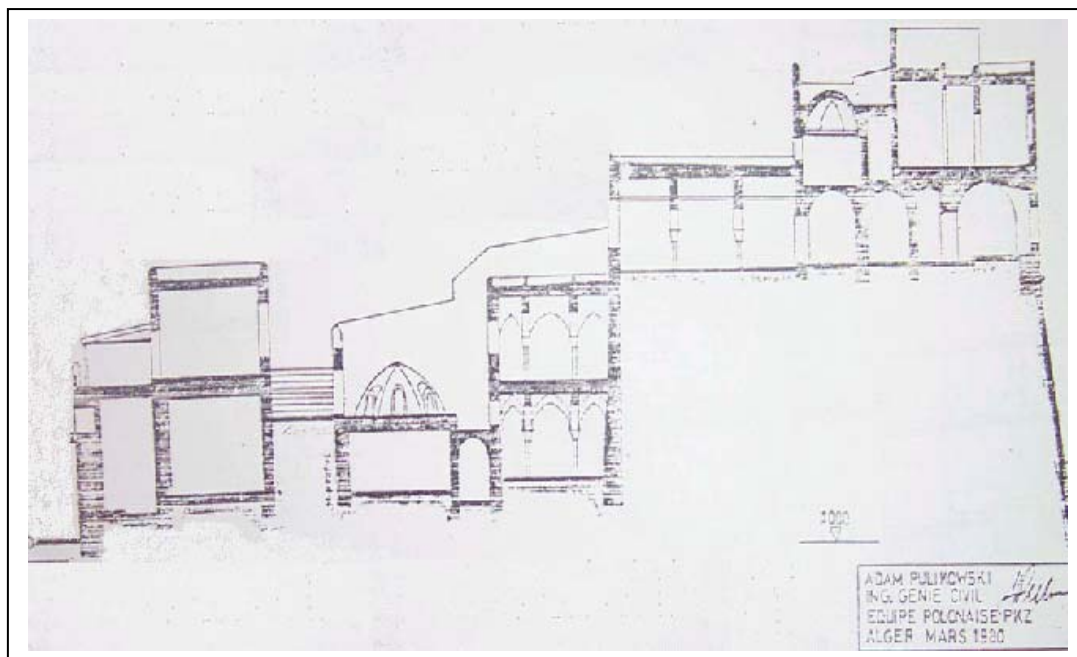


Fig. n° 3 : Plan de coupe 1-1, échelle 1/200 – Citadelle d'Alger

Annexes B

Tableau n° 1 : Facteurs de risque de la Citadelle d'Alger.

Facteurs de risque	La Citadelle d'Alger		
	Niveau de dangerosité		
	A	M	B
Interventions de conservation manquées	*		
Interventions de restauration manquées	*		
Interventions d'entretien manquées		*	
Interventions de conservation erronées	*		
Interventions de restauration erronées	*		
Interventions d'entretien erronées	*		
Usages touristiques culturels	*	*	
Autres usages			*
Facteurs hydrogéologiques	*		
Facteurs climatiques	*		
Facteurs sismiques	*		
Facteurs liés à la pollution	*		
Dégradation urbaine territoriale	*	*	
Carences au niveau de la gestion et de l'organisation			*

Légende :

- A : élevé
- B : Moyen
- C : Faible

Annexe C

Représentation des résultats d'essai graphique.

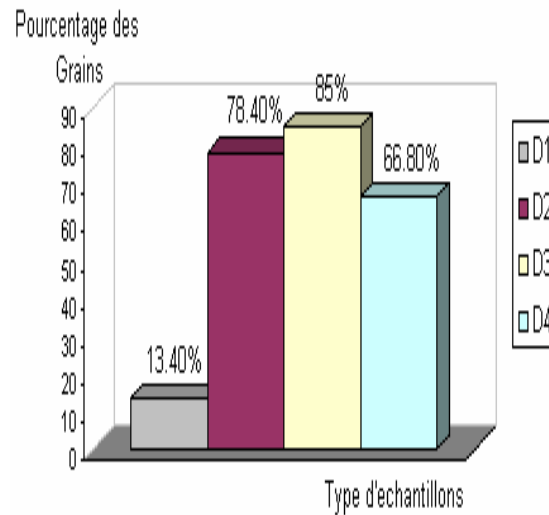


Fig. n° 5 : Essai de friabilité - lot d'échantillon de Djemila

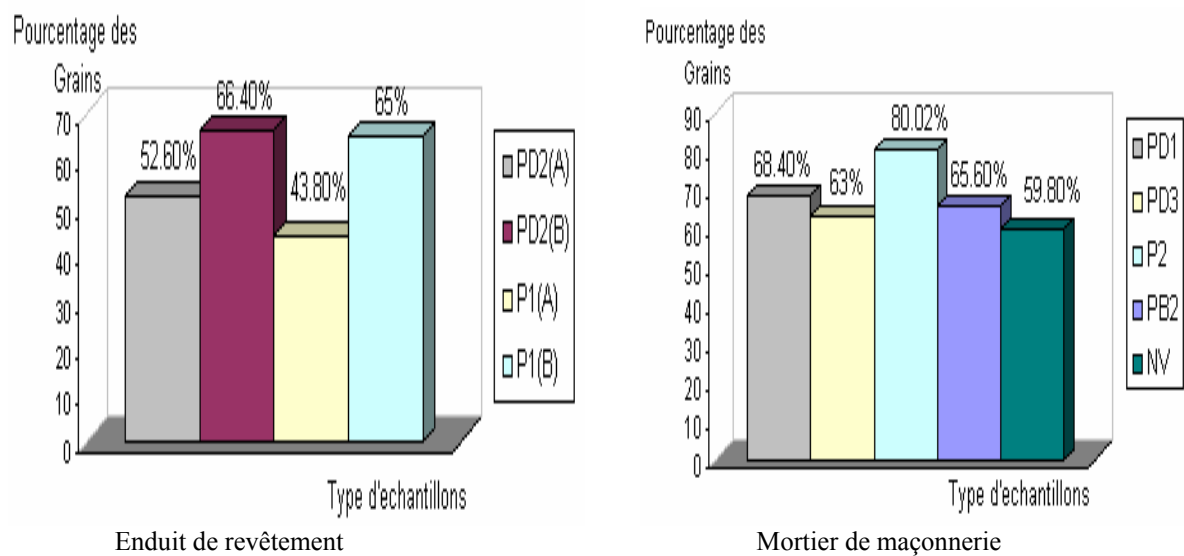


Fig. n° 6 : Essai de friabilité – lot d'échantillon de la Citadelle d'Alger.

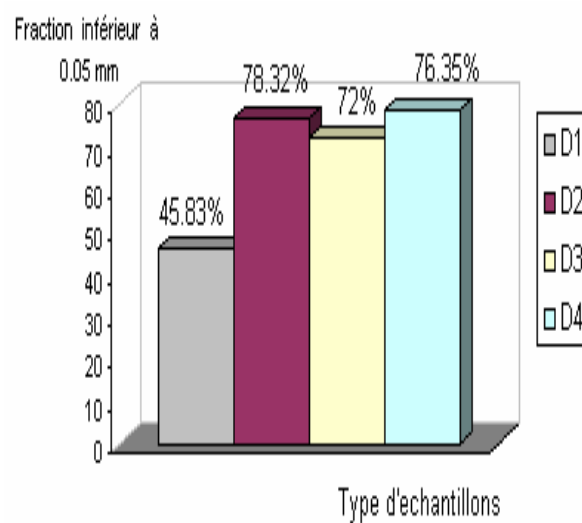


Fig. n° 7 : Fraction inférieure à 50 μm - lot d'échantillon de Djemila

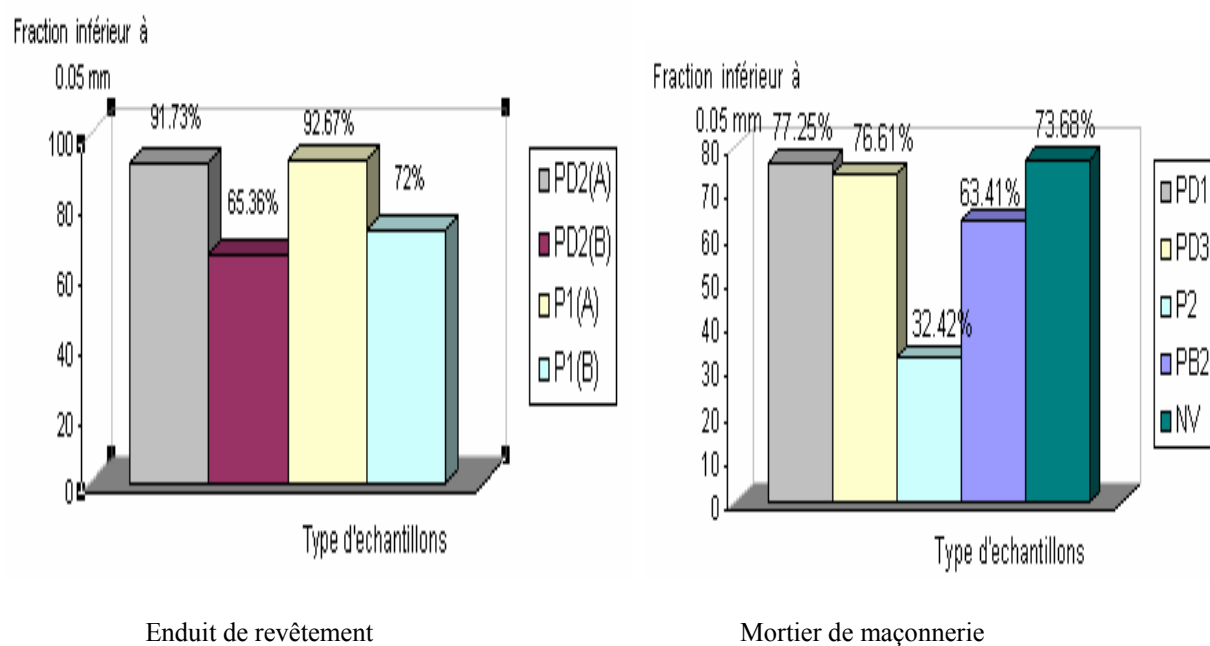


Fig. n° 8 : Fraction inférieure à 50 μm - lot d'échantillon de la Citadelle d'Alger.

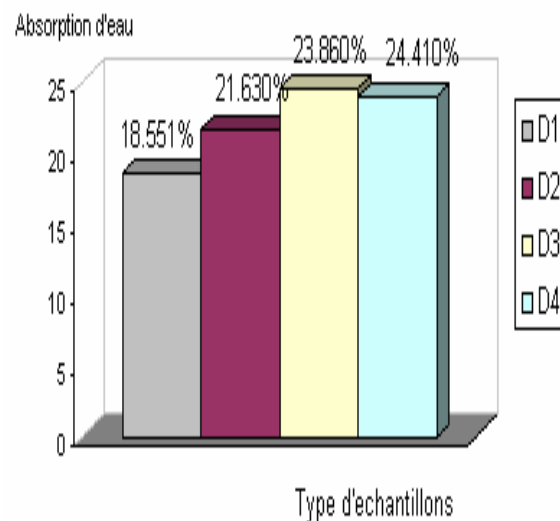
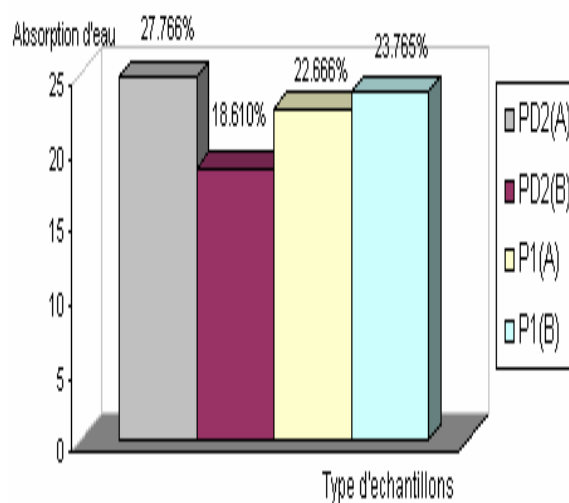
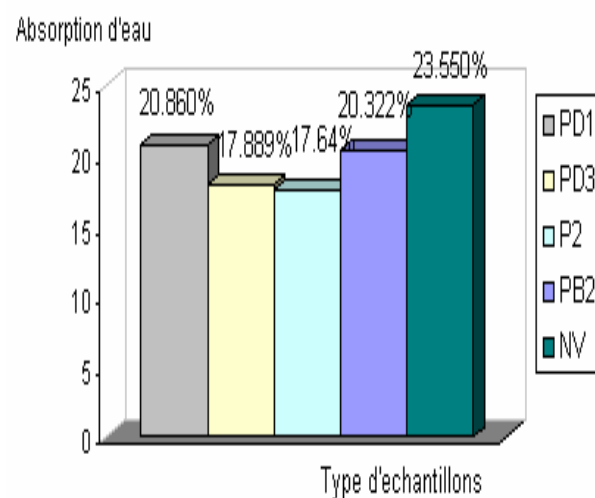


Fig. n° 9 : Absorption d'eau – lot d'échantillon de Djemila.



Enduit de revêtement



Mortier de maçonnerie

Fig. n° 10 : Absorption d'eau – lot d'échantillon de la Citadelle d'Alger.

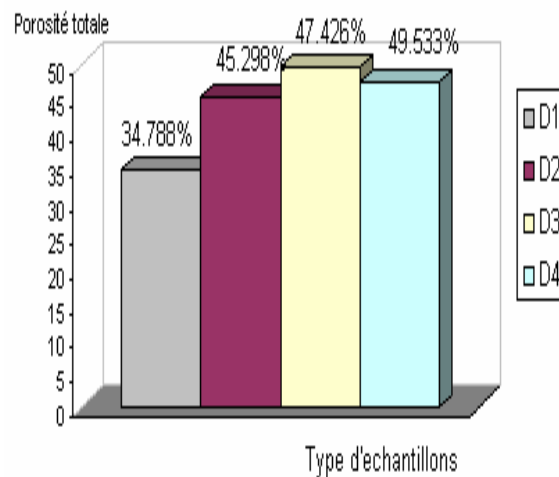


Fig. n° 11 : Essai de la porosité – lot d'échantillon de Djemilaa.

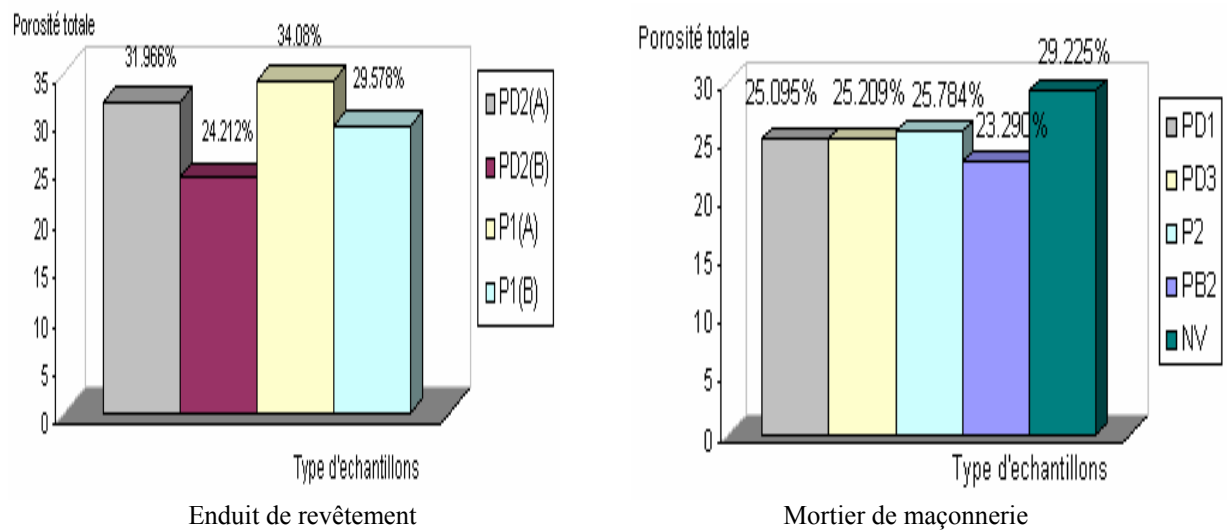


Fig. n° 12 : Essai de la porosité – lot d'échantillon de la Citadelle d'Alger.

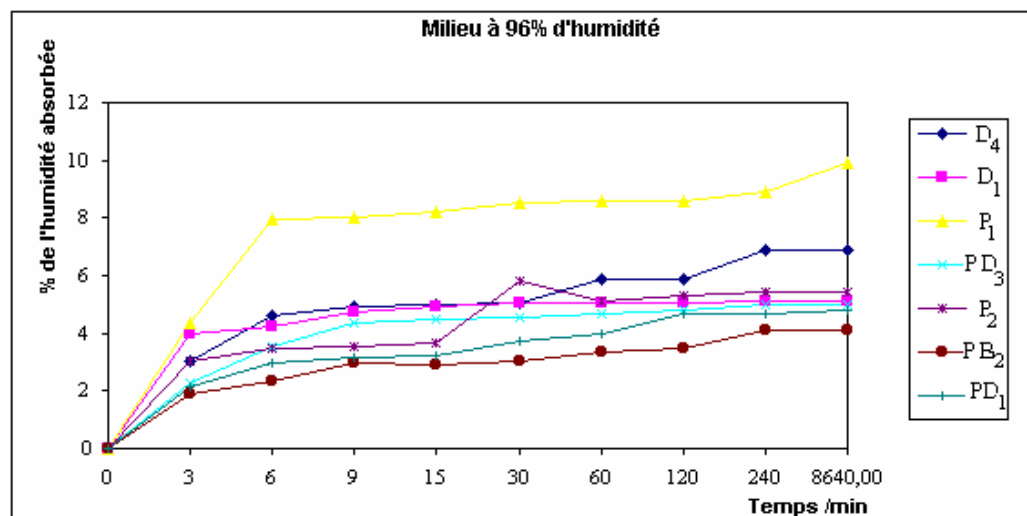


Fig. n° 13 : Essai de l'humidité.

Annexes D

Résultats obtenus par Geopyc 1360 et Accupy 1330

Tableau n° 2 : Résultats des caractéristiques physiques de l'échantillon D₂
obtenus par Geopyc 1360

Geopyc 1360 V3.01
Envelope Density Report

Instrument : 280
Operator : KW

Date : 14/07/2005
Time : 13 :41 :05

Customer : MESS
Sample : D₂

Absolute Density : 2.6533 g/cm³
Sample Weight : 2.2304 g

Blank Data Set : Internal
Preparation Cycles : 5
Chambre Diameter : 19.1000 mm
Consolidation Force : 38.0000 N

Blank Data Source : Internal
Measured Cycles : 10
Zero Depth : not used
Conservation Factor : 0.2786 cm³/mm

Cycle Deviation # cm ³	Blank Counts	Sample cm ³	Volume cm ³	Deviation g/ cm ³	Density g/ cm ³	g/
1 0.0011	9581	6890	1.9836	0.0015	1.5027	-
2 0.0010	9581	6894	1.9806	-0.0014	1.5050	
3 0.0000	9588	6899	1.9821	0.0000	1.5038	-
4 0.0017	9594	6902	1.9843	0.0022	1.5022	-
5 0.0021	9595	6910	1.9791	-0.0028	1.5061	
6 0.0010	9594	6907	1.9806	-0.0014	1.5050	
7 0.0021	9598	6913	1.9791	-0.0028	1.5061	
8 0.0028	9603	6909	1.9858	0.0037	1.5010	-
9 0.0006	9602	6912	1.9828	0.0008	1.5033	-
10 0.0000	9605	6916	1.9821	0.0000	1.5038	-
Average Envelope Volume : 1.9820 cm ³				Standard Deviation : 0.0021		
Average Envelope Density : 1.5039 g/ cm ³				Standard Deviation : 0.0016		
Specific Pore Volume : 0.3014 cm ³ /g				Percent Porosity : 45.331 %		
Percent Sample Volume : ××.××× %						

Tableau n° 3 : Résultats des caractéristiques physiques de l'échantillon PB₂
obtenus par Geopyc 1360.

Geopyc 1360 V3.01
Envelope Density Report

Instrument : 280
Operator : KW

Date : 14/07/2005
Time : 12 :55 :59

Customer : MESS
Sample : PB₂

Absolute Density : 2.7510 g/cm³
Sample Weight : 2.9809 g

Blank Data Set : Internal
Preparation Cycles : 5
Chambre Diameter : 19.1000 mm
Consolidation Force : 38.0000 N

Blank Data Source : Internal
Measured Cycles : 10
Zero Depth : not used
Conservation Factor : 0.2786 cm³/mm

Cycle Deviation # cm ³	Blank Counts	Sample cm ³	Volume cm ³	Deviation g/ cm ³	Density g/ cm ³	g/
1 0.0226	9562	7721	1.3570	0.0183	1.6435	-
2 0.0127	9564	7734	1.3489	0.0102	1.6534	-
3 0.0073	9570	7746	1.3445	0.0058	1.6588	-
4 0.0009	9568	7751	1.3393	0.0006	1.6652	-
5 0.0046	9573	7762	1.3349	-0,0037	1.6707	
6 0.0091	9579	7753	1.3460	0.0073	1.6570	-
7 0.0027	9578	7765	1.3364	-0.0022	1.6689	
8 0.0166	9580	7782	1.3253	-0.0133	1.6828	
9 0.0092	9580	7774	1.3312	-0.0074	1.6754	
10 0.0194	9579	7784	1.3231	-0.0155	1.6856	

Average Envelope Volume : 1.3387 cm³
Average Envelope Density : 1.6661 g/ cm³
Specific Pore Volume : 0.2232 cm³ /g
Percent Sample Volume : ××.××× %

Standard Deviation : 0.0106
Standard Deviation : 0.0132
Percent Porosity : 37.206 %

Tableau n^o 4 : Résultats des caractéristiques physiques de l'échantillon PB₂
obtenus par Accupy 1330.

Accupy 1330 V1.00
Density and Volume Report

Sample ID : 4634
Measured Cycles : 10
psig/min
Volume : 12.0480 CC

Sample Weight : 5.2635 g
Equilibration Rate : 0.0050

Expansion Volume : 8.4655 CC

Run # g/CC	Volume CC	Deviation CC	Density g/CC	Deviation
1	1.9814	0.0008	2.6565	- 0.0011
2	1.9808	0.0003	2.6573	- 0.0004
3	1.9805	- 0.0000	2.6577	0.0000
4	1.9804	- 0.0001	2.6578	0.0001
5	1.9795	- 0.0010	2.6589	0.0013
Cage volume 1.9805 CC			Standard Deviation : 0.0007 CC	
Cage Density : 2.6576 g/CC			Standard Deviation : 0.0009 g/CC	

Tableau n^o 5 : Résultats des caractéristiques physiques de l'échantillon D₂
obtenus par Accupy 1330.

Accupy 1330 V1.00
Density and Volume Report

Sample ID : 4633
Measured Cycles : 10
psig/min
Volume : 12.0480 CC

Sample Weight : 5.2635 g
Equilibration Rate : 0.0050

Expansion Volume : 8.4655 CC

Run # g/CC	Volume CC	Deviation CC	Density g/CC	Deviation
1	2.0687	- 0.0024	2.7008	0.0031
2	2.0716	0.0006	2.6969	- 0.0008
3	2.0715	0.0005	2.6971	- 0.0006
4	2.0722	0.0012	2.6962	- 0.0015
5	2.0712	0.0002	2.6974	- 0.0002
Cage volume : 2.0710 CC			Standard Deviation : 0.0014 CC	
Cage Density : 2.6977 g/Cc			Standard Deviation : 0.0018 g/CC	

Annexe E

Terminologie et sigles employés

A

ANAPSMH : Agence Nationale d'Archéologie et de Protection des Sites et Monuments Historiques.

av. : avant

ap. : après

ASTM : American Society for Testing and Materials

C

CETIM : Centre Technique Algérien de l'Industrie des Matériaux

CRD : Centre de Recherche et Développement

Carbunculus : Est une sorte de sable de tuf zéolitique.

E

éd. : édition

F

Fig. : Figure

J

J.C : Jus-écrit

j : jour

I

INSA : Institut National des Sciences Appliquées, Lyon (France).

ICCROM : International organization for conservation of cultural heritage

ICOMOS : International Council on Monuments and Sites

H

h : heure

N

NARA : Ce document a été rédigé par 45 participants dans la conférence qui tenue à NARA, au Japon, le 16 novembre 1994, organisée par l'UNESCO, l'ICCROM et l'ICOMOS.

P

PKZ : Atelier de conservation des monuments historiques, Polonais.

S

s. : siècle

T

Testa : brique broyée

U

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education la Science et la Culture.

V

Vicat : Ingénieur français né à Nevers en 1786. Il a reconstitué artificiellement des chaux hydrauliques par des mélanges appropriés de calcaire et d'argile dans l'objet de la vérification de l'indice d'hydraulicité