

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Aout 1955-Skikda
Faculté de technologie
Département : Génie civil
Réf : -D012115004M-

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
المرجع :-D012115004M-



Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de Magister

Spécialité ou option: Technique de réhabilitation du vieux bâti.
Présenté par :
Melle AYAT Amira.

Contribution à l'élaboration et la caractérisation d'un Eco-
mortier d'enduit à base de chaux et déchets de briques pour
la réhabilitation du vieux bâti

Soutenu publiquement le : 11/06/2015

Devant le jury composé de:

- Dr. SBARTAI Badreddine	Président	Université 20 août 1955 Skikda.
- Dr.MESSAOUDI Karima	Directrice du mémoire	Université 20 août 1955 Skikda.
- Dr.BOUZERD Hamoudi	Examinateur	Université 20 août 1955 Skikda
- Dr. NEZZAL Salima	Examinatrice	Université Constantine 3.
- Pr. BENMALEK M.Larbi	Invité	Université 08 Mai 1945 Guelma.

Remerciements

A la mémoire de mon père

A ma très chère mère

Remerciements

Tout d'abord je remercie les membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer notre travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire :

Les enseignants du département de Génie Civil de l'université 20 Aout 1955 de Skikda, notre responsable de la post graduation Dr Karima MESSAOUDI qui nous a offert cette opportunité, veuillez trouver ici toute ma gratitude.

Tous les enseignants et collègues du magister « Techniques de réhabilitation du vieux bâti », les doctorants en génie civil de l'université Badji Mokhtar d'Annaba, ainsi que les doctorants en génie civil de l'université 08 Mai 1945 de Guelma, je vous remercie infiniment pour tous vos conseils, aides, et encouragements qui m'ont été d'une très grande utilité.

Je tiens également à remercier tout le personnel du laboratoire de Génie Civil de l'université Badji Mokhtar d'Annaba, le laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université 08 Mai 1945 de Guelma, le laboratoire C.E.T.I.M (Centre d'Etude et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction) à Boumerdes, la briqueterie de Boumaiza, et la cimenterie de Hadjar Soud, sans leur aide ce travail n'aurait pas abouti.

Je remercie la direction de la culture de la wilaya de Skikda, ainsi que les services techniques de la wilaya de Skikda, et le bureau d'architecture Samir Abdelaziz d'Annaba qui m'ont bien accueillie, et ont eu la gentillesse de répondre à mes questions.

Et pour finir, je tiens particulièrement à remercier le Professeur M.L BENMALEK : son savoir, son humanisme, sa simplicité, sa grande pédagogie et compétence dans la démarche scientifique me resteront à jamais comme modèle. J'ai eu l'honneur et la chance de bénéficier d'un vrai encadrement de qualité.

Table des matières :

Remerciements.....	
Résumé.....	i
Abstract.....	ii
ملخص.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des photos.....	viii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Introduction Générale.....	xii

Chapitre I Descriptif du palais Meriem Azza

Introduction :.....	6
1- Définition d'un monument historique :.....	6
2- Présentation de la ville de Skikda:.....	7
2-1 Aperçu historique de la ville :.....	8
2-2 Les monuments de l'époque coloniale française :.....	10
3- Palais Meriem Azza:.....	12
3-1 Aperçu historique :.....	12
3-2 Description du palais :.....	13
3-4 Etat des lieux:.....	16
4- La restauration et ses principes :.....	18
Conclusion :.....	20

Chapitre II Les mortiers d'enduit à base de chaux

Introduction :.....	22
1- Historique :.....	22
2- Définition technique des mortiers :.....	23
3- Les constituants des mortiers de chaux :.....	24

3-1 La chaux :	24
3-2 Les granulats:	34
3-3 L'eau de gâchage :	37
3-4 Les adjuvants :	38
3-5 Les pigments :	39
4- Les caractéristiques des mortiers de chaux :	39
5- Les mortiers d'enduit :	40
5-1 Définition:	40
5-2 Fonctions des enduits :	40
5-3 Mise en œuvre :	40
5-4 Pathologies des vieux enduits :	42
6- Les enduits de chaux et l'environnement :	43
7- Les enduits de chaux en Algérie :	43
Conclusion :	44

Chapitre III

Procédures expérimentales et caractérisation des matériaux

Introduction :	46
1- Analyse d'échantillon :	46
1-1 Analyse chimique :	47
1-2 Analyse minéralogique :	47
1-3 Interprétation des résultats :	49
2- Caractérisation des matériaux utilisés :	49
2-1 Chaux :	50
2-2 Sable :	53
2-3 Déchets de brique :	56
2-4 Eau de gâchage :	57
3- Formulation du mortier :	57
4- Essais sur mortier frais :	58
4-1 La masse volumique apparente :	58
4-2 L'étalement à la table secousse :	59

4-3	Mesure de l'air occlus :.....	59
4-4	Mesure du temps de prise :.....	60
5-	Essais sur mortier durci :.....	61
5-1	Résistance à la traction par flexion :	61
5-2	Résistance à la compression :.....	61
5-3	Essai d'absorption d'eau par capillarité :.....	62
5-4	Essai d'absorption d'eau par immersion totale :	63
5-5	Essai d'ultrasons :	64
	Conclusion :.....	66

Chapitre IV

Résultats et discussion

	Introduction :.....	68
1-	Résultats des essais de caractérisation sur mortier frais :.....	68
1-1	Masse volumique apparente :.....	68
1-2	Consistance :.....	70
1.3	Temps de prise :.....	71
1.4	Pourcentage de l'air occlus :.....	72
2-	Résultats des essais de caractérisation sur mortier durci :.....	73
2-1	Résistance à la traction par flexion (28 jours) :.....	73
2-2	Résistance à la compression (28 jours) :.....	74
2.3	Absorption d'eau par immersion totale :.....	76
2.4	Absorption d'eau par capillarité :.....	77
2.5	Auscultation à l'ultrason et module d'élasticité dynamique :.....	82
	Conclusion :.....	84
	Conclusion Générale :.....	87
	Bibliographie :.....	

Résumé :

Dans ce travail, un échantillon de mortier d'enduit d'une paroi du palais Meriem Azza a été sujet d'une analyse chimique, et minéralogique. Les résultats ont confirmé la constitution de cet enduit par de l'argile et de la chaux, ce qui nous a permis d'étudier des formulations d'un éco-mortier de remplacement pour la restauration de ce monument historique de la ville de Skikda.

Tous les matériaux utilisés pour l'élaboration des éco-mortiers sont locaux : un sable 0/2 de la carrière de Didouche Mourad, la chaux aérienne de l'usine BCMC de Berriane, et les déchets de brique de la briqueterie de la commune de Boumaiza.

Les déchets de brique ont été broyés en deux finesses différentes ($1740 \text{ cm}^2/\text{g}$, et $5454 \text{ cm}^2/\text{g}$), et ont substitué la chaux en trois taux : 10%, 20%, et 30%. Les 7 formulations obtenues ont été malaxées manuellement afin de garder le caractère traditionnel, les mortiers obtenus ont à leur tour été caractérisés à l'état frais (masse volumique apparente, consistance, temps de prise, et air occlus), ainsi qu'à l'état durci (Rc, Rfl, absorption d'eau par immersion et par succion capillaire, et l'ultrason).

Les résultats de ce travail sont globalement positifs et prouvent la faisabilité de l'incorporation des déchets de brique dans les mortiers de restauration à base de chaux aérienne. Ils montrent notamment une amélioration sensible de la prise de ces éco-mortiers par rapport au mortier de chaux de référence ainsi qu'une densification pouvant améliorer sa perméabilité à l'eau et à l'oxygène. Une étude complémentaire sur la durabilité de ces mortiers est cependant nécessaire pour une évaluation totale.

Mots clés : Chaux aérienne, Eco-mortier, Monument historique, Restauration.

Abstract :

In this study, a sample of lime mortar has been collected from a wall of the Meriem Azza palace and was submitted to a chemical and mineralogical analysis. The results have shown that this coating mortar is composed essentially of clay and lime. To restore this historic monument with similar mortar, an experimental study has been carried out to produce an eco-material with sand, aerial lime and waste brick.

Raw materials used are local : a fine quarry sand (0/2) from Didouche Mourad quarry, an aerial lime from BCMC plant of Berriane and waste brick from a brick factory located at the municipality of Boumaiza.

Waste brick was grounded in two different finesses and have been used in three rates: 10%, 20% and 30%. In total seven compositions were prepared and characterized at fresh and hardened states: bulk fresh density, consistency, setting time and entrained air, then compressive and flexural strengths, water absorption by immersion and by capillarity suction, and non destructive tests by ultrasonic device.

It is noted that seven compositions were mixing by hand to keep the traditional character. One of the significant results of this study is that the eco-mortar proposed constitutes a valuable alternative to restore the walls of Meriem Azza palace provided complementary study reliable to its durability.

Key words: Aerial lime, eco-mortar, historic monument, restoration.

ملخص:

في هذا العمل، تم أخذ العينة من ملاط التلييس من جدار لقصر مريم عزة موضوع التحليل الكيميائي والمعدني. وأكدت النتائج تركيبة هذا الملاط بالطين والجير، الذي يسمح لنا بدراسة تركيبات لملاط ايكولوجي بديل لترميم هذا المعلم التاريخي لمدينة سكيكة.

جميع المواد المستخدمة لإعداد هذا الملاط الإيكولوجي، هي مواد محلية: رمل 2/0 من محجرة ديدوش مراد، جير هوائي من مركب بريان، من بقايا الأجر بمصنع الأجر في بلدية بومعيزة.

تم سحق بقايا الأجر في نعومتين مختلفتين للحبيبات، وقد تم استبداله في ثلاث درجات: 10%، 20% و30%. سبعة تركيبات محددة قد تم خلطها يدويا للحفاظ على الطابع التقليدي، الملاط المتحصل عليه بدوره تم تحديد خصائصه في حالته الطازجة (الكتلة الحجمية، مدة التماسك....)، وفي حالته الصلبة (مقاومة الضغط، مقاومة الشد، الامتصاص، الموجات فوق الصوتية). من بين أهم النتائج المتحصل عليها إثر هذه الدراسة هو أن الملاط المقترح يمكن أن يكون بديلا صالحا من أجل ترميم جدران قصر مريم عزة شريطة أن تجرى عليه دراسة تكميلية متعلقة بديمومته

الكلمات المفتاح: جير هوائي، ملاط ايكولوجي، معلم تاريخي، ترميم.

Introduction générale

« *Science sans conscience n'est que ruine de l'âme* »

Blaise Pascal (1623-1662)

Depuis l'époque de la préhistoire où l'homme vivait dans des grottes, jusqu'à nos jours où les constructions modernes atteignent des records de hauteur, les matériaux de constructions ont considérablement évolué. Mais certains matériaux traditionnels ont su garder une continuité à travers le temps. C'est le cas de la chaux, matériau ancien utilisé au cinquième millénaire avant JC en badigeon puis utilisé avec succès par les Grecs et les Romains comme mortier pour bâtir, décorer et traiter les sols.

Aujourd'hui, ce matériau a été délaissé au profit du ciment, plus résistant certes, mais plus rigide et moins adapté aux travaux de réhabilitation et de restauration du vieux bâti.

Mais avec le développement des réflexions sur le patrimoine architectural, et les monuments historiques, la chaux s'est à nouveau imposée grâce à ses propriétés qui répondent aux caractéristiques du bâti ancien, permettant ainsi sa pérennité.

L'Algérie regorge d'un lot important de monuments historiques, de différentes époques transmettant le passage de chaque civilisation, et ces dernières années les opérations de préservation et de restauration se sont multipliées, pour y remédier aux nombreuses dégradations que subissent ce patrimoine.

Le palais Meriem Azza est un joyau du style andalou mauresque, ce patrimoine de la période coloniale fait partie de la richesse architecturale de la ville de Skikda, mais qui hélas n'a pas bénéficié d'un entretien digne de sa vraie valeur.

Les opérations de restaurations des monuments historiques demandent beaucoup de soins et de savoir faire, et concernant les matériaux employés, la compatibilité avec les supports anciens est la caractéristique la plus requise.

Nous proposons dans ce travail de recherche, d'ordre expérimental, de valoriser la chaux, ce matériau écologique et authentique pour confectionner des mortiers d'enduit à base de chaux aérienne et de déchets de briques préalablement séchés et broyés finement.

Les déchets de briques apporteront à l'éco-mortier élaboré le caractère pouzzolanique, hydraulique et activeront la prise et le durcissement, et après étude, la formulation retenue sera préparée traditionnellement et sera soumise aux essais de caractérisation classiques: Rc, Rfl, prise et durcissement et aux essais de durabilité: air occlus, absorption d'eau...

Afin de réaliser ce travail, on a emprunté la méthodologie suivante :

- Recherche bibliographique sur la chaux et son emploi dans les mortiers d'enduit et de restauration via de nombreux, livres, articles, et site internet sur le sujet.
- Collecte de documentation sur le palais Meriem Azza au niveau des services techniques de la wilaya de Skikda, la direction de la culture de la wilaya de Skikda, et le bureau d'études au niveau de la wilaya d'Annaba, qui est chargé actuellement de sa restauration.
- Visite sur site, avec prise de photos de l'état actuel des lieux, ainsi que le prélèvement d'un échantillon.
- Analyse chimique et minéralogique de l'échantillon, au niveau du laboratoire C.E.T.I.M (Centre d'Etude et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction) à Boumerdes.
- Visite de la briqueterie de Boumaïza (wilaya de Skikda), où on s'est procuré les déchets de briques nécessaires à l'élaboration de notre éco-mortier d'enduit.
- Le travail expérimental s'est déroulé au niveau du laboratoire de Génie Civil de l'université Badji Mokhtar d'Annaba, ainsi qu'au Laboratoire d'Hydraulique et de Génie Civil de l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

Cette approche méthodologique nous a permis de rédiger ce mémoire qui se structure en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présente le palais Meriem Azza, l'histoire de la ville de Skikda, l'histoire du palais ainsi que l'état actuel de ses lieux.
- Le deuxième chapitre aborde la recherche bibliographique sur les mortiers d'enduits à base de chaux aérienne.
- Le troisième chapitre comprend notre travail expérimental : formulation des mortiers, et essais de caractérisations effectués sur les matériaux utilisés, ainsi que les essais sur les mortiers dans leurs états frais et durci.
- Enfin le quatrième chapitre expose tous les résultats du travail expérimental ainsi que leur interprétation.

Chapitre -I-

Descriptif du palais Meriem

Azza

Introduction :

La richesse des ressources naturelles de l'Algérie lui a valu de diverses et multiples colonisations ; ces dernières avant de partir laissèrent sans cesse des constructions, qui avec le temps, prirent une grande valeur. En effet, ce legs architectural qui regorge de monuments exceptionnels est devenu un véritable patrimoine qu'il faut entretenir et protéger.

Parmi ces monuments figure le palais de Meriem Azza, une merveille architecturale de style andalou-mauresque, qui traduit et concrétise d'une façon magnifique le génie de son concepteur. Ce monument déjà classé patrimoine national à préserver est notre cas d'étude.

Dans ce chapitre on présentera ce véritable hymne à la beauté qui fait partie avec les autres monuments du style néo moresque de l'identité et l'histoire de la ville de Skikda ; et on exposera son état actuel qui a nécessité une opération de restauration.

Mais avant il s'est vu essentiel de commencer par déterminer la notion du monument historique, afin de mieux cerner sa valeur.

1- Définition d'un monument historique :

L'évolution de la notion de monuments historiques était liée au développement des réflexions sur le patrimoine, quelque soit sa nature « *un monument, au sens originel du terme, désigne une œuvre érigée avec l'intention précise de maintenir à jamais présents dans la conscience des générations futures des événements ou des faits humains particulier (ou un ensemble des uns et des autres)* »¹.

plus précisément, l'idée de monument appliquée selon le langage ordinaire aux ouvrages d'architecture, désigne un « *édifice, soit construit pour servir à éterniser le souvenir des choses mémorables, soit conçu, élevé ou disposé de manière à devenir un objet d'embellissement et de magnificence dans les villes. Les palais des souverains et des grands sont partout les plus beaux monuments que les villes et les états renferment* »².

Au fil des années, les peuples ont pris conscience de l'immense valeur que représente l'héritage architectural, et en 1964 la Charte de Venise valorise le domaine de restauration et de préservation des monuments historiques, en précisant les notions à une échelle internationale, donc par définition « *la notion de monument historique comprend la création architecturale isolée aussi bien que le site urbain ou rural qui porte témoignage d'une civilisation particulière, d'une évolution significative ou d'un événement historique. Elle s'étend non seulement aux grandes créations mais aussi aux œuvres modestes qui ont acquis avec le temps une signification culturelle* »³.

¹A.Riegl. « Le culte des monuments », socio-anthropologie en ligne : www.socio-anthropologie.revues.org/5

²M.Quatremère de Quincy. « Dictionnaire historique d'architecture », Tome second, 1832.P125, (en ligne)

³Charte de Venise 1964 : http://www.icomos.org/charters/venice_f.pdf.

Chapitre I : Descriptif du palais Meriem Azza objet de la restauration

Tandis que beaucoup de pays développés se dotent d'un cadre législatif vigoureux et précis sur le domaine de la restauration des monuments historiques ; et de la préservation du patrimoine, ce n'est malheureusement pas le cas pour les pays du tiers monde, comme l'Algérie dont la législation a produit peu de textes de lois se rapportant à ce sujet (la loi 98/04 du 15 juin 1998)¹, un constat assez triste car, les monuments valorisent nos villes, ils traduisent l'histoire et la transmettent dans une réalité qu'il faut maintenir intacte pour les générations futures.

Le palais de Meriem Azza, ou encore palais Bengana fait partie des monuments les plus importants de la ville de Skikda. Le choix de ce patrimoine de l'époque coloniale comme cas d'étude n'était pas aléatoire ; car ce monument dispose d'un intérêt historique, esthétique, ou encore technique. Il représente une partie intégrante de l'identité d'une ville qui regorge d'un lot de monuments de différentes époques, un patrimoine architectural qui a survécu aux aléas du temps et de l'homme, et qui représente son passé prestigieux ainsi que sa véritable richesse culturelle actuelle.

2- Présentation de la ville de Skikda:

Ancien comptoir phénicien, Skikda fut fondé en l'an 45 avant J.C² par ses derniers sous le nom de Thapsus, puis gouverné par Massinissa après la chute de Carthage à l'époque Numide. Aujourd'hui la ville de Skikda s'étale sur une superficie de 4137.68 km², elle est située entre les wilayas d'Annaba, Constantine, Jijel et Guelma, tout en surplombant la mer Méditerranée.

Son emplacement stratégique lui value beaucoup de colonisation, et qu'elle soit phénicienne, romaine, turque, ou française, chacune d'elle a ancré ses marques a jamais en faisant construire des édifices les reflétant, et même si l'occupation arabe a duré plusieurs siècles, on ne retrouve aucune trace de cette période³, les occupations Romaine et Française sont les plus mentionnées, dans les livres d'histoires.

¹D.Dekoumi, O.T.Bouznada. « Législation algérienne et gestion du patrimoine ».

²L.Bertrand. « Histoire de philippeville 1838-1093 », imprimerie administrative et commerciale moderne, 18 rue Théophile Réguis, 18, France, 1903.

³Idem, L.Bertrand, P 2.



Figure I-1 : La wilaya de Skikda

Source : internet

2-1 Aperçu historique de la ville :

a. L'antique Rusicade :

Rusicade était une ville confortablement installée au fond du Golf de Numidie dans une position très favorable pour sa défense, ses limites étaient : au Nord, la mer méditerranéenne, à l'Ouest la crête du Bou Yala, à l'Est, les hauteurs de la colline de Skikda et au Sud, la plaine aux abords des marécages. La ville était séparée en deux parties inégales par deux ravins, la communication entre les deux rives se faisaient par de nombreux ponts construits au-dessus des ravins, leur longueur moyenne était d'environ de quinze mètres. La cité était entourée par une double série de défenses murées, l'une à l'intérieur, l'autre un peu plus éloignée formant enceinte générale. Elle s'ouvrait au Nord, en direction du port, par une porte située à proximité de l'oued Beni Melek et au Sud, en direction de Cirta, par une porte monumentale flanquée probablement de deux chambres ouvertes vers l'extérieur et qui abritaient un corps de garde. Cette dernière disposition était identique à celle de beaucoup de villes romaines d'Afrique¹.

Rusicade faisait partie avec Chullu, Milev et Cirta de la confédération des IV colonies ou Confédération Cirteenne. Pendant toute la durée de sa vie à l'intérieur de la confédération, elle vécut dans la paix et la prospérité, et lorsque cette dernière fut dissoute à la fin du IIIe siècle, Rusicade retrouva son autonomie, et commença des lors à perdre son prestige et son importance au profit du port voisin de HipopoRegius, sa décadence se confirma avec l'invasion des vandales. Malgré le pillage de ses derniers, la ville ne fut pas détruite car sa position stratégique et surtout son port très actif sous les Phéniciens et les Romains offrait des avantages dont ils ne pouvaient se passer. Sa ruine commença, lorsque sans aucune

¹- M.S.Messikh. «Histoire ancienne et contemporaine de Skikda, l'antique Rusicade », édition RAIS, Juin 1996.

Chapitre I : Descriptif du palais Meriem Azza objet de la restauration

protection, elle se trouva livrée au saccage des tribus berbères insoumises. Puis sa destruction vint finalement sur les mains des Vandales qui lors de leur capitulation ont détruit toutes les villes sur leur chemin. Rusicade vécut près de cinq siècles, elle a duré environ 450 ans, et ne renaîtra de ses cendres que quatorze siècles plus tard sous un autre nom¹.

b. Philippeville:

Le 13 Octobre 1837, Constantine tomba sous la colonisation française. Des lors, la recherche d'un débouché maritime devint une nécessité, elle opta pour le port de Stora, un choix qui ne fut guère un accident, car son occupation était prévue depuis la prise d'Alger en 1830, ou des reconnaissances à distance étaient faites par la marine royale tout le long de la cote². Un an après, le 8 Octobre 1838 Stora fut occupée, un peu partout, des ruines rappelaient la présence romaine, et il fallait fixer l'emplacement définitive d'une nouvelle ville ; cette dernière devait être près du port, ayant une position facile à défendre contre d'éventuelles attaques, un endroit sain, et aussi, limiter les dépenses. La cote étant trop abrupte pour permettre la fondation d'une telle ville du côté de Stora, le 11 Octobre le maréchal Valée décida que la ville s'étendrait sur les versants des montagnes (Djebel Skikda, Djebel El-Mouader, Djebel Bou Yala), dont les crêtes étaient occupées par les ouvrages français³.

Philippeville naquit sur les ruines romaines de l'antique Rusicade⁴, et les décisions pour renforcer l'occupation coloniale et valoriser l'expansion économique commencèrent à être prises, dont les principales sont la décision de construire un port en 1860, et la construction de la voie ferrée Constantine-Philippeville inaugurée le 26 Aout 1870⁵.

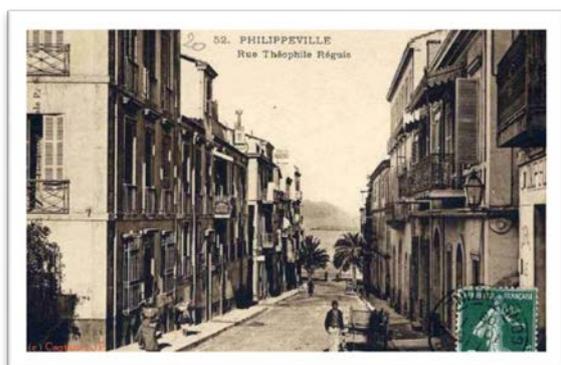


Photo I-1 : Rue Théophile Régis



Photo I-2 : Rue nationale

Source : Internet

¹Idem, M.S.Messikh.

²E.Solal. « Philippeville et sa région 1837-1870 », éditions : LA MAISON DES LIVRES, Alger P 36.

³Idem, E.Solal, P 59.

⁴Idem, L Bertrand, P 2.

⁵Idem, E.Solal, P 176, 177, 178

2-2 Les monuments de l'époque coloniale française :

En 1930, la France célébra le centenaire de sa colonisation en Algérie en organisant des fêtes grandioses à travers tout le pays ; pour elle ce pays était bel est bien définitivement acquis, et c'est dans cette optique que la municipalité de Philippeville se lança dans une vaste opération d'édification d'un ensemble urbanistique de style andalou-mauresque, comprenant de véritables chef d'œuvres architecturaux aux lignes sobres et au décor très riche ; c'est un exemple d'art néo-mauresque adapté par le très grand architecte de la ville, Charles Montaland¹.

a. L'hôtel de ville :

Conçu dans un style néo-maghrébin, voir néo-andalou, ce monument architectural est composé d'un minaret rappelant ceux des mosquées de Tlemcen et du Maroc. Avec ses vastes vérandas, son balcon à colonnes de la salle des fêtes, sise au premier étage, sa galerie (au dessous) décorée de mosaïque bleue, contigüe à la salle de mariage, l'hôtel de ville représente un des monuments les plus importants de la ville de Skikda. Richement décoré de l'intérieur par de la faïence de Nabeul et de OuledChemla (Tunisie), l'architecture de la partie donnant accès à l'entrée gauche, évoque l'intérieur des maisons mauresques d'Alger. Le rez-de-chaussée destiné aux services de l'état civil et de la réglementation, avec sa partie supérieure cerclant par une balustrade en bois sculpté la cour intérieure du bas, et surmontée d'une voute à support octogonal dont la base est entourée d'une série de baies à voussures en guise d'éclairage, est un véritable « wast el dar »².



Photo I-3 : l'hôtel de ville (ville de Skikda)

Source : internet

¹ N. Zaid, S. Amokrane, K. Tazairt. «Skikda art et monuments», sous la tutelle du wali D.E. Salhi.

²Idem, « Skikda art et monuments ».

b. La gare ferroviaire :

Inaugurée le 28 Mars 1937, la gare des chemins de fer a été édifée en remplacement de l'ancienne gare couverte de tuiles rouge et ne comprenant qu'un rez-de-chaussée, au même endroit, sous le Skikda, à l'est de la place du 1^{er} Novembre 1954 et en face de l'Hôtel de ville, sur l'autre coté de cette place. La nouvelle gare s'élève sur deux étages dans une architecture évoquant une mosquée, mais de style mauresque futuriste pour l'époque. Le minaret, qui supportait une horloge en forme de dé, détruit en Février 1962 par l'organisation O.A.S dans le cadre de sa politique de la terre brulée, est carré, de style andalou-maghrébin, mais dont les lignes et contours demeurent sobres. L'usage du béton armé a permis de réaliser un ensemble très moderniste. Pour le décor, l'architecte a eu recours à la célèbre faïence de Nabeul (Tunisie) à motifs floraux, dans un mélange couleurs apaisantes à base de vert, de bleu et d'ocre. Il n'y a pas de « wast el dar » comme il est de tradition dans l'architecture mauresque. Véritable mariage réussi entre tradition et modernité, elle fait partie des plus belles gares d'Algérie à coté de celles d'Annaba et d'Oran¹.



Photo I-4 : la gare ferroviaire (ville de Skikda)

Source : internet

¹ Idem, « Skikda art et monuments ».

3- Palais Meriem Azza:

Un palais est un édifice qui doit s'élever au-dessus des maisons ordinaires, et se faire distinguer d'elles par la réunion des moyens que l'architecture sait employer pour approprier à chaque édifice la mesure de richesse ou de simplicité qui convient à son caractère¹. L'architecte Charles Montaland a parfaitement su donner vie à cette définition en réalisant le palais Meriem Azza.

3-1 Aperçu historique :

Le palais de Meriem Azza fut construit en 1913, sa réalisation a été confiée à l'architecte attiré de la ville, Charles Montaland. L'initiateur de ce projet fut Paul Cuttoli, un brillant avocat né à Bab El Oued et ancien député de l'immense département de Constantine. Il présida aux destinées de Philippeville en tant que sénateur et maire et ce, des années 20 aux années 40, période durant laquelle il était à l'origine d'autres réalisations telles que l'Hôtel de ville, la gare ferroviaire, la banque centrale, la grande poste et autres.

A la fin des années 30, la vente du palais a été conclue non sans stipuler dans une convention que la jouissance par le nouveau propriétaire de son acquisition n'interviendra qu'à la mort du premier propriétaire, en l'occurrence Paul Cuttoli. Selon certaines sources, cette vente a eu lieu à cause de l'engagement de la France dans la Seconde Guerre Mondiale qui a quelque peu amoindri les budgets alloués au fonctionnement des circonscriptions administratives des colonies algériennes et c'était dans le but de renflouer les caisses presque vides de sa ville que Paul Cuttoli avait cédé le palais à un certain Bengana, notable fortuné de la région des Zibans (Biskra), qui prit possession du palais juste après la mort de Paul Cuttoli, selon les termes de l'accord entériné lors de la vente. Mais son séjour fut de courte durée car au lendemain du déclenchement de la guerre de libération nationale, en 1955, Bengana dut abandonner le palais en raison des pressions, menaces et propos racistes émanant des civiles et activistes européens habitant ce quartier résidentiel.

Entre 1956 et 1962, le palais servit de refuge à de nombreuses familles abandonnant massifs montagneux et campagnes alentour pour fuir la misère galopante et les exactions dues à la guerre. Au lendemain de l'indépendance, le palais fut utilisé comme centre de vacances, une fonction assez peu flatteuse pour un si précieux monument, mais après une prise de conscience, et sur requête de l'APC de Skikda, la commission nationale des monuments et sites historiques réunie au ministère de la culture, a classé le palais Meriem Azza patrimoine national à préserver en Juin 1981. La même année, les services de la wilaya de Skikda y entreprirent des travaux de réfection en vue de transformer le palais en villa d'hôtes, et depuis Septembre 2007, le palais est inscrit sur l'inventaire supplémentaire. Semblable au classement l'inscription est différente que par le fait que cette mesure n'est pas définitive, elle produit les mêmes effets que le classement mais pour une période de 10 années uniquement².

¹Idem, M.Quatremère de Quincy. « Dictionnaire historique d'architecture », P 186.

²H.Benseddik.Souki. « la valorisation des monuments historiques en Algérie ». Mémoire magister 2012. Université de Constantine. P 86.

3-2 Description du palais :

Le palais Meriem Azza occupe un site des plus enchanteurs, au milieu d'essences exotiques ramenées de pays d'outre-mer et d'Afrique noire. Il est perché sur le versant Nord de la colline du fort Beni Melek ou colline Boulekroud, au-dessus de l'antique voie de Rusicade à Asthora (Skikda-Stora), non loin du pont romain dit de Bengana. Entouré de jardins en terrasses, le palais surplombe le vieux port de Skikda et d'où l'on a une vue imprenable sur la baie de Stora, ou golfe de Numidie, le Sinus numidicus des Romains. Le style architectural est de type andalou mauresque alliant grâce, subtilité et beauté. C'est le fruit d'un mélange harmonieux de deux civilisations grandioses.



Photo I-5: la zone d'emplacement du palais

Source : internet.

La façade extérieure du palais orientée selon une direction nord-est est dominée par les formes arquées caractéristiques du style néo-mauresque ; les énormes baies vitrées faites d'arcs à volutes lui donnent un air de légèreté tout en éclairant l'intérieur de la façade latérale droite du palais. De très belles faïences aux couleurs harmonieuses agencées ornent par cerclage ces dernières dans du bois rouge sculpté.

Le palais comprend une partie centrale dont la forme rappelle celle d'une tour, d'un minaret andalou à deux étages se terminant par une construction plus fine recouverte d'un petit dôme. Cette partie centrale abrite une porte principale imposante précédée d'un espace ouvert en forme d'arc en plein cintre outrepassé constitué de lobes et rappelant les arcs qu'on retrouve dans l'architecture almoravide. De part et d'autre, une colonne d'élégance manifeste fait office de piédroit en soutenant l'arcade. Les colonnes marbrées auxquelles a eu recours l'architecte remplissent une double fonction, esthétique pour le côté décoratif et architectural par le renforcement de la résistance des éléments que ces structures supportent.



Photo I- 6 : le palais Meriem Azza (façade principale)

Source : auteur. (année : 2013)

Les portes donnant accès à l'intérieur du palais sont toutes sculptées dans un bois noble. En poussant la grande porte, on aboutit à un immense hall au fond duquel deux battants en bois rouge sculpté s'ouvrent sur un grand escalier qui mène aux différentes et multiples chambres de l'étage supérieur. A droite, on retrouve la salle de séjour et le bureau de l'ancien propriétaire, Paul Cutoffi ; à gauche, on accède aux deux salons de l'étage, construits et décorés à l'identique de la grande salle de séjour.

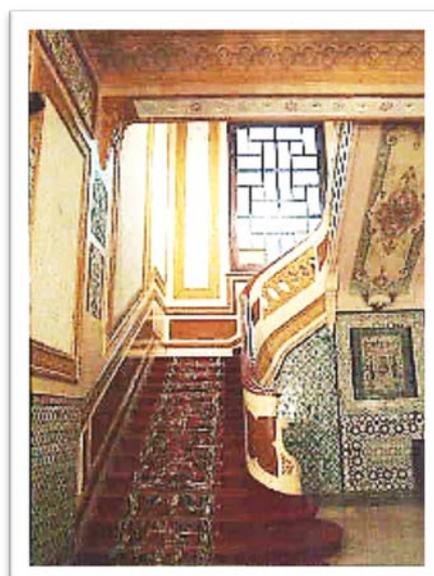
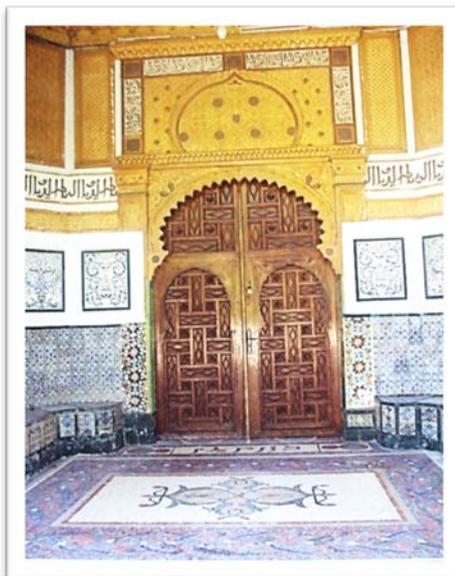


Photo I-7 : La porte d'entrée principale **Photo I-8 : L'escalier menant à l'étage**

Source : auteur (année 2013)

source : Skikda en photo.

Chapitre I : Descriptif du palais Meriem Azza objet de la restauration

Le décor est fabuleux, que ce soit sur les murs ou sur les plafonds, nulle trace d'espace nu. Tout est sujet à décoration dans un savant mélange de maints arts et techniques. Les plafonds en bois peint rappellent ceux des palais marocains et andalous. Les murs sont tapissés de fresques et d'arabesques. A hauteur d'homme, l'architecte a tapissé le mur de faïence de Nabeul (Tunisie) à motifs floraux et de faïence sigillée à motifs géométriques du Maroc et qu'on peut observer dans le palais de l'Alhambra de Grenade (Espagne).



Photo I- 9: Décoration du plafond

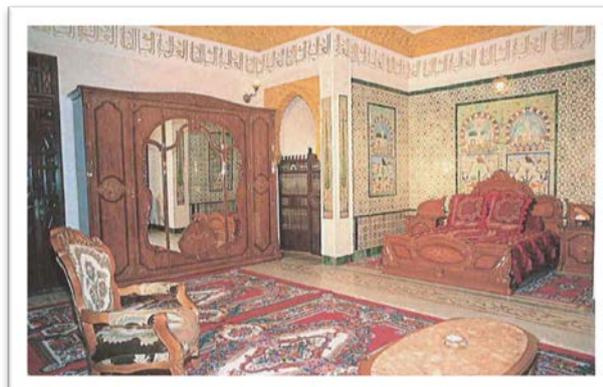


Photo I-10 : Une chambre d'hôte

Source :Skikda en photo.

A l'autre étage du dessus, on peut accéder aux cinq chambres d'hôtes; le respect du style qui caractérise tout le palais se perçoit lorsque le visiteur traverse une pièce pour aboutir à une autre, c'est la continuité de la splendeur des lieux. Sur la plupart des murs intérieurs, une décoration représentant des lignes brisées sur fond blanc attirent l'attention. Dans l'art maghrébin et andalou, les lignes brisées convergent vers des étoiles à huit branches. Au contraire, ici, les lignes aboutissent surtout à des étoiles à six branches, particularité dite de David. Et à l'intérieur de chaque étoile, un poisson à deux queues occupe l'espace. En fait l'étoile représente l'Ancien Testament et le poisson, le Nouveau. Ces deux motifs basiques, le poisson et l'étoile, symbolisent la bible, donc le christianisme. C'est ce mélange d'intégration entre l'art musulman néo-mauresque et leur confession chrétienne que le sénateur maire Cuttoliet son architecte Montaland ont voulu transcrire. D'où l'origine de l'appellation du palais Meriem Azza : Meriem relativement à la vierge Marie à qui Cuttoli dédia l'œuvre. D'ailleurs c'est dans cette optique que fut inscrit en caractères arabes, sur le parvis de l'entrée, « Dar Meriem » avec de la mosaïque rouge. Quant à la transcription « Azza », il semblerait que ce soit la faute du calligraphe désigné à l'époque pour graver le texte comprenant « Meriem el adhra (la vierge) » devenant « Azza ».

La sculpture sur bois, le travail du bronze, la céramique, la faïence, le travail du stuc, la peinture murale, etc. Autant de spécialités artistiques utilisées dans ce palais qui ont du faire appel à une équipe multidisciplinaire chevronnée.

Chapitre I : Descriptif du palais Meriem Azza objet de la restauration

3-4 Etat des lieux:

En cent ans d'existence, le palais de Meriem Azza a subi plusieurs altérations et dégradations de différentes natures (l'homme, la nature, le temps) comme on peut voir dans les photos ci-dessous :



Photo I-11 : Apparition de la végétation sur la façade
source : auteur (année 2013)



Photo I- 12 : Décollement de la faïence
source : auteur (année 2013)



Photo I-13 : Console dégradée
source : auteur (année 2013)



Photo I-14 : Corniche dégradée : apparition de la brique.
source : auteur (année 2013)



Photo I-15 : Déplacement de la colonne de marbre (mouvement du terrain)
source : auteur (année 2013)

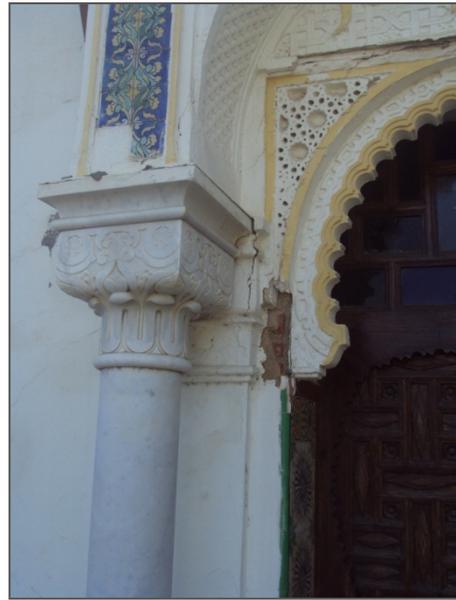


Photo 16-I : Fissuration et décollement d'enduit
source : auteur (année 2013)



Photo I-17 : Dégradation des éléments décoratifs
source : auteur (année 2013)



Photo I-18 : Décollement de la peinture
source : auteur (année 2013)

Chapitre I : Descriptif du palais Meriem Azza objet de la restauration

La direction de la culture de la wilaya de Skikda a chargé le bureau d'étude Samir Abdelaziz (wilaya d'Annaba) de la restauration du palais Meriem Azza. Lors de notre entretien avec ce dernier, il nous a fait part de l'absence de documentation (archives, plans, devis) qui a obligé son consultant Dr Reda Lattoui architecte restaurateur et enseignant au département d'architecture à l'université Badji Mokhtar d'Annaba, à aller chercher la documentation nécessaire outre mer.

Notre recherche au niveau du service technique de la wilaya de Skikda n'a pas été très fructueuse, car lors de la période où le palais était la propriété de la wilaya, des travaux de réhabilitation et de rénovation ont été effectués par l'entreprise du bâtiment (EBS), cette dernière a déposé le bilan quelques temps après.

Après l'étude le bureau de Samir Abdelaziz a pour priorité de renforcer l'édifice et résoudre le problème de fissuration horizontale qui est due à l'instabilité du sol, la **photo I-15** illustre très bien ce phénomène.

Dans notre recherche, les travaux qui nous intéressent sont ceux d'enduisage, les matériaux utilisés doivent être compatibles avec le support d'origine, tout en respectant les principes de la restauration.

4- La restauration et ses principes :

En général, on entend par restauration, toute réparation qui donne une nouvelle existence à quelque chose¹. Cette opération est moderne en architecture.

Pour Viollet le Duc « *Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné* ».

Les Romains restituaient, mais ne restauraient pas, et la preuve, c'est que le latin n'a pas de mot qui corresponde au mot restauration, suivant la signification qu'on lui donne aujourd'hui². Cesar Brandi de son côté a défini la notion de la restauration étant « *le moment méthodologique de la reconnaissance de l'œuvre d'art, dans sa consistance physique et sa double polarité esthétique et historique, en vue de sa transmission aux générations futures* »³.

Mais la définition la plus conventionnelle reste celle de la Charte de Venise, qui a aussi fixé les principes suivants :

¹ Petit Larousse 2010. Edition Larousse 2009.

² Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc: Stichwort "Restauration". In: Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVe siècle, 10 Bände, Paris 1854-1868.

³ C.Brandi. Théorie de la restauration. Edition du patrimoine, Paris 2001. P 30.

Chapitre I : Descriptif du palais Meriem Azza objet de la restauration

- "La restauration est une opération qui doit garder un caractère exceptionnel. Elle a pour but de conserver et de révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument et se fonde sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques. Elle s'arrête là où commence l'hypothèse : sur le plan des reconstitutions conjecturales, tout travail de complément reconnu indispensable pour des raisons esthétiques ou techniques relève de la composition architecturale et portera la marque de notre temps. La restauration sera toujours précédée et accompagnée d'une étude archéologique et historique du monument" (Art. 9).

- "Lorsque les techniques traditionnelles se révèlent inadéquates, la consolidation d'un monument peut être assurée en faisant appel à toutes les techniques modernes de conservation et de construction dont l'efficacité aura été démontrée par des données scientifiques et garantie par l'expérience" (Art. 10).

- "Les apports valables de toutes les époques à l'édification d'un monument doivent être respectés, l'unité de style n'étant pas un but à atteindre au cours d'une restauration. Lorsqu'un édifice comporte plusieurs états superposés, le dégagement d'un état sous-jacent ne se justifie qu'exceptionnellement et à condition que les éléments enlevés ne présentent que peu d'intérêt, que la composition mise au jour constitue un témoignage de haute valeur historique, archéologique ou esthétique, et que son état de conservation soit jugé suffisant. Le jugement sur la valeur des éléments en question et la décision sur les éliminations à opérer ne peuvent dépendre du seul auteur du projet" (Art. 11).

- "Les éléments destinés à remplacer les parties manquantes doivent s'intégrer harmonieusement à l'ensemble, tout en se distinguant des parties originales, afin que la restauration ne falsifie pas le document d'art et d'histoire.» (Art. 12).

- "Les adjonctions ne peuvent être tolérées que pour autant qu'elles respectent toutes les parties intéressantes de l'édifice, son cadre traditionnel, l'équilibre de sa composition et ses relations avec le milieu environnant" (Art. 13).

La restauration se caractérise par la recherche du statu quo : toute modification de l'état originel est proscrite à moins d'être clairement lisible et facilement réversible ; elle se distingue de la réhabilitation par son rapport à la continuité et au changement. L'une est dévolue au maintien de la forme bâtie, sans égard particulier pour l'évolution éventuelle de son contenu ; l'autre transforme un bâtiment pour en actualiser à la fois le programme et la construction. Cette modification d'un lieu existant impose des arbitrages entre les exigences patrimoniales, sociales, et économiques¹.

¹P.Joffroy. « la réhabilitation des bâtiments ». Editions : Le Moniteur, Paris, 1999. P 13.

Conclusion :

Les monuments ont toujours eu une importance historique, culturelle, sociale, ou technique ; ce patrimoine doit bénéficier d'un intérêt digne de sa valeur, car la négligence qui persiste conduira directement l'histoire des villes vers l'oubli.

Comme on a pu voir dans ce chapitre, le palais de Meriem Azza malgré qu'il soit un patrimoine national à préserver, manque d'entretien, les façades sont dégradées et leur restauration doit se faire en respectant les principes de la Charte de Venise.

Les matériaux utilisés doivent être compatibles avec les matériaux anciens, donc il faut une bonne connaissance de la matière. Et en ce qui concerne les enduits ainsi que la peinture, la chaux est de nos jours le matériau à préconiser, vu ses dénombrables qualités qui ne sont plus à prouver, surtout que les architectes restaurateurs s'en tiennent aux formules traditionnelles.

Chapitre -II-

Les mortiers d'enduit à base de chaux

Introduction :

La chaux est un matériau naturel qui a su continuer à travers les âges et les temps. Avec ses caractéristiques chimiques et physiques, plusieurs domaines trouvent leurs réponses. Son emploi dans le bâtiment comme mortier, enduit ou badigeon remonte à plusieurs millénaires, mais au cours de ses dernières années, elle s'est vue supplantée par le ciment, son successeur artificiel. Avec le développement des idées sur le patrimoine architectural et sa préservation, la chaux retrouve un nouveau souffle. Étant le matériau de base dans l'ancien bâti, elle possède des propriétés compatibles avec les exigences de la réhabilitation et la restauration, et son usage apporte des avantages, que ce soit sur le côté constructif, esthétique, historique, ou encore environnemental.

Les mortiers de chaux remplissent plusieurs rôles dans une construction : ils sont utilisés pour le jointement de maçonnerie, les chapes, les scellements et calages. Dans ce chapitre, on s'intéressera uniquement au mortier d'enduit à base de chaux aérienne.

1- Historique :

Les premiers témoignages d'ouvrages réalisés avec de la chaux ont été découverts en Mésopotamie (Asie Mineure) vers le V^e millénaire av. J. c. Deux millénaires après, 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.

L'Égypte hellénistique a suivi les méthodes de construction grecques. Des mortiers à base de chaux, des sables associés quelquefois à de la brique pilée ont été utilisés. L'analyse du mortier de la pyramide à degrés 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 de quartz. Le mortier de chaux a été employé en Grèce comme liant à bâtir à Délos. Mais les constructeurs grecs ont préféré, dans l'ensemble, réserver leurs liants aux enduits et revêtements. Un soin extrême était apporté au traitement des installations hydrauliques².

Les romains ont su tirer parti des connaissances transmises par les Grecs. En effet, ils ont multiplié les utilisations de la chaux et ont amélioré les procédés de fabrication, notamment la cuisson. Les premiers mortiers à base de chaux et de pouzzolane ont été localisés dans deux régions : la Campanie et le Latium. La qualité des matériaux, la mise en œuvre soignée, et surtout la connaissance que les maçons avaient du phénomène de carbonatation, ont contribué à créer la légende du mortier romain, cette connaissance repose sur la maîtrise de la fabrication d'une chaux de qualité et sur la recherche d'hydraulicité par

¹Ecole d'Avignon. « Techniques et pratiques de la chaux ». Deuxième édition : Eyrolles, Paris 2003. P 196

² Idem, Ecole d'Avignon, P 197

l'ajout de briques pillées ou de Cendre volcanique, ce qui donna aux mortiers antiques une couleur rosée-rouge ou gris mastic.¹

Depuis l'antiquité, les matériaux utilisés pour la fabrication des enduits étaient constitués d'un mélange de chaux, de sable, de pouzzolanes, et de brique, la technique des enduits fins était par ailleurs largement pratiquée et perdura jusqu'au moyen âge, et ce n'est qu'à la fin du X^e siècle ou la qualité des mortiers apparaît meilleure, une amélioration expliquée par un savoir limité des processus thermiques et chimiques, et une connaissance partielle de la cuisson de la chaux et des procédés de chauffe.

Les recherches se multiplièrent sur les procédés de cuisson de la chaux, sa nature, et surtout le secret de l'hydraulicité :

- En 1756 Smeaton effectue des recherches expérimentales sur le rôle de l'argile dans certains calcaires.
- En 1787 Chaptal développe des expériences à partir de pouzzolanes artificielles, rentrant dans la composition des mortiers de chaux. Son but est de permettre la réalisation d'économies sur la construction d'ouvrages hydrauliques, en limitant l'importation de pouzzolanes naturelles.
- Entre 1825 et 1860 Vicat publie de nombreux ouvrages sur la chaux hydraulique artificielle. Il étudie notamment l'influence de l'argile lors de la calcination des calcaires. Et après de nombreux travaux sur la calcination du calcaire provenant de l'ensemble du territoire, de l'étude de la silice, de l'alumine contenue dans le calcaire, de l'apport d'argile après calcination... la première usine à chaux hydraulique artificielle fabriquée par le procédé VICAT est construite en 1918 à Nemours (Seine-et-Marne)

2- Définition technique des mortiers :

Un mortier est un matériau pierreux artificiel obtenu après durcissement d'un mélange en proportions convenables de liant, d'eau et d'un granulat fin (sable)².

On différencie les divers mortiers d'après divers indices dont les plus importants sont la résistance mécanique, la masse volumique, la destination et la catégorie du liant entrant dans la préparation du mortier.

Selon leur masse volumique on distingue :

- Mortiers lourds dont la masse volumique est supérieure à 1500 kg/m^3
- Mortiers légers dont la masse volumique est inférieure à 1500 kg/m^3

¹ Idem, Ecole d'Avignon, P 198-199

²V.Vorobiev, « Matériaux de construction ». Édition. Mir, Moscou 1967. P 249.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

Selon leur destination on distingue :

- Mortiers de maçonnerie : l'assemblage des éléments exige des propriétés mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges.
- Mortiers d'enduit : leur indice de qualité essentiel est la protection, l'adhérence, et l'aspect décoratif, ils ne sont pas soumis à des actions mécaniques importantes.

Selon le liant employé on distingue :

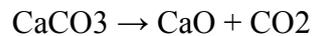
- Mortiers aériens : mortier de chaux, mortier de plâtre.
- Mortiers hydrauliques : mortier de ciment.
- Mortiers bâtards : mortier de ciment+chaux, chaux+terre, ou chaux+plâtre.

3- Les constituants des mortiers de chaux :

3-1 La chaux :

3-1-1 Définition de la chaux :

Le terme de chaux est générique. Il regroupe un grand nombre de produit, dont le seul point commun est d'être obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température de calcaire. La cuisson décompose le carbonate de calcium CaCO_3 qui est le principal constituant du calcaire, pour libérer le gaz carbonique CO_2 , et laisser la chaux vive CaO :



La chaux vive CaO ne peut être utilisée directement, car son hydratation s'accompagne d'un gonflement inadmissible dans un ouvrage. Donc on procède à son hydratation de façon à ce que on obtienne une chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sous forme de poudre blanche, légèrement soluble dans l'eau, et présentant les propriétés d'un liant¹.

Dans ce schéma on peut voir l'ensemble des transformations que subissent la pierre à chaux et la chaux dans la chaîne opératoire du mortier.

¹ OPVM : Office de la Protection de la Vallée du M'zab, «La chaux matériau de construction et de restauration ». P 02

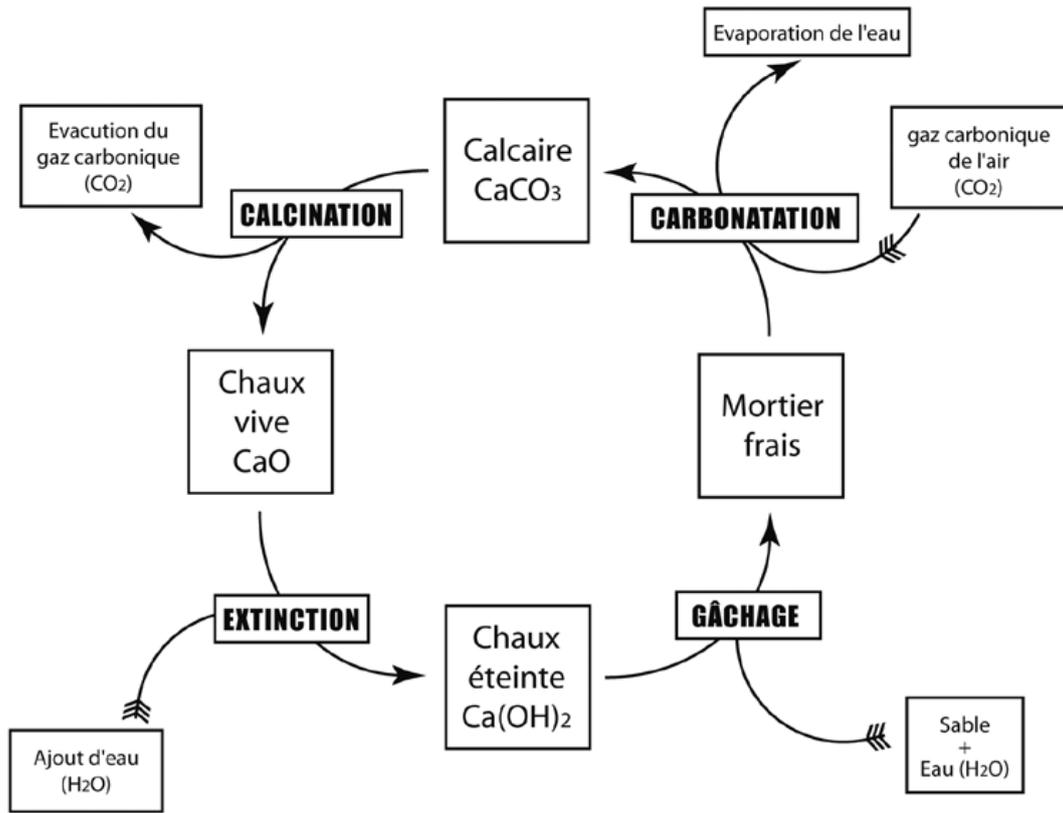


Figure II-1 : Cycle de la chaux ¹

La calcination est la première étape du cycle de la chaux. La cuisson s'effectue à une température minimale de 830°C pour une pression d'atmosphère (pression atmosphérique normale). Pour un calcaire pur, il se produit la réaction endothermique suivante :



Il s'agit d'une réaction de décarbonatation. Le dégagement de dioxyde de carbone (CO_2) entraîne une perte de poids importante, jusqu'à 44 % de la masse initiale. Le volume est en revanche conservé. L'oxyde de calcium (CaO) restant est appelé « chaux vive ». Les chaux vives les plus réactives sont obtenues après calcination du calcaire à une température de 900°C.

L'extinction de la chaux vive est la deuxième étape du cycle de la chaux. Elle s'effectue par aspersion d'eau ou par immersion dans des bacs, est une réaction d'hydratation :



¹A.Coutelas, « Le mortier de chaux ». Éditions errance, Paris 2005. P 15

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

Cette réaction est exothermique. La température du mélange peut s'élever jusqu'à 400°C, mais elle est généralement comprise entre 150 et 200°C. De fait, l'extinction de la chaux est une opération délicate et dangereuse. Au final, on obtient la chaux éteinte, un dihydroxyde de calcium (Ca(OH)₂).

Tableau II-1 : Propriétés physiques et chimique chaux vive et chaux éteinte¹

	La chaux vive	La chaux éteinte
Nom	Oxyde de calcium	Hydroxyde de calcium
Formule chimique	CaO	Ca(OH) ₂
Aspect	Roche, granulé, poudre, blanc	Poudre, blanche
Odeur	Sans	Sans
Point de fusion	2614 °C	Décomposition à 580°C (se transforme en CaO)
Point d'ébullition	2850 °C	2850 °C
Inflammabilité	Non	Non
MVA	0.7 à 1.2 t/m ³	0.2 à 0.8 t/m ³
Poids spécifique	3350 kg/m ³	2200 kg/m ³
Solubilité dans l'eau	1.4 kg/m ³ à 0 °C ; 1.25kg/m ³ à 20 °C	1.85kg/m ³ à 0 °C ;1.65 kg/m ³ à 20 °C
Ph (à 25°)	12.4 en solution saturée	12.4 en solution saturée
Réactivité	Réaction avec l'eau et les acides, avec fort dégagement de chaleur.	Réaction avec l'aluminium en présence d'eau, forte réaction exothermique en présence d'acides.

¹ Idem OPVM. P 07

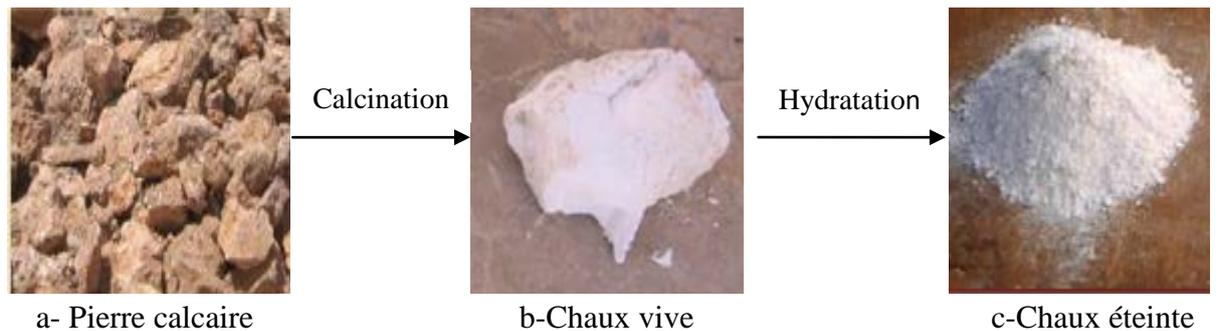


Figure II-2 : Différentes formes de chaux

La qualité de la chaux vive est essentiellement caractérisée par :

- Sa réactivité ou vitesse d'extinction à l'eau ;
- Son degré de cuisson avec la teneur en CO₂ résiduel ;
- Sa teneur en CaO actif.

La qualité de la chaux hydratée est caractérisée par :

- Sa finesse ;
- Sa stabilité (absence de chaux vive) ;
- Sa pureté [CO₂ résiduel, Ca(OH)₂].

3-1-2 Les types de chaux :

La fin du cycle de la chaux correspond à la réaction de carbonatation. Celle-ci dépend du type de chaux employé. La nature des constituants du calcaire, permet d'obtenir :

a. Les chaux aériennes :

On obtient les chaux aériennes par la calcination d'un calcaire pure, ou qui contient un faible pourcentage d'argile (0 à 5 %). Les chaux grasse et maigre sont deux types de chaux aérienne, la chaux grasse tient son nom de l'onctuosité qu'elle procure au mortier, elle est très pure en carbonate (plus de 95 %) contrairement à la chaux maigre dont le taux d'argile atteint les 5 %.

Les chaux aériennes sont caractérisées par leur lenteur de prise. Cet inconvénient n'était pas considéré vraiment comme un handicap par les anciens bâtisseurs, car cette lenteur permettait par la plasticité des mortiers un tassement progressif de la construction au fur et à mesure de son élévation, ainsi qu'une excellente répartition des pressions.

b. Les chaux hydrauliques :

Lorsque le calcaire contient de l'argile (8 à 20%), la calcination donne lieu à la formation de silicates et d'aluminates de calcium, ce qui confèrent au liant un caractère hydraulique, et les chaux obtenues sont appelées chaux hydrauliques.

La prise des chaux hydrauliques se fait avec l'eau, sans air et même sous l'eau. Leur résistance mécanique est également remarquable par rapport à celle des chaux aériennes.

La qualité hydraulique d'un mortier est déterminée par l'indice de Vicat (indice d'hydraulicité). C'est le rapport entre différents composants associés à l'argile et la part en chaux, Le temps avant le début de la prise dépend directement de l'indice d'hydraulicité : plus celui-ci est élevé, plus rapide sera la prise.

Les propriétés des chaux hydrauliques n'étaient pas connues avant la fin du XVIII^e siècle. Les mortiers dits hydrauliques durant les périodes historiques ne correspondent pas à des mortiers de chaux hydraulique, mais à des mortiers de chaux aérienne mêlée avec un granulat réactif, « pouzzolanique », tel le tuileau « la brique pilée ».

c. Les chaux dolomitiques (magnésiennes) :

La calcination d'une roche calcaire contenant du carbonate de magnésium $MgCO_3$, produit des chaux magnésiennes, contenant à la fois de l'oxyde de calcium CaO et de l'oxyde de magnésium MgO (magnésie). Ces chaux sont également appelées chaux dolomitiques.

Chaux dolomitiques et chaux hydrauliques naturelles peuvent, à l'égal des chaux aériennes, être soit vives, soit éteintes, selon qu'elles sont le produit direct de la calcination et contiennent donc des oxydes, ou qu'elles ensuite hydratées et contiennent alors des hydroxydes. La chaux hydraulique artificielle n'est pas considérée comme une chaux, car son obtention n'est pas par calcination de calcaire, mais par broyage et mélange de clinker de ciment et de matériaux inertes¹.

3-1-3 Fabrication de la chaux :

a- Fabrication traditionnelle :

Pour le chargement du four, le chafournier pénètre dans l'orifice inférieur, il dispose des blocs de calcaire de 2 à 3 kg, de façon à former une fausse voûte et, au centre, il laisse une ouverture circulaire par laquelle passera et montera la flamme. Les pierres calcaires doivent être parfaitement calées car elles supportent toute la charge.

Si la voûte est bien construite, elle ne s'effondrera pas pendant la cuisson ; en effet, la pierre, sous l'action de la chaleur, perd environ 44% de son poids, mais seulement entre 10 et 15 % de son volume.

¹J.Claude, « la chaux ses utilisations ». Editions Nathan Communication. Paris 1990. P 09

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

A la base du four, le chaufournier pose autant de rangées de pierre que possible, les faces les plus grandes proches du feu, les faces les plus petites près des murs du four. Il remplit le four jusqu'à l'orifice supérieur, le ferme par une couche de pierres qui s'élève de 20 à 30 cm au dessus du sol, et met le feu en marche à l'aide d'un bruleur.

La cuisson se poursuit pendant trois jours sans interruption, ou le chaufournier surveille la couleur de la flamme : au départ, elle est bleutée, à cause du gaz carbonique quelle contient, mais elle rougit à la fin de la calcination. Il sait alors qu'il peut interrompre la cuisson.

Selon les textes classiques, la bonne chaux est légère et sonore : lorsqu'on la frappe avec un morceau de fer, elle émet un son qui rappelle celui d'une céramique bien cuite soumise à la même épreuve. Il faut laisser reposer la fournée, qui a perdu un peu plus d'un tiers de son poids, pendant deux à trois jours, pour qu'elle refroidisse lentement, en fermant les deux orifices du four¹.

b- Fabrication industrielle :

La fabrication industrielle de la chaux consiste à transformer un matériau naturel (calcaire ou dolomie) en un produit aux multiples usages, avec des spécifications techniques différentes et adaptées à ces usages. Cette fabrication passe par de étapes. Une fois le site retenu, la première phase va de l'exploitation à la préparation de la roche à l'enfournement. La suivante concerne la calcination proprement dite de la pierre fragmentée dans des fours. La dernière permet l'élaboration et le conditionnement du produit final avant chargement pour expédition. La roche qui répond aux critères de fabrication est extraite du sol puis acheminée vers la chaîne de traitement pour être réduite aux dimensions souhaitées par le chaufournier. Elle est généralement débarrassée des impuretés par criblage préalable (voie sèche) ou lavée si nécessaire et ne doit contenir qu'un minimum de particules fines. D'ailleurs, les particules de dimensions inférieures à 10 mm sont considérées comme « difficiles » à traiter en raison de problèmes qu'elles occasionnent dans les fours, dont le colmatage. Elles peuvent être utilisées pour d'autres usages (agriculture, routes...)².

3-1-3 Les fours à chaux :

a- Les fours traditionnels

Les anciens fours à chaux étaient construits toujours à proximité des lieux d'approvisionnement en pierres comme en combustibles. Ils avaient généralement une forme tronconique, avec une hauteur de 5m, et un diamètre de 3m environ. Les parois intérieures étaient recouvertes d'argile, de briques ou de pierres réfractaires, qui servaient à conserver et à isoler thermiquement le four.

¹Idem OPVM. P 7,9.

²M.Bourezg. « Etude géologique et minière de quelques roches industrielles. Cas d'applications dans le Nord-est Algérien ». Thèse de doctorat en science, université de Constantine.

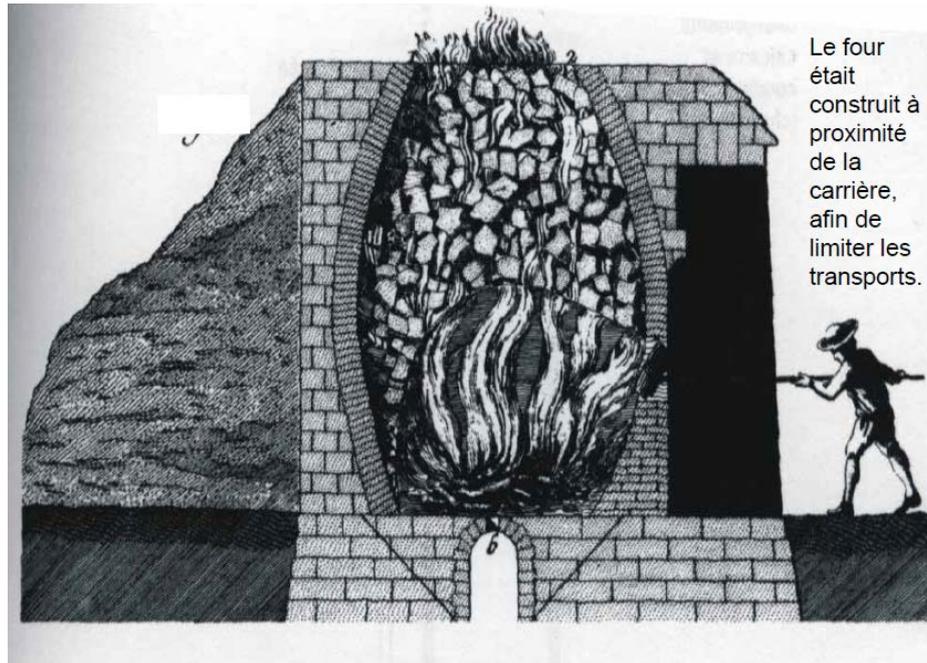


Figure II-3 : Conduite d'un four primitif



Figure II-4 : four en phase de calcination



Figure II-5 : l'intérieur du four

Un four à chaux est un réacteur dans lequel des morceaux de calcaire (ou de dolomie) sont portés, pendant une durée déterminée à une température appropriée, dépassant les 800°C. Le processus de cuisson paraît simple mais Il ne se déroule pas sans poser quelques problèmes car il faut traiter des tonnages importants et fabriquer un produit de très bonne qualité. Selon la granulométrie de la pierre mais aussi selon les usages industriels, deux catégories de fours sont utilisés : les fours verticaux et les fours rotatifs. Sans aborder les détails des processus mis en jeu lors de la cuisson (thermodynamique, cinétique des réactions, transformations minéralogiques...), les fours, dans l'une ou l'autre de ces catégories, comportent en simplifiant une zone de préchauffage, une zone de calcination et une zone de refroidissement¹. On retrouve une zonalité équivalente dans les fours rotatifs à ciments. Dans les installations modernes, la cuisson se fait en flamme continu.

¹M.Bourezg. « Etude géologique et minière de quelques roches industrielles. Cas d'applications dans le Nord-est Algérien ». Thèse de doctorat en science, université de Constantine : (Claude-1994 ; Lhoist (1992,1996...)).

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

Les parties exposées aux températures élevées sont généralement protégées par un garnissage de briques réfractaires dont la durée de vie est de 2 à 3 ans; leur rôle est de protéger la virole métallique externe et de limiter les pertes de chaleur par rayonnement des parois. L'air réchauffé et les gaz de combustion circulent à contre courant dans l'enceinte du four et assurent la décarbonatation du minerai. Toutes les opérations sont de nos jours entièrement automatisées ; des instruments de mesure, de contrôle et de régulation permettent de suivre à distance le bon fonctionnement de l'ensemble.

b- Les fours verticaux:

La fabrication industrielle de la chaux a débuté avec ce type de fours. Ils étaient surtout destinés à traiter de gros calibres, l'échange de la réaction matière-chaleur y est appréciable. Ils peuvent travailler avec de petits calibres, mais le rendement diminue. Le temps de séjour moyen de la matière est de l'ordre de 24 heures. Il existe plusieurs variantes dénommées : fours à cuve (ou fours droits), fours annulaires (ou Warmestelle) et fours à flux parallèles. Les deux premiers peuvent être regroupés par batteries de quatre¹. Dans ces fours, la cuisson du calcaire (ou de la dolomie) s'effectue progressivement en descendant verticalement dans une enceinte cylindrique en acier intérieurement garnie de briques réfractaires. Ce calcaire rencontre un courant de gaz chaud (air + combustible) ascendant avec lequel s'opèrent des échanges thermiques dans les trois zones évoquées plus haut : celle du préchauffage dans la partie supérieure, celle de la décarbonatation dans la partie centrale et celle du refroidissement dans la partie inférieure de l'enceinte. Le CO₂ produit est évacué par l'air qui remonte vers la couche supérieure puis vers une cheminée de dépoussiérage. (FigII-6)

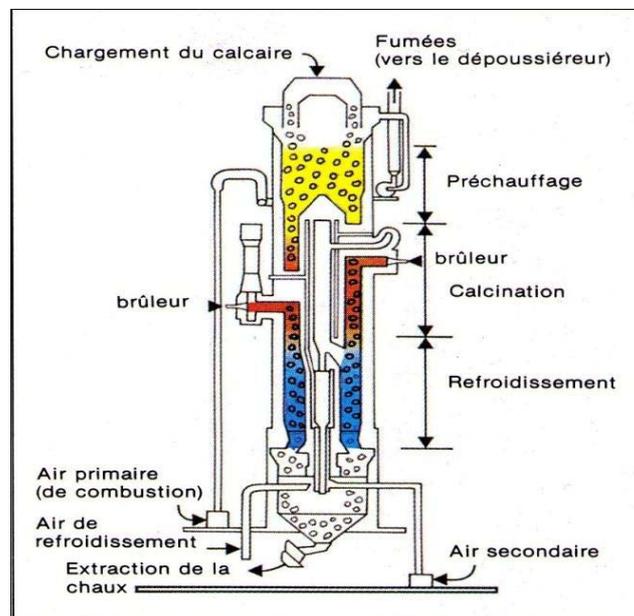


Figure II-6 : Schéma simplifié d'un four vertical (Claude, 1994)

¹G. HERRIER, M. PELLETIER, et D. PUIATTI, 2010. Chaux aérienne. Contexte, fabrication, domaines applicatifs. Collection Techniques de l'ingénieur, C-923, France : 1-18. Cité par M. Bourezg.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

Enfin, lorsque le refroidissement est suffisant, la chaux est évacuée en partie basse. Cette extraction s'opère en simultané avec l'introduction d'une quantité équivalente de calcaire au sommet. Les fours modernes, qui permettent de grosses productions allant jusqu'à 600 t/jour et plus, utilisent le fuel ou le gaz naturel. Ces combustibles sont alors injectés par des lances aux deux tiers environ de la cuve ; ils s'enflamment et provoquent ainsi la combustion nécessaire dans la zone de chauffe de la cuve. Ce procédé, mis au point et constamment amélioré par la nature du combustible et son mode d'introduction, a l'avantage de répartir de façon homogène le combustible, et donc la chaleur dégagée par sa combustion, dans la masse de calcaire. Le bilan énergétique de l'opération s'en trouve nettement amélioré (moins de 1000 thermies par tonne produite), un minimum de calories étant ainsi perdu. La qualité de la chaux s'en trouve également améliorée du fait de la plus grande homogénéité de la cuisson¹.

Il convient de signaler l'existence de variantes à ces fours verticaux parmi lesquelles le four à cycles alternés (**Fig II-7**) qui permet d'optimiser le rendement énergétique de la fabrication et de produire de grandes quantités grâce à la combinaison de deux fours verticaux fonctionnant alternativement. Après enfournement sur une cuve, la combustion se fait sur l'autre permettant aux fumées de passer par le canal de liaison (ou « carneau ») et de préchauffer la pierre qui vient d'être enfournée.

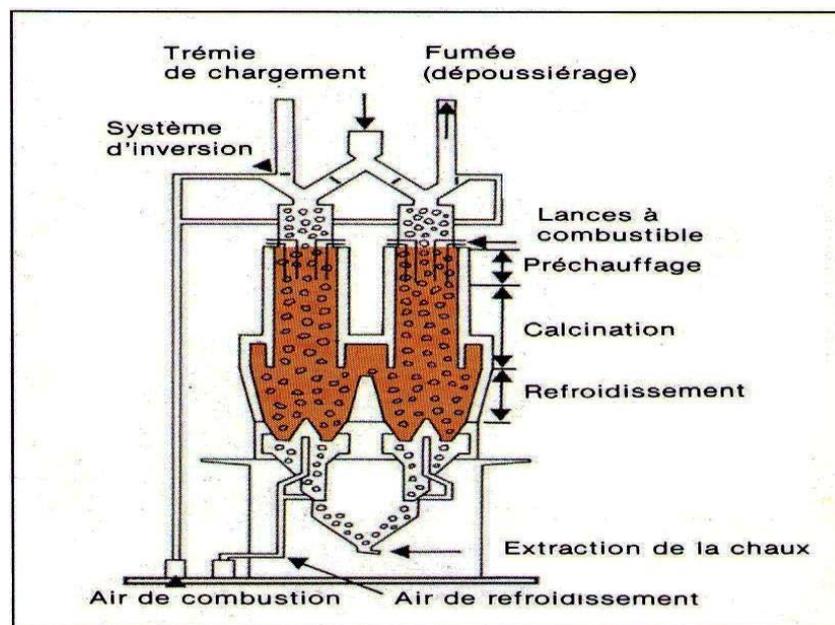


Figure II-7 : Schéma simplifié d'un four à cycles alternés (Claude, 1994).

La charge est, avant tout, cuite suivant un flux parallèle et l'air de combustion est préchauffé par récupération. Un tel processus de cuisson est possible grâce au concours d'au moins deux cuves, dont le chauffage et le courant gazeux sont périodiquement inversés. Les fours du fabricant Mears, parmi les plus performants actuellement, sont de ce type. Ces modèles ainsi que les fours annulaires sont les plus fréquemment rencontrés.

¹ Idem, J.Claude.

c- Les fours rotatifs:

Ils sont inspirés des fours servant à fabriquer du ciment, mais fonctionnant à des températures de l'ordre de 1000 à 1300° C. Leur principe de fonctionnement est assez proche de celui des fours verticaux, en ceci que le calcaire effectue un chemin inverse de celui du mélange air/combustible dans le four et diffère en cela que l'opération s'effectue presque horizontalement. Au niveau du préchauffage et du refroidissement des grilles tournant en boucle assurent l'avancée du calcaire et de la chaux ; au niveau de la combustion, une légère pente associée à la rotation du four garantit l'écoulement naturel de la chaux. L'air frais est soufflé par le bas, via des grilles situées au niveau du refroidisseur (**Fig.II-8**).

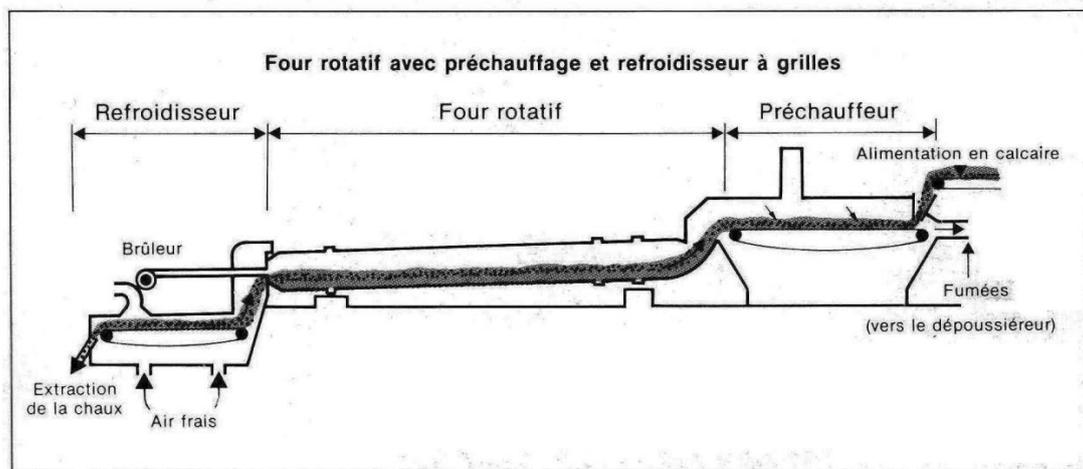


Figure II-8 : Schéma simplifié d'un four à chaux rotatif (Claude, 1994)

Contrairement aux fours verticaux qui ont un enfournement et un défournement discontinus, le processus d'approvisionnement des fours rotatifs est entièrement continu. Le temps de séjour y est de l'ordre de 6 à 8 heures¹. Les fours rotatifs ont les avantages suivants:

- Des capacités de production élevées (plus de 1500t/jours),
- la possibilité d'utiliser de petits calibres de minerai moins gênants que dans les fours verticaux,
- une souplesse d'utilisation dans la capacité de production, et une meilleure adaptation à la production de qualités spéciales. Par contre, leurs rendements caloriques sont moins bons (≥ 1200 thermies/tonne produite).

d- Autres types de fours :

Nous citons pour mémoire l'existence d'autres types de fours, beaucoup moins répandus que les précédents, comme les fours type « Calcimatic » à soles tournantes ou les fours « cascades », allusion faite à la descente du minerai par paliers de cuisson d'une manière

¹ Idem, Herrier G. et Al, 2010.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

générale, de nos jours les fours à chaux font l'objet d'améliorations continues afin d'augmenter leurs performances et de les adapter à une production de plus en plus variée. Pour résumer, le tableau ci-après (**Tableau II-2**) résume les principales caractéristiques des fours les plus répandus.

Tableau II-2 : Types et tailles de fours à chaux en service en U.E (BREF-2006) avec granularité des pierres à l'alimentation

Types de fours	Nombre de four	Production (T/j)	Granularité. Alimentation (mm)
Four long rotatif (LRK)	26	160 - 1500	2 - 60
Four rotatifs avec préchauffeur (PRK)	20	150 - 1500	10 - 60
Fours verticaux à cycles alternés (PFRK)**	158	100 - 600	10 - 200
Four annulaire (ASK)	74	80 - 300	10 - 150
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	116	60 - 200	20 - 200
Autres fours	203	10 - 200	20 - 250
Total	597	-	-

3-2 Les granulats:

D'origine naturelle ou artificielle ils sont un ensemble de grains inertes. Leur rôle est essentiel, car ils contribuent à la résistance des mortiers grâce à l'armature qu'ils forment.

Les granulats sont désignés par leur dimension inférieure d et supérieure D de tamis de contrôle à maille carrées dans la série normalisée, exprimé d/D . les intervalles d/D et $0/D$ sont également appelés classe granulaire.¹

Le granulat est primordiale pour la confection des mortiers, la chaux aérienne n'est jamais employée seule dans la maçonnerie, sinon plusieurs phénomènes secondaires apparaîtraient : la perte de volume due à la carbonatation serait à l'origine d'une indésirable fissuration ; le cœur de la masse ne pourrait pas durcir, faute de contact avec l'air, et la plasticité interne provoquerait des tassements et des glissements dangereux pour la structure.

¹J.Baron, « les bétons : base et données pour leur formulation ». 2eme tirage Eyrolles. Paris 1997, cité par : B.farouk, « effet de la nature du sable sur les propriétés des mortiers ». Mémoire magister 2010.université de Guelma.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

Le granulat généralement employé pour la confection des mortiers est le sable, mais on utilise aussi ce terme pour désigner les fragments de terre cuite, les charbons de bois et la paille qu'on ajoute aux mortiers de chaux¹.

3-2-1 Le sable :

Le sable est l'ensemble de grains de 0 à 6.3 mm, résultant de l'altération naturelle de roches

Le sable est caractérisé par :

- **Classe granulaire 0/D** : elle est définie par deux dimensions d'ouvertures de mailles carrées avec des conditions déterminées de tamisât et refus. Pour les mortiers *D* est inférieure ou égale à 4 mm selon NF EN 13139
- **La teneur en fines** : elle est définie comme le passant à 0.08 mm, cette teneur doit être inférieure ou égale à 15%.
- **Le module de finesse** : le module de finesse « MF » est défini comme étant la somme des pourcentages ramenés à l'unité, des refus cumulés sur les tamis suivants :

$$0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5 \text{ mm}$$

Le module de finesse « MF » doit être compris entre $1.8 \leq MF \leq 3.2$.

Un module de finesse élevé indique un sable grossier, un module de finesse faible caractérise un sable fin. Un bon sable doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8 ; au dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins ce qui nécessite une augmentation de dosage en eau, au dessus, le sable manque de fines et le mortier y perd en ouvrabilité.²

- **Propreté** : elle est déterminée par la mesure de l'équivalent de sable conformément à la norme NF EN 933-8 ou par la valeur au bleu de méthylène mesurée selon la norme NF EN 933-9.

3-2-2 La pouzzolane :

Selon la norme ASTM sur les ciments (désignation C 340-58 T) : La pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux, qui ne possède pas de propriétés liantes, mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

¹ Idem A. Coutelas. P 18

² G. Dreux, « nouveau guide de béton ». 2ème édition. Paris 1979.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO). Elles sont généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise¹.

Vitruve² dans son ouvrage (*De Architectura*, II, 6) préconise l'utilisation de cette poudre pour les ouvrages hydrauliques car elle donne au mortier la propriété de durcir sous l'eau. Ce sont ces propriétés de « prise hydraulique » qui ont rendu célèbre la pouzzolane.

Aujourd'hui le nom de pouzzolane englobe un grand nombre de matériaux d'origine diverses, selon la classification donnée par l'organigramme de la **Fig II-9**.

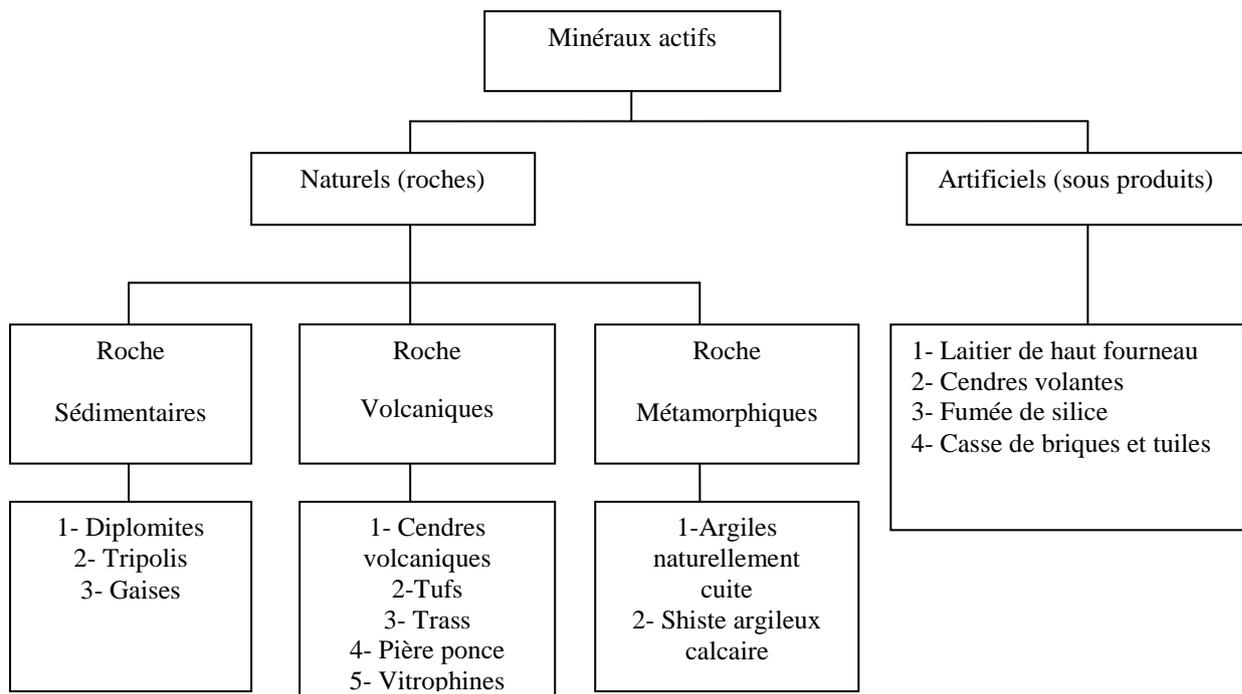


Figure II-9 : Origine des matériaux pouzzolaniques³

a. La pouzzolane naturelle :

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques⁴.

¹M.Z.Bessenouci, « impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat ». Université Tlemcen 2010.

² Vitruve, « les dix livres d'architecture » corrigés et traduits en 1684 par Claude Perrault. Ed pierre mardaga.

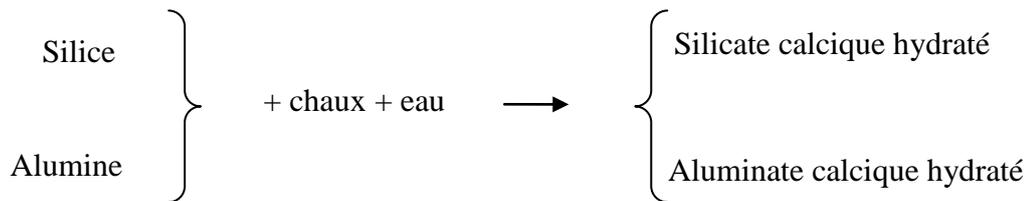
³MEATF, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, « les pouzzolanes et les basalts », bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978 p 61-69. Cité par M.Z.Bessenouci.

⁴Meukam P. « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

La pouzzolane est une substance qui est regardée comme une espèce d'argile ferrugineuse qui a éprouvé une forte température par le feu des volcans. Elle tire son nom de Pouzzoles en Italie, et affecte toutes sortes de couleurs ; on la trouve ordinairement à l'état d'une poussière mélangée de partie plus grossières et poreuses assez semblables à la pierre ponce¹.

La réactivité des pouzzolanes volcaniques naturelles (aspect chimique) dépend principalement de la nature du verre volcanique de ces cendres, très sensible au pH basique développé par la chaux en solution et tendant à se dissoudre par attaque calco-basique. Le schéma de la réaction peut s'écrire sous la forme simplifiée suivante² :



b. La pouzzolane artificielle :

Les pouzzolanes artificielles sont obtenues par la transformation de plusieurs substances d'origines diverses, la plus fréquemment utilisée est la poudre d'argile cuite ou la brique pleine cuite pilée (tuileau romain) : ces substances concassées et broyées, comme les poudres de pierre, augmentent la plasticité et la dureté des mortiers. Elles complètent la courbe granulométrique et remplissent une partie des vides laissés par les autres constituants du mortier³.

3-3 L'eau de gâchage :

L'eau employée pour le gâchage du mortier doit répondre aux prescriptions de la norme NF EN 1008⁴. L'eau potable convient toujours, elle doit être propre et exempte d'impureté.

L'eau de gâchage est nécessaire pour hydrater le mélange sec (liant+sable). Elle intervient aussi dans le processus de carbonatation de la chaux, en assurant la dissolution du gaz carbonique.

¹V.Biston « Manuel théorique et pratique du chauxfournier, 1836». Réédition Léonce Laget, Paris, 1981. p 139

²Idem A.Coutelas. P 20

³Idem école d'Avignon. P 53

⁴Document technique unifié, n°26.1 p1-2 travaux d'enduits de mortiers, critères généraux des choix des matériaux. Avril 2008.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

3-4 Les adjuvants :

La norme NF EN 934-2, définit l'adjuvant comme un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de leurs propriétés, à l'état frais ou durci.

Suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- ceux qui modifient l'ouvrabilité: plastifiants- réducteurs d'eau, superplastifiants (anciennement fluidifiants) ;
- ceux qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
- ceux qui modifient certaines propriétés particulières: entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse¹.

L'amélioration des caractéristiques des mortiers était aussi un but que visaient les anciens bâtisseurs, et ils y sont arrivés grâce à l'adjonction de produits dont la plupart étaient d'origine organique. En effet, de nos jours l'efficacité de certains de ces produits reste indéniable. Le tableau ci-dessous résume le rôle des adjuvants traditionnels dans les mortiers :

Tableau II-3 : Adjuvants traditionnels et leurs rôles dans les mortiers

Rôle des adjuvants	Adjuvants
Les rétenteurs d'eau (maintenir l'ouvrabilité)	Les huiles (huile d'olive, huile de lin), le sucre ;
Les agents mouillants, couvrants et les plastifiants	Le savon, le vinaigre, certaine résine comme le vinyl ;
Les fixatifs (fixation des pigments)	L'alun ;
Stabilisant, liant complémentaire (bonifier les caractéristiques mécaniques et physiques)	Les colles de peau, la col d'os, le suif, la caséine (protéine du lait), les résines naturelles (résine de pin), la cire d'abeille, le sang de bœuf, l'œuf ;
Les durcisseurs	Le suif, les résines et les gommés naturelles ;
Les entraîneurs d'air	Les huiles (lin, olive), le sang de bœuf, l'urine ;
Les hydrofuges	Les graisses, le suif ;

¹Cimbéton, « Les constituants des bétons et des mortiers ». Fiche technique tome 1,P 44.45.

3-5 Les pigments :

Les pigments sont des substances colorées, insolubles. Ils colorent la surface sur laquelle ils sont appliqués sans pénétrer dans la matière à la différence des teintures.¹

Les pigments sont ajoutés pour un but décoratif, ou par souci d'économie car traditionnellement, les anciens bâtisseurs ne disposaient que des sables et chaux locaux comme agent de coloration.

Les pigments de qualité ont une grande finesse, la propriété de rester en suspension, et la neutralité dans le milieu donné. La quantité employée demande un certain savoir-faire, et le choix de la couleur doit être bien maîtrisé car il influe directement sur l'absorption du rayonnement solaire. Il existe de familles de pigments :

a. les pigments naturels :

Les pigments naturels proviennent d'une réaction d'oxydation des éléments métalliques (exemple : le fer), intervenue dans leur milieu d'origine. Les terres, et les ocres étaient utilisés depuis l'époque romaine, Vitruve l'indique dans son septième livre, chapitre sept : 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 l'ouvrage le même effet que les couleurs simples et naturelles. De celles qui se tirent de la terre, celle que les Grecs appellent Ochra²...

b. les pigments artificiels :

Ils sont souvent obtenus par processus industriel de réaction chimique sur certains métaux tels que le fer et le cuivre. Le résultat donne des oxydes de différentes couleurs : jaune, rouge, vert, et bleu.

4- Les caractéristiques des mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux ont plusieurs qualités, on peut citer :

- La rétention d'eau : de nombreuses études ont démontré, grâce à des dispositifs spécifiques de filtration que ce sont les mortiers contenant de la chaux en pâte qui possèdent la plus grande capacité de rétention d'eau, ce qui confère aux mortiers une bonne plasticité.
- L'imperméabilité : les micropores des mortiers de chaux permettent à la vapeur d'eau de passer, contribuant ainsi à l'élimination de l'humidité.

¹Idem, école d'Avignon. P 183.

²Idem, Vitruve. P 244.

- L'adhérence : c'est la valeur la plus importante pour un mortier, étant donné que les mortiers servent à souder les éléments entre eux. L'adhérence dépend en grande partie de la plasticité et de sa capacité de retenir l'eau.

5- Les mortiers d'enduit :

5-1 Définition:

Selon NF DTU 26.1 P1-1, le mortier d'enduit est un mélange d'un ou de plusieurs liants minéraux, de granulats et parfois d'adjuvants et/ou d'ajouts, utilisés pour réaliser des enduits extérieurs ou intérieurs. Les enduits représentent le plus vaste domaine d'application des mortiers. L'enduit est une mince couche de mortier appliquée sur les parements d'un ouvrage¹. C'est la partie apparente qui assure la présentation ainsi que la protection des constructions.

5-2 Fonctions des enduits :

Les enduits remplissent plusieurs rôles, les deux prioritaires sont :

- La protection et l'isolation, contre l'humidité et ses mécanismes de pénétration de l'eau (gravité, capillarité, condensation, gel); également contre les agressions naturelles (pluie, vent, soleil).
- La présentation, pour redresser les surfaces internes inégales mais également pour habiller les parements externes, en leur ajoutant une dimension décorative.

5-3 Mise en œuvre :

L'enduit est un système multicouche (deux ou trois couches), ce qui permet de répondre isolément à chaque problème posé. Les exemples de ce système sont présents depuis des siècles dans les constructions, en particulier pour les citernes, et les conduits d'aqueducs.

L'application des enduits doit se faire par temps clémente suivant deux procédés² :

- Procédé classique, manuellement à l'aide d'une truelle ou au pot de projection (tyrolienne) ;
- Procédé par projection mécanique, à l'aide de systèmes appropriés utilisant de l'air comprimé (sablon, pompe de projection mécanique).

Les trois principales couches ainsi que leur fonction sont³ :

¹Dictionnaire de Français «Petit Larousse ».

² Centre Nationale d'Etudes et de Recherches intégrées du Bâtiment, CNERIB. Travaux d'enduit pour bâtiments : D.T.R. E 6-1. Algérie.

³ Nouveau DTU 26.1. Les mortiers de chantier et la chaux naturelle hydraulique. Avril 2008

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

a. Le gobetis :

Cette première couche est obligatoire en application manuelle pour favoriser l'accroche du corps d'enduit, son épaisseur est de 1 à 5 mm. Dans le cas d'une application mécanique, le gobetis n'est pas nécessaire, sauf si les supports sont constitués de matériaux hétérogènes.

b. Le corps d'enduit :

Cette couche a un rôle de protection, elle est réalisée au moins 48 heures après l'application du gobetis (7 jours ou plus par temps frais et humide). Pour une application manuelle, l'épaisseur du gobetis et du corps d'enduit réunis est comprise entre 15 et 20 mm. Pour une application mécanique, l'épaisseur de cette couche doit être comprise entre 12 et 15 mm.

c. La finition :

Son rôle est essentiellement décoratif. Sa résistance doit être inférieure à celle du corps d'enduit. Elle est réalisée au moins 7 jours après l'application du corps d'enduit pour les enduits à la chaux. L'épaisseur de la couche de finition, en application manuelle doit être comprise entre 5 et 8 mm. Pour une application mécanique, l'épaisseur minimale des deux couches (corps d'enduit et finition) doit être comprise entre 20 et 25 mm.

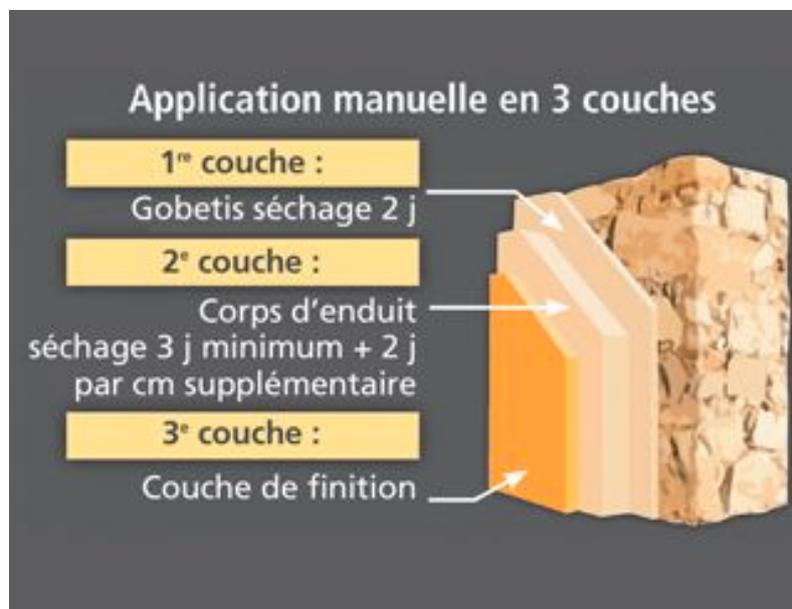


Figure II-10 : Mise en œuvre des mortiers d'enduit

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

5-4 Pathologies des vieux enduits :

Le bâti ancien a des caractéristiques mécaniques faibles. Il est normalement perméable à l'air et à l'humidité et a donc besoin d'un mortier d'enduit durable et adapté aux caractéristiques mécaniques du support pour pérenniser ses parois. Le tableau ci-dessous résume les pathologies ainsi que les performances requises pour y remédier :

Tableau II-4 : pathologies et solutions des vieux enduits¹

Le bâti ancien est déformé, et l'enduit risque de fissurer.	L'utilisation de liants faiblement hydrauliques (ciment, chaux) ou aériens, permet de développer des caractéristiques mécaniques progressives, limitant ainsi le risque de fissuration.
Le bâti est sensible aux remontées capillaires. Si l'enduit est poreux, des traces diverses risquent d'apparaître (ex. : auréoles, spectres, etc.).	L'enduit doit être perméable à la vapeur d'eau venant de l'intérieur des bâtiments et freiner la pénétration des eaux de pluie, tout en évacuant les eaux contenues dans les murs. On dit que l'enduit laisse respirer les anciens supports : cela évite l'apparition de taches d'humidité sur l'enduit, dû soit à une absorption rapide de l'eau soit aux efflorescences ou au salpêtre.
L'enduit est décollé et n'adhère plus au support. L'enduit	L'adhérence au support s'exerce par l'accrochage mécanique de la première couche. L'adhérence doit être durable et l'enduit doit avoir des caractéristiques mécaniques compatibles avec celles du support (un enduit dur ne sera pas compatible avec un support tendre) : cela évite que l'enduit se décolle en plaques, gonfle ou cloque (on dit que l'enduit "sonne le creux") et arrache donc le support.
L'enduit est peu résistant, non cohésif, et a perdu de sa dureté.	La surface des enduits doit résister à des sollicitations diverses (ex. : frottements et chocs, lessivage et entraînement de matières par des eaux de pluie, chocs thermiques, gel agressif). L'enduit doit présenter le plus rapidement possible un minimum de cohésion pour résister à ces sollicitations. Un enduit uniquement à base de chaux ne répond pas à cette exigence : une bonne composition du mortier évite la décohésion de l'enduit.

¹Weber et Broutin France. « Restaurer le caractère du bâti ancien », 2008. P 6.

6- Les enduits de chaux et l'environnement :

Le développement durable qui par définition est : « répondre aux besoins du présent, sans compromettre la capacité pour les générations futures de satisfaire les leurs »¹ touche beaucoup de secteurs. Tous sont appelés à veiller sur l'exploitation des ressources naturelles, économiser les énergies, et diminuer la pollution.

Ce concept s'applique dans le domaine des matériaux de construction en laissant aux générations à venir des ressources suffisantes pour garder un niveau de vie (économique, social, environnemental) au moins égal au notre. Cela suppose que le choix d'un matériau pour construire soit examiné non seulement au vu de ses performances et de son efficacité, mais aussi de sa disponibilité sur la planète, de son renouvellement, de la proximité de son origine, de l'énergie mise en jeu lors de son élaboration (énergie grise), de sa durée de vie². En trouvant une nouvelle destinée aux déchets de briques dans l'élaboration des mortiers à base de chaux qui est déjà un matériau traditionnel et écologique, l'idée du développement durable est respectée, et une fois usés les enduits de chaux peuvent être restaurés, ce qui est compatible avec les préoccupations environnementales contemporaines.

7- Les enduits de chaux en Algérie :

La technique de l'enduit de chaux est ancestrale en Algérie, perpétuée durant l'époque musulmane en milieu urbain et en bord de mer ; son usage a pratiquement disparu de nos jours en raison de :

- la contrainte de la fréquence d'entretien ;
- l'emploi considéré comme plus facile et plus rapide des enduits à base de ciment et plus récemment des enduits prêts à l'emploi notamment à base de chaux ;
- la mode des matériaux préférés d'aspect brut.

La disparition progressive de cette technique entraîne partout celle du savoir-faire traditionnellement transmis uniquement par sa pratique régulière.

Le liant utilisé pour l'enduit était la chaux aérienne en poudre. Aujourd'hui, on emploie des enduits à base de ciment. La peinture vinylique ou glycérophtalique s'est substituée au badigeon traditionnel à la chaux³.

L'utilisation de liants artificiels (ciment et chaux hydraulique artificielle) dans le dosage d'enduit porte un grand préjudice aux structures anciennes à base de terre: les murs ne respirent plus du moment que leurs porosités naturelles sont obstruées. Le taux d'humidité dans le mur n'est donc plus régulé; ce qui mène à des remontées capillaires suivies par une lente désintégration du mortier de chaux et de terre qui liaisonne les maçonneries. Du point de vue esthétique, l'aspect de l'enduit de remplacement est grisâtre.

¹BRUNDTLAND Gro Harlem, Notre avenir à tous, Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1987.

²C.Lemaitre. « Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction ». édition : Eyrolles, Paris 2012. P257

³Euromed héritage. Architecture traditionnelle Méditerranéenne, enduit à la chaux. Algérie.

Chapitre II : Les mortiers d'enduit à base de chaux

Les matériaux de remplacement sont jugés inadéquats car incompatibles notamment du point de vue chimique avec la composition traditionnelle des supports anciens.

L'utilisation de l'enduit à base de ciment et de chaux hydraulique artificielle en remplacement de l'enduit de terre et de chaux est satisfaisante au niveau économique et sur le plan du confort thermique. Du point de vue de la conservation, il n'équivaut pas à la résistance et la durabilité de l'enduit ancien. Sur le plan esthétique, les aspects de finition serrés et satinés sont différents des finitions traditionnelles.

Conclusion :

A travers ce chapitre, on peut conclure que la chaux est le matériau adéquat pour les chantiers de restaurations, et de réhabilitations. Employée dans les mortiers, elle fut durement concurrencée par les liants hydrauliques à cause de sa lenteur de prise, mais les anciens ont su palier cet inconvénient par l'ajout de matériaux à caractère pouzzolanique tels que le tuileau pilé. L'ajout de ses matériaux doit se faire selon des proportions bien définies, d'où le secret de la pérennité des constructions romaines.

L'élaboration ainsi que l'application des mortiers d'enduit demande un certain savoir-faire, afin de bien remplir le rôle de protection, les caractéristiques des matériaux doivent être connues, et surtout être compatibles du point de vue physico-chimique avec la composition traditionnelle des murs anciens.

Dans le chapitre suivant, nous entamerons notre travail expérimental. On proposera un mortier d'enduit à base de chaux aérienne pour la restauration des murs du palais Meriem Azza.

Chapitre -III-

Procédures expérimentales *Et caractérisation des* *matériaux*

Introduction :

L'intervention sur un tissu déjà existant est loin d'être une opération anodine, et la confection des mortiers de restauration demande une connaissance caractéristique de la matière dans sa constitution.

Ce chapitre aborde notre travail expérimental, qui consiste à l'élaboration et à la caractérisation d'un mortier d'enduit à base de chaux aérienne et de déchets de brique, et de voir l'influence de ces dernières sur la résistance mécanique et le temps de prise, et les autres caractéristiques physiques.

On commencera par l'analyse d'un échantillon altéré de mortier, puis on procédera à la caractérisation des différents matériaux qui seront utilisés dans toutes les formulations étudiées.

Pour finir on présentera les différents essais physiques, rhéologiques et mécaniques effectués sur les mortiers dans leur état frais ainsi que leur état durci.

1- Analyse d'échantillon :

Avant de proposer un mortier d'enduit pour la restauration, on a trouvé nécessaire de connaître la composition de base. L'échantillon qu'on a pu prélever du palais provient d'un support architectural sur brique comme il est indiqué dans la **figure III.1**.



a- Mortier altéré



b- Echantillon

Figure III.1 : Echantillon du mortier altéré

Chapitre III : Procédures expérimentales et caractérisation des matériaux

1-1 Analyse chimique :

L'analyse chimique a été réalisée par fluorescence X au niveau du laboratoire CETIM (Centre d'Etude et des services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction) à Boumerdes. L'appareil utilisé est : MAGIX-PRO de marque Philips Analytical.

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 doser¹. Les résultats sont représentés dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Résultats de l'analyse chimique élémentaire

Perte au feu (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)
16.21	49.90	7.70	2.14	19.85	0.82	0.57	1.89	1.23	0.09	0.23

Une bonne moitié de la composition chimique représente le dioxyde de silicium (SiO₂), ce qui indique la nature argileuse de l'échantillon de mortier analysé.

1-2 Analyse minéralogique :

La détermination de la composition minéralogique de l'échantillon, s'est faite par la méthode de la diffraction des rayons X, au niveau du laboratoire CETIM (Boumerdes). L'appareil utilisé est : X' Pert Pro de la marque Philips Analytical.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de distinguer les différentes formes de cristallisation d'un même composé (par exemple pour la silice, distinguer le quartz de la cristobalite). Cependant, elle ne peut généralement pas permettre d'identifier des composés amorphes. Cette technique est donc complémentaire de l'analyse élémentaire.

Une poudre formée d'une phase cristalline donnée va toujours donner lieu à des pics de diffraction dans les mêmes directions, avec des hauteurs relatives à peu près constantes. Ce diagramme de diffraction forme ainsi une véritable signature de la phase cristalline. Il est donc possible de déterminer la nature de chaque phase cristalline au sein d'un mélange (mélange de poudre ou échantillon massif polyphasique), à condition d'avoir auparavant déterminé la signature de chaque phase. Les résultats sont donnés dans la figure ci-dessous :

¹ A.Boukhenouf. « caractérisation des mortiers archéologiques, le cas des sites historiques de Djemila et de la Citadelle d'Alger ». Mémoire de magister. 2006. Université de Boumerdes.

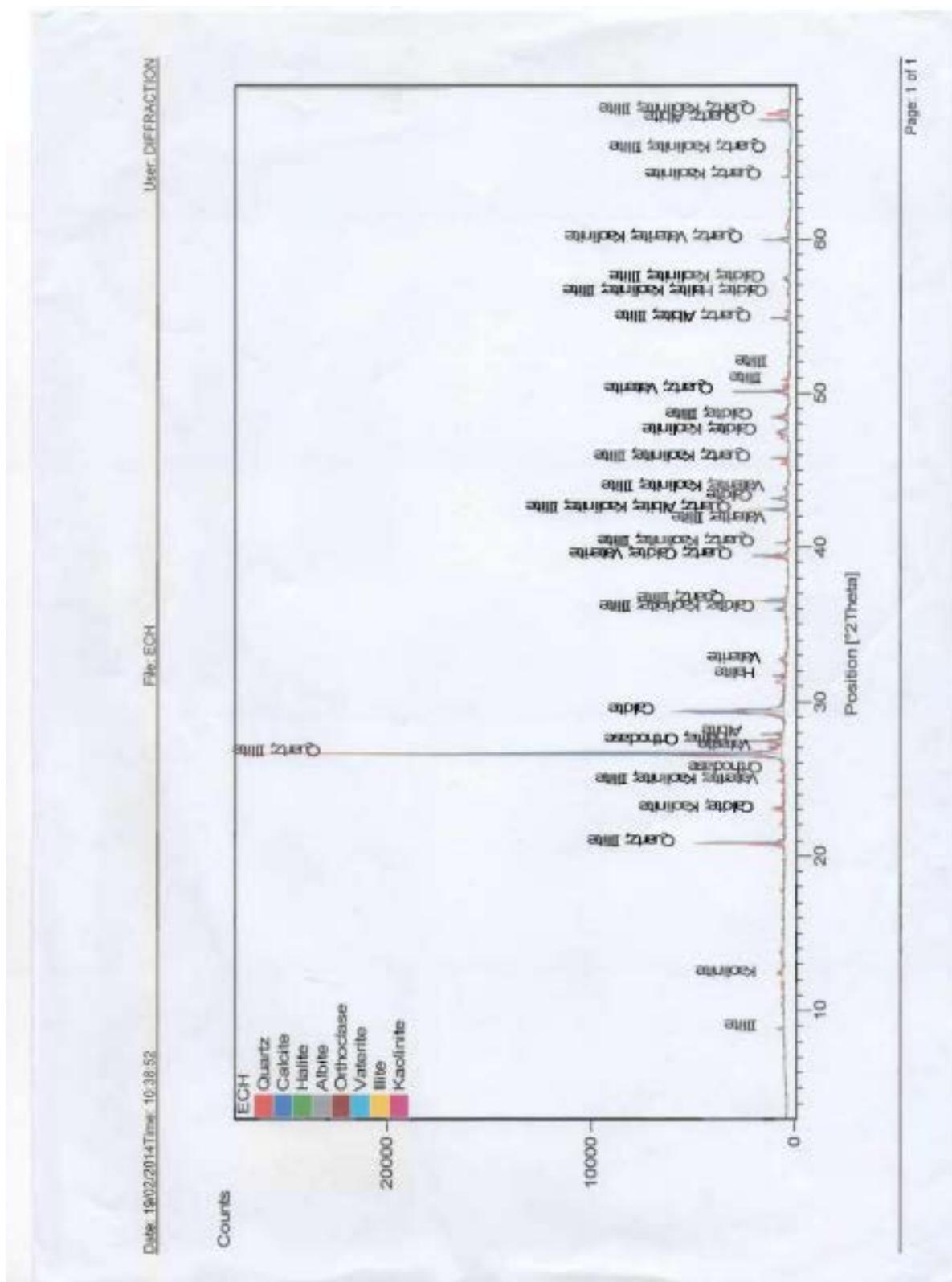


Figure III.2 : Diffractogramme de rayon x de l'échantillon prélevé au Palais Bengana-Skikda.

1-3 Interprétation des résultats :

L'interprétation des résultats des analyses réalisée avec l'aimable collaboration de l'équipe technique du laboratoire CETIM montre :

a- Concernant les analyses chimiques effectuées par fluorescence X :

On note, la prédominance de la silice sous forme d'oxyde (SiO_2) avec 49.90% et de la calcite sous la même forme (CaO) avec 19.85 % et enfin les autres composés généralement présents dans les argiles.

Donc d'après les résultats des analyses chimiques, on peut dire qu'on a une prédominance des minéraux calcaire marneux (Quartz et Calcite), ainsi que les minéraux argileux Na_2 (1.23%).

b- Cette interprétation peut être confirmée sur le Diffractogramme (d'après la loi de Bragg).

Sur l'axe des abscisses qui représente : l'angle de diffraction ($^{\circ}2$ Theta).

Sur l'axe des ordonnées qui représente : l'Intensité des pics

Donc sur le Diffractogramme, on voit les pics qui ressortent et qui individualisent les formes d'argiles (Illite, Kaolinite). Pratiquement tous les pics correspondent au Quartz, l'Illite et la Kaolinite.

C'est donc d'après l'interprétation du Diffractogramme qui vient pour compléter les analyses chimiques élémentaires, qu'on peut dire qu'on a à faire aux argiles (Illite et Kaolinite), qui prédominent selon les pics. Sans oublier les pics de calcite correspondant aux passages de minéraux de calcaire marneux qu'on a vu dans les résultats des analyses chimiques élémentaires.

2- Caractérisation des matériaux utilisés :

Pour l'élaboration de notre éco-mortier, les matériaux de base utilisés sont :

- chaux aérienne ;
- sable ;
- des déchets de briques broyés finement ;
- eau.

Dans la panoplie des essais qui peuvent être effectués sur ces matériaux de base, nous avons fait un choix en fonction des caractéristiques essentielles, mais aussi en fonction du matériel de mesure disponible.

2-1 Chaux :

La chaux utilisée, est la chaux aérienne produite par la société BCMC : Berriane Chaux et Matériaux de Construction. (Wilaya de Ghardaia).



a- La chaux en sac



b- La chaux en poudre

Figure III.3 : La chaux aérienne utilisée

Les essais de caractérisation effectués sur la chaux sont :

- **Masse volumique absolue :**

La densité de la chaux a été déterminée selon la norme EN 196, à l'aide du densimètre Le Chatelier en utilisant le benzène (liquide non réactif). Il s'agit d'un récipient composé d'un ballon surmonté d'un renflement puis d'un col étroit gradué. Le benzène est introduit en premier jusqu'au zéro (V1), le tout est pesé (M1), on introduit après la chaux (environ 60 g), on chasse les bulles d'air et on note (V2). Le tout est pesé (M2) :

$$\rho_s = \frac{M2 - M1}{V2 - V1}$$



Figure III.4 : Densimètre le Chatelier

- **Masse volumique apparente :**

La masse volumique a été déterminée conformément à la norme NF EN 196-1. En utilisant un entonnoir porté par un trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile, placé au-dessus d'un récipient calibré de 1 litre.



Figure III.5 : l'appareillage de la masse volumique apparente

- **Surface Spécifique Blaine :**

La surface spécifique Blaine a été déterminée conformément à la norme NF EN 196-6, par la méthode de perméabilité à l'air, en observant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de chaux compacté dans la cellule du perméabilimètre de Blaine.

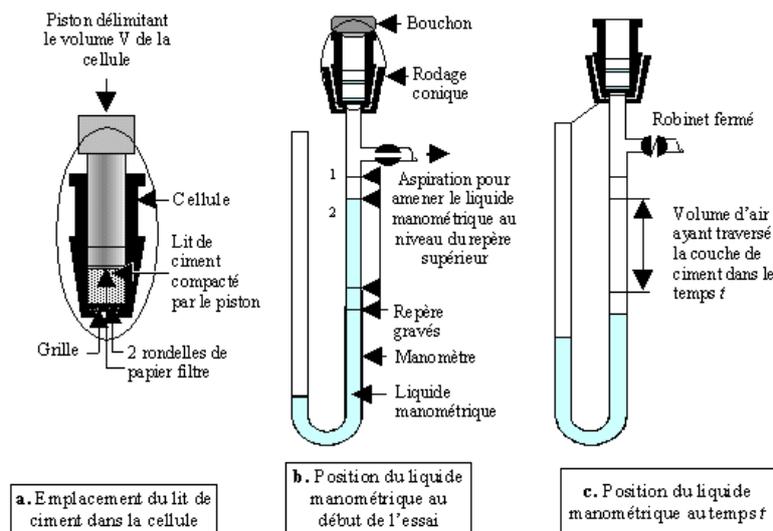


Figure III.6 : Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine
(www.la.refer.or/materiaux)

- *Conduite de l'essai :*

Le liant hydraulique dont on désire mesurer la surface spécifique doit être à porosité constante (égale à 0.500).

- Méthode : peser à 0.01 g près, une masse m de liant telle que, compte tenu de son volume V après tassement dans la cellule, sa porosité soit égale à 0.500.

- La masse de matière à prendre s'écrit : $m = (1 - e) P_v$.

ρ = masse volumique

V = volume utile de cellule

Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier filtre.

Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.

Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre.

Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.

Retirer le piston lentement (il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).

Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur. Enduire de vaseline la partie ronde de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline ; veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.

L'arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.

Noter le temps écoulé t ainsi que la température de la pièce.

Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps.

La surface spécifique est calculée par la formule :

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot t}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

S : Surface spécifique (cm^2/g).

k : Constante de l'appareil.

e : Porosité de la couche tassé.

t : Temps mesuré en secondes.

ρ : Masse volumique (g/cm^3).

η : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

Chapitre III : Procédures expérimentales et caractérisation des matériaux

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : résultats de la caractérisation de la chaux

Masse volumique absolue (Kg/m ³)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Surface Spécifique Blaine (g/cm ²)
2550	468	14000.9

2-2 Sable :

Nous avons utilisé un sable 0/2 de la Carrière de Didouche Mourad (wilaya de Constantine).

Les essais effectués sur ce sable sont :

- **L'analyse granulométrique :**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs. Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules 5, 3.15, 2.5, 2, 1.25, 0.63, 0.315, 0.2, 0.125, 0.08. L'essai a été réalisé selon la norme NF EN 933-1.

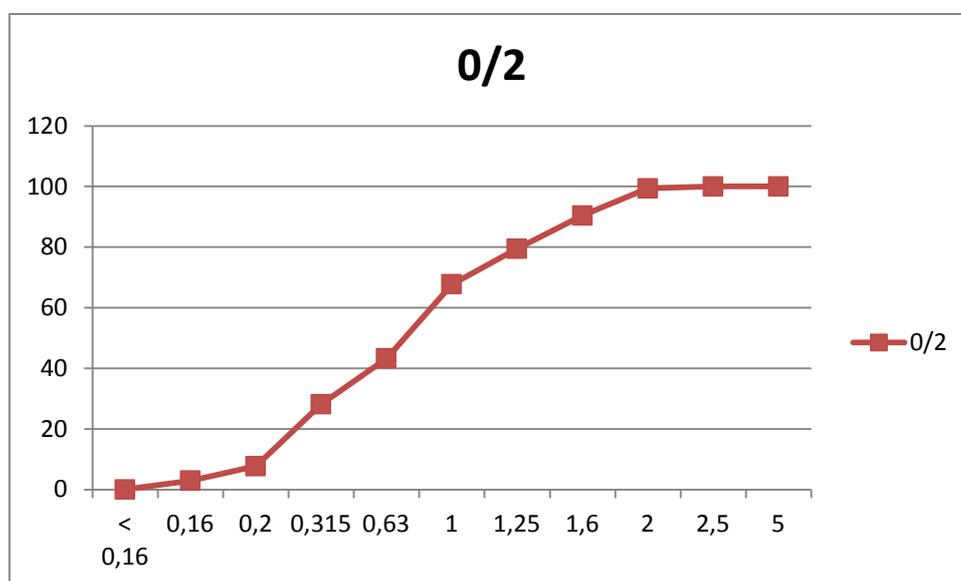


Figure III.7: Courbe granulométrique du sable

- **Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume y compris les vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3.

L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique par le rapport :

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ g/cm}^3$$

La valeur de la masse volumique apparente du sable utilisé est indiquée dans le tableau 3.3 qui suit. C'est la moyenne arithmétique de 3 mesures.

- **Masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue est la masse d'un corps par unité de volume sans vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3.

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte, si la matière est hydraulique, sinon, dans de l'eau.



Figure III.8 : la masse volumique absolue du sable

La valeur obtenue pour la masse volumique absolue du sable indiquée également dans le tableau 3.3 qui suit.

- **Equivalent de sable (Mesure de la propreté) :**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons et des mortiers. L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci selon la norme NF EN 933-8.



Figure III.9 : l'essai d'équivalent de sable

Tableau III.3 Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX¹

ES	Nature et qualité du sable
< 60	« Sable argileux » risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
$60 \leq ES < 70$	« Sable légèrement argileux » de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	« Sable propre » à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$ES > 80$	« Sable très propre » l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Pour notre sable, $Es = 71$. Cette valeur convient pour l'élaboration des éco-mortiers envisagés.

- **Module de finesse :**

La norme XP P 18-540 définit le module de finesse d'un sable, qui caractérise sa granularité, comme le $\frac{1}{100}$ de la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0 mm.

Le module de finesse du sable utilisé est $Mf = 2.5$ (tableau III.4).

¹ G.Dreux et J. Festa . « Nouveau guide du béton et de ses constituants » ». Edition Eyrolles. 8^{ème} édition.416 pages. 1998. France.

Les résultats des essais de caractérisation du sable sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Résultats de la caractérisation physique du sable

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Equivalent de sable	Module de finesse
1440	2600	69	2.5

2-3 Déchets de brique :

On a utilisé des déchets de brique creuses de la briqueterie de Boumaiza dans wilaya de Skikda (capacité de production 35000 m²), qu'on a finement broyé :

- dans un broyeur à boulets pour obtenir une première finesse (figure III.11 a).
- dans un broyeur à moulin pour obtenir une seconde finesse (figure III.11 b).



a- Broyeur à boulet



b- Broyeur à moulin

Figure III.10 : Broyeurs utilisés



a- Déchets de brique broyé avec un broyeur à boulet



b- Déchets de brique broyé avec un broyeur à moulin

Figure III.11 : Déchets de brique finement broyés

Chapitre III : Procédures expérimentales et caractérisation des matériaux

Les essais de caractérisation sont les mêmes que pour la chaux, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Caractéristiques des déchets de briques utilisés

Déchets de brique	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Surface Spécifique Blaine (cm ² /g)
B1	2710	1103	1704
B2	2710	871.66	5454

Avec : B1 : déchets de brique broyé avec un broyeur à moulin (figure a- III.11).

B2 : déchets de brique broyé avec un broyeur à boulet (figure b-III.11).

2-4 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du mortier provient du réseau public de distribution d'eau potable. Son potentiel d'hydrogène (ph) est autour de 7 (mi acide, mi base).

3- Formulation du mortier :

Le dosage des différents constituants du mortier de chaux a été déterminé d'après les anciennes formulations d'époque (Vitruve), ainsi que des récents travaux sur le sujet¹. Ce qui nous a fait opter pour le mélange : 3 volumes de sable pour un volume de chaux. Le mortier a été confectionné avec la méthode traditionnelle (à la truelle).

Pour connaître l'effet des déchets de brique sur les propriétés des mortiers, nous avons procédé à des substitutions de la chaux par les déchets de briques broyés. La formulation composée uniquement de chaux et de sable est considérée comme la formulation de base, et appelée B.

¹ M.R.Labiadh, M.ben Ouezdou, R.El Mensi. « Propriétés physico-mécaniques de mortiers d'enduit de restauration à base de chaux aérienne et pouzzolanes artificielles ». 5^{ème} congrès arabe des sciences des matériaux ACMS V. Gabès, Tunisie 2007.

Tableau III.6 : Formulation de mortier d'enduit à base de chaux

Composition	Sable (volume)	Chaux (volume)	Substituant (volume)	Eau (volume)
Mortiers				
MF1	3	0.9	0.1	1.25
	3	0.8	0.2	1.25
	3	0.7	0.3	1.25
MF2	3	0.9	0.1	1.25
	3	0.8	0.2	1.25
	3	0.7	0.3	1.25
Formulation de base (M)	3	1	/	1.25

4- Essais sur mortier frais :

4-1 La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un mortier frais est déterminée par le quotient de sa masse par le volume qu'il occupe lorsqu'il est introduit, ou introduit et compacté, d'une manière prescrite dans un récipient de mesurage d'une capacité donnée.

Selon la norme NBN EN 1015-6, le mode opératoire dépend de la valeur d'étalement :

Tableau III.7 : Mode opératoire et valeur d'étalement des mortiers

Consistance d'utilisation	Valeur d'étalement	Mode opératoire
Mortier raide	< 140 mm	La méthode de vibration
Mortier plastique	Entre 140 et 200 mm	La méthode des chocs
Mortier fluide	> 200 mm	La méthode de remplissage

- **La méthode de vibration :**

Le récipient est rempli et placé sur une table vibrante jusqu'à ce qu'aucun tassement ne puisse être observé.

- **La méthode des chocs :**

Le récipient est rempli jusqu'à mi-hauteur. Pour compacter le mortier, le récipient est basculé pendant environ 30 min et laissé tomber 10 fois sur un socle rigide (5 fois si présence d'adjuvants entraîneurs). Après remplissage du récipient jusqu'au bord, le mortier est compacté de même manière.

- **La méthode de remplissage :**

Le récipient est rempli par écoulement du mortier jusqu'au bord et arasé.

4-2 L'étalement à la table secousse :

La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses. Selon la norme NBN EN 1015-3, le moule est rempli en deux couches compactées par au moins 10 coups brefs de dame. La surface libre du disque doit être propre et sèche. Au bout de 15 s, le moule est soulevé lentement et verticalement. 15 secousses à la table sont imprimées à une fréquence constante d'environ 1 secousse par seconde.

Le diamètre dans deux directions perpendiculaires est mesuré et exprimé à 1 mm près.



Figure III.12 : Etalement du mortier élaboré sur la table à secousse

4-3 Mesure de l'air occlus :

Avec un appareillage spécifique, l'aéromètre, on peut déterminer la teneur en air des mortiers selon la norme NF P18-353. Le principe est de remplir un volume déterminé de mortier. On met en pression le récipient hermétiquement. On met en contact les deux récipients et on accède directement à la valeur de la teneur en air occlus. La masse de l'air occlus s'effectue juste après la fin du malaxage¹.

L'appareil de mesure est constitué d'un réservoir de forme évasée dans lequel on compacte le mortier. Le couvercle, muni d'un tube gradué et d'un manomètre, est fixé hermétiquement sur le réservoir. De l'eau est introduite dans le tube jusqu'au repère 0. Une pression est alors appliquée à l'aide d'une petite pompe manuelle. Le pourcentage de l'air occlus est lu directement sur le tube gradué.

¹ C.Amouri. Mémoire de doctorat « contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires », 2009. Université de Constantine.



Figure III.13 : aéromètre à mortier utilisé

4-4 Mesure du temps de prise :

L'objectif de l'essai est de définir pour chaque formulation de mortier, un temps qui soit significatif de la rapidité de prise. Lorsque l'essai a lieu sur *mortier normal*, il est gouverné par la norme NF P15-431. L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat, mais surchargé par une masse additionnelle de 700 g. l'aiguille de 1.13 mm de diamètre qui pénètre le mortier est alors soumise à une charge de 1000 g.

- *Conduite de l'essai :*

Après la confection du mortier, il est introduit dans un moule tronconique posé sur une plaque, sans tassement ni vibration excessifs ; il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule ; puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale. Le début de prise est défini comme le moment où l'aiguille cesse de s'enfoncer sous l'effet de ce chargement et s'arrête à une distance d du fond du moule de 2.5 mm.¹

Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm.

¹ R. Dupain, R. Lanchon, J-C. Saint-Arroman. « Granulat, Sols, Ciments et bétons. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », éditions : CASTEILLA, Paris, 2000. P 126.



Figure III.14 : Mesure du temps de prise (Appareil de Vicat)

5- Essais sur mortier durci :

5-1 Résistance à la traction par flexion :

Les essais sont conduits conformément à la norme NF P18-407. Les éprouvettes soumises à cet essai sont des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm. Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points.



Figure III.15 : Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes 4x4x16 cm

5-2 Résistance à la compression :

La détermination de la résistance à la compression du mortier a été effectuée selon la norme NF P18-406. Chaque éprouvette donne un résultat de flexion et deux de compression. Chaque résistance à la compression correspond à la moyenne de six mesures.

- *Conduite de l'essai :*

- Mettre les demi-prismes en compression sur les faces latérales de moulage à l'aide de l'appareil normalisé.
- Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.



Figure III.16 : Presse pour l'essai de compression

5-3 Essai d'absorption d'eau par capillarité :

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité dénommé couramment « Sorptivity » en langue anglaise et traduit en langue française par « Sorptivité » ou encore « Absorptivité » est un coefficient qui traduit le mouvement de l'eau dans les matériaux poreux à travers les pores ou capillaires. Le transfert d'agents agressifs à travers ces capillaires peut affecter les performances de ces matériaux.

Dans ce travail, les essais d'absorption d'eau par capillarité ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques 4 cm x 4cm x 16 cm préalablement séchées dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Elles ont été placées sur des supports adéquats (non absorbants) dans un bac à eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau afin de respecter un niveau d'immersion partiel constant de 5 mm (figure III.17). Les éprouvettes d'essai ont été par ailleurs couvertes d'un film en plastique pour assurer une remontée d'eau unidirectionnel et pour empêcher l'échange hydrique avec le milieu ambiant.

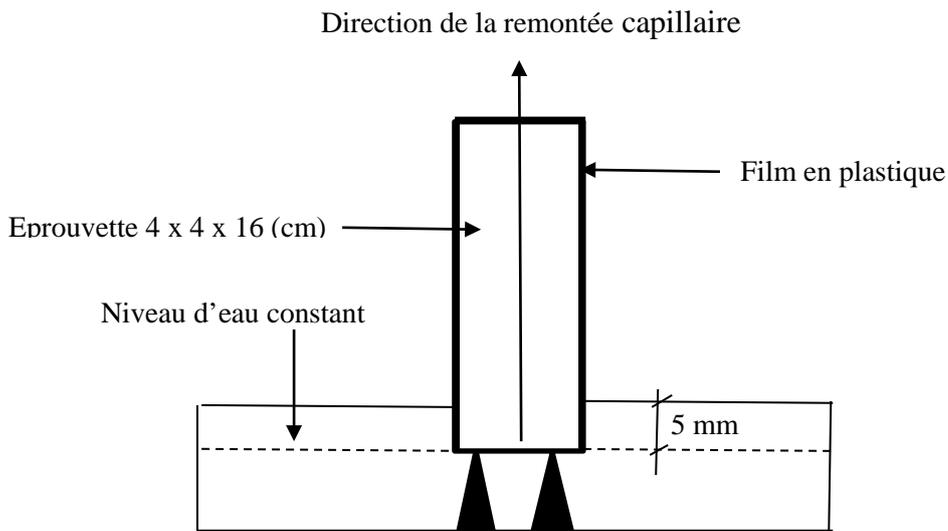


Figure III.17 : Schéma du dispositif expérimental

La sorptivité est déterminée par le modèle mathématique développé par Hall et al¹. C'est en fait la pente de la droite de la courbe caractérisant l'évolution du volume d'eau absorbée par capillarité dans les premiers moments de l'essai en fonction de la racine carrée du temps. L'expression s'écrit :

$$i = S\sqrt{t}$$

i : Taux d'absorption d'eau (mm^3/mm^2). Il a la dimension d'une longueur et correspond au volume cumulé absorbé par unité de surface absorbante.

S : Sorptivité du matériau ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$).

5-4 Essai d'absorption d'eau par immersion totale :

L'essai consiste à déterminer la capacité (C) des mortiers d'étude à absorber l'eau après immersion totale des éprouvettes d'essais dans un bac d'eau jusqu'à saturation.

- **Conduite de l'essai**

Trois éprouvettes d'essais 4 cm x 4 cm x 16 cm de chaque composition ont été préparées et conservées, après démoulage, à l'air libre pendant 28 jours. Elles ont été ensuite étuvées à 105°C jusqu'à masse constante puis immergées complètement dans l'eau jusqu'à masse constante.

¹Hall C, Kam-Ming Tse T. Water movement in porous building materials-VII. The sorptivity of mortars. Build Environ 1986;21(2): 113-8.

Chapitre III : Procédures expérimentales et caractérisation des matériaux

La masse totale de l'eau absorbée est alors évaluée en fonction de la masse de l'éprouvette sèche suivant l'expression suivante :

$$C(\%) = \frac{M_{\text{saturée}} - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{sèche}}} \times 100$$

5-5 Essai d'ultrasons :

Il s'agit d'un essai non destructif dont le principe est de générer des ultrasons via un transducteur d'émission. Le transducteur de réception reçoit le signal au bout d'un certain temps.

Le temps de propagation mesuré permet de calculer la vitesse de propagation à l'intérieur du matériau. Dans un matériau continu dont on connaît le coefficient de Poisson, cette vitesse ne dépend que du module élastique, qui définit le comportement et les caractéristiques mécaniques du matériau.

Dans un matériau fissuré outre les diminutions de vitesse de propagation qui montrent une dégradation du matériau, l'analyse en fréquence du signal permet de déterminer une fissuration du matériau et dans des géométries particulières mais courantes, la largeur de ces fissures.

On obtient ainsi une très bonne « image » du matériau ausculté.

La mesure de la vitesse du son permet également d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante lorsqu'il faut contrôler la régularité du béton d'un élément d'un ouvrage, ou par exemple, suivre l'évolution d'un béton dans le temps. Elle permet notamment de donner des indications sur les dommages dus au gel ou au feu. Les mesures ultrasoniques peuvent être interprétées selon les critères décrits dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.8 : Corrélation entre la vitesse du son et la qualité du béton

Vitesse du son (m/s)	Application de la qualité
>4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

Chapitre III : Procédures expérimentales et caractérisation des matériaux

Le dispositif de mesure est un générateur d'ultrasons connecté à deux transducteurs à ondes dont un émetteur et un récepteur (figure III.18). Les deux transducteurs sont couplés d'une façon alignée sur deux surfaces parallèles de l'échantillon. Il est important d'avoir un contact adéquat entre le béton et la face de chaque transducteur. Le contact acoustique transducteur / échantillon est assuré en utilisant de la vaseline et en appuyant le transducteur contre la surface en béton. Une impulsion ultrasonique (supérieure à 20 kHz) d'ondes longitudinales est émise par l'émetteur et reçue à la surface opposée par le récepteur. L'appareil mesure le temps de transit de l'impulsion. Pour un matériau élastique, la relation entre la vitesse d'impulsion longitudinale, les constantes élastiques et la masse volumique du béton sert à déterminer le module d'élasticité dynamique :

$$E = \left(\frac{L}{t} \right)^2 \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

Où E est le module d'élasticité, L la distance entre deux transducteurs, t le temps d'impulsion, ρ la masse volumique du béton, on prendra $\rho =$ masse volumique réelle de l'éco-mortier d'étude, et ν le coefficient de Poisson, on prendra $\nu = 0.3$, valeur usuelle pour les mortiers.



Figure III.18 : Appareil à ultrasons utilisé : controls modèle 58-E0048 avec fréquence de 54 kHz (Du laboratoire d'Hydraulique et de Génie Civil de l'université de Guelma)

Conclusion :

La capacité des enduits à base de chaux aérienne à répondre aux caractéristiques des murs anciens n'est plus à démontrer, mais la compatibilité entre le support et les enduits est primordiale, car elle permet de pérenniser le patrimoine bâti.

Dans ce chapitre on a analysé un échantillon d'un mortier déjà existant, le résultat a démontré qu'il est constitué principalement d'argile. Ce résultat donne encore plus de signification à l'utilisation de déchets de briques, qui à la base sont utilisés comme tuileau pilé pour avoir le caractère pouzzolanique suivant les anciennes recettes Romaines ; ainsi que pour l'insertion dans la nouvelle orientation économique et écologique dans le domaine de construction, qui se veut de réutiliser des déchets de matériaux de construction pour la confection de nouveaux produits.

Ce chapitre a été consacré à la caractérisation des différents matériaux utilisés pour la réalisation des sept formulations de mortier qu'on a confectionné de manière traditionnelle.

Pour apprécier les caractéristiques des déchets de brique, nous avons procédé à des essais physiques et mécaniques, qu'on a soigneusement expliqués avec leur mode opératoire. Les résultats seront exposés et analysés dans le chapitre suivant.

Chapitre -IV-

Résultats et discussions

Introduction :

Dans ce chapitre nous exposons les résultats d'essais réalisés sur les éco-mortiers étudiés.

Les procédures d'essais ont été exposées dans le chapitre III qui a précédé. Il s'agira des essais suivants :

- Masse volumique apparente,
- Consistance du mortier frais,
- Temps de prise,
- Air occlus,
- Résistance à la traction,
- Résistance à la compression,
- Capacité d'absorption d'eau par capillarité,
- Capacité d'absorption totale d'eau par immersion,
- Auscultation à l'ultrason.

1- Résultats des essais de caractérisation sur mortier frais :

1-1 Masse volumique apparente :

Nous présentons dans le tableau IV.1 qui suit, les masses volumiques des mortiers d'étude avec les deux finesses des déchets de brique incorporés et les différents taux de substitution.

Tableau IV.1 : Masse volumique apparente des éco-mortiers

Formulations	Taux de substitution %	Masse volumique (kg/m ³)
M	0	1874
MF1	10	1909
	20	1904
	30	1915
MF2	10	1886
	20	1899
	30	1925

M : mortier de base (de référence).

MF1 : mortier avec déchets de brique de finesse F1.

MF2 : mortier avec déchets de brique de finesse F2.

Chapitre IV : Résultats et discussions

La figure IV.1 illustre l'effet du taux de substitution des déchets de brique sur la masse volumique des mortiers d'étude (Mv).

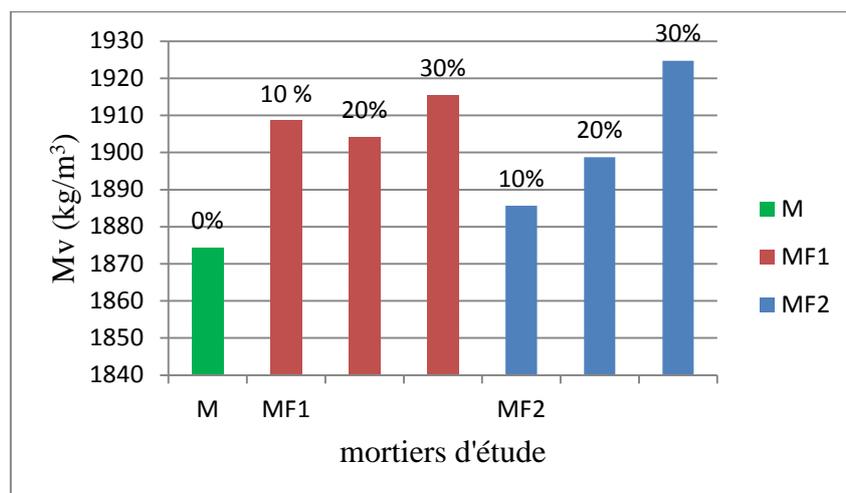


Figure IV.1 : Effet de la substitution des déchets de brique sur la masse volumique apparente

On peut noter que les deux finesses adoptées (F1 et F2) induisent une augmentation des masses volumiques apparentes dans les mortiers élaborés, une densification du mortier de référence.

Le taux de déchets de brique mis en œuvre a une influence positive sur la masse volumique des mortiers étudiés. Cette influence est progressive dans le cas des déchets de finesse F2 puisque les Mv obtenues sont quasi proportionnelles aux taux de brique. Pour le cas des déchets de brique de finesse F1, l'influence est également manifeste sauf que la proportionnalité n'est pas évidente puisque : $Mv(10\%) > Mv(20\%) < Mv(30\%)$ et $Mv(10\%) < Mv(30\%)$.

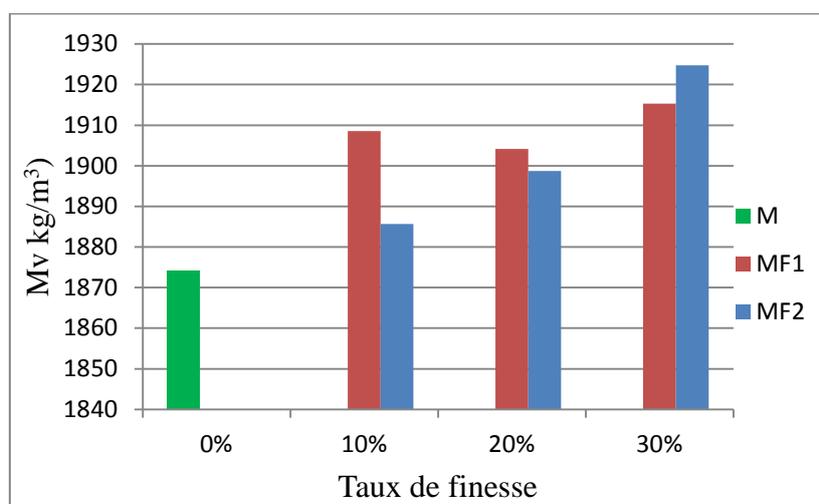


Figure IV.2 : Effet de la finesse des déchets de brique sur la masse volumique apparente

Chapitre IV : Résultats et discussions

La figure IV.2 illustre l'effet de la finesse des déchets de brique sur les masses volumiques apparentes des mortiers étudiés. Les déchets de brique de plus grandes finesesses que la sable, s'introduisent dans ses vides intergranulaires pour rendre le mortier plus compact et par conséquent plus dense.

1-2 Consistance :

Nous présentons dans le tableau IV.2 qui suit, les consistances mesurées à l'aide de la table à secousses, des mortiers d'étude avec les deux finesesses des déchets de brique incorporés et les différents taux de substitution.

Tableau IV.2 : Consistance des éco-mortiers

Formulations	Taux de substitution %	Étalement (mm)
M	0	225
MF1	10	232
	20	237
	30	242
MF2	10	238
	20	243
	30	238

Les résultats du tableau ci-dessus montrent que tous les mortiers élaborés sont fluides (> 200 mm). La figure IV.3 présente l'effet des taux de substitution des déchets de brique sur la consistance des éco-mortiers étudiés.

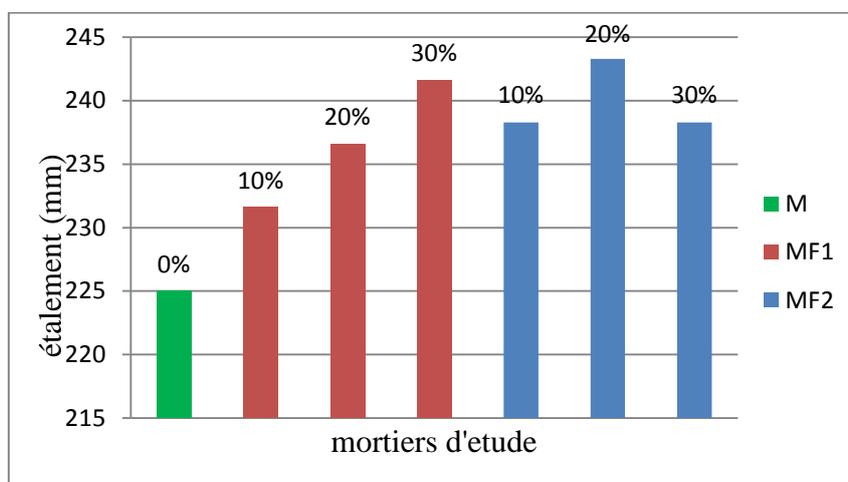


Figure IV.3 : Effet de la substitution des déchets de brique sur la consistance

Chapitre IV : Résultats et discussions

Globalement on peut dire que les mortiers élaborés appartiennent à la même famille d'étalement (mortiers fluides). L'ajout des déchets de brique a augmenté la maniabilité de tous les éco-mortiers élaborés, cela peut s'expliquer par l'affinité des argiles avec l'eau. On remarque que pour la finesse F1, l'augmentation du taux de substitution entraîne une augmentation de maniabilité, ce qui n'est pas le cas pour la finesse F2 pour laquelle on note un taux maximum pour 20% de substitution.

La figure IV.4 ci-dessous illustre les variations des valeurs des étalements à la table à secousses en fonction du taux de déchets de brique mis en œuvre.

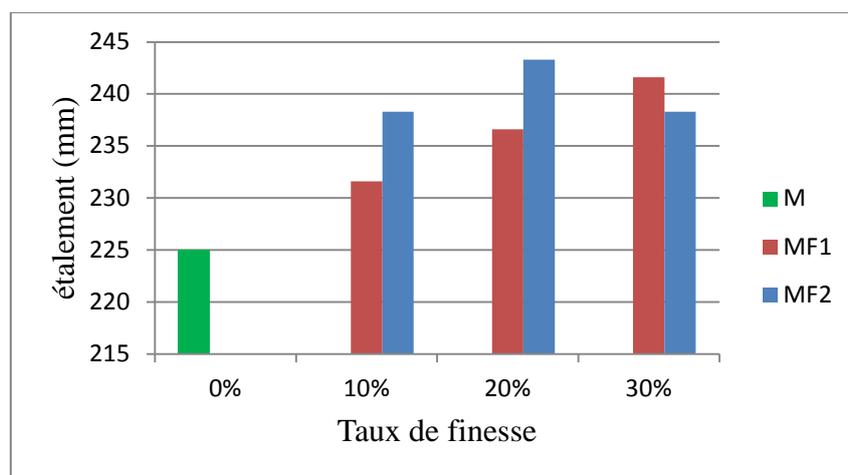


Figure IV.4 : Effet de la finesse des déchets de brique sur la consistance

On peut remarquer la quasi-proportionnalité entre les deux paramètres en ce qui concerne les éco-mortiers avec déchets de brique de finesse F1. Ceci n'est pas le cas pour les éco-mortiers avec déchets de brique de finesse F2 où un pic d'étalement semble apparaître pour 20% de substitution.

1.3 Temps de prise :

L'estimation de l'apport des déchets de briques en fonction des proportions de substitution sur le temps de prise, ainsi que de leur finesse a été effectuée à l'aide de l'essai Vicat, ce qui nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans le tableau IV-3. Les résultats obtenus ont été comparés à leurs tours à ceux de la formulation de base.

Tableau IV.3 : Début et fin de prise des éco-mortiers

Mortiers	Taux de substitution (%)	Début de prise (heure)	Fin de prise (heure)
M	0	50h00	120h04
MF1	10	45h33	91h36
	20	45h41	90h42
	30	44h47	96h00
MF2	10	46h21	92h52
	20	47h00	89h51
	30	45h41	91h30

On peut remarquer que la substitution de la chaux par les déchets de brique est assez significative sur l'accélération du temps de début ainsi que de fin de prise des éco-mortiers.

Concernant le début de prise, on peut noter un pic pour les éco-mortiers élaborés avec 20% de substitution, aussi bien avec les déchets de brique 20MF1 qu'avec 20MF2 :

Avec 20MF1 : pic à 45h41mn.

Avec 20MF2 : pic à 47h00mn.

Ces résultats nous semblent insuffisants pour aboutir à une conclusion pertinente. Il est donc nécessaire de prolonger cette investigation afin de pouvoir expliquer ces résultats expérimentaux.

Concernant la fin de prise, elle est plus rapide pour les éco-mortiers élaborés avec 20% de substitution aussi bien avec les déchets de brique 20MF1 qu'avec 20MF2, ce qui prouve qu'il existe une proportion optimale de substitution. Plus la quantité de déchets augmente, plus la quantité d'eau contenue dans les pores de ces derniers est grande, retardant ainsi la prise de la chaux. La diffusivité du CO₂ est plus rapide dans l'eau et dix fois plus faible que dans l'air (décalcification).^{1, 2, 3}

1.4 Pourcentage de l'air occlus :

Nous présentons dans le tableau IV.5 qui suit, les valeurs de l'air occlus mesurées à l'aide de l'aéromètre à mortier des différents mortiers d'étude préparés traditionnellement à la main, avec les deux finesses des déchets de brique incorporés et les différents taux de substitution (10%, 20%, 30%).

¹M.R. Labiadh, M. ben Ouedou, R. El Mensi. « Propriétés physico-mécaniques de mortiers d'enduit de restauration à base de chaux aérienne et pouzzolanes artificielles ». 5^{ème} congrès arabe des sciences des matériaux ACMS V. Gabès, Tunisie 2007.

²R. Cerný, A. Kunca, V. Tydliat, J. Drchalová, and P. Rovnanyková, "Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters", *Construction and Building Materials*, N° 20, 2006, pp. 849-857.

³S. Sanchez-Moral, L. Luque, J.C. Canveras, V. Soler, J. Garcia-Guinea, A. Aparicio, « Lime pozzolana mortars in Roman catacombs : composition, structures and restoration, *Cement and Concrete Research*, N°35, 1555-1565, 2005.

Tableau IV.4 : Pourcentage de l'air occlus des éco-mortiers

Formulations	Taux de substitution (%)	Air occlus (%)
M	0	2.9
MF1	10	3.1
	20	2.9
	30	3.6
MF2	10	2.6
	20	3.5
	30	2.7

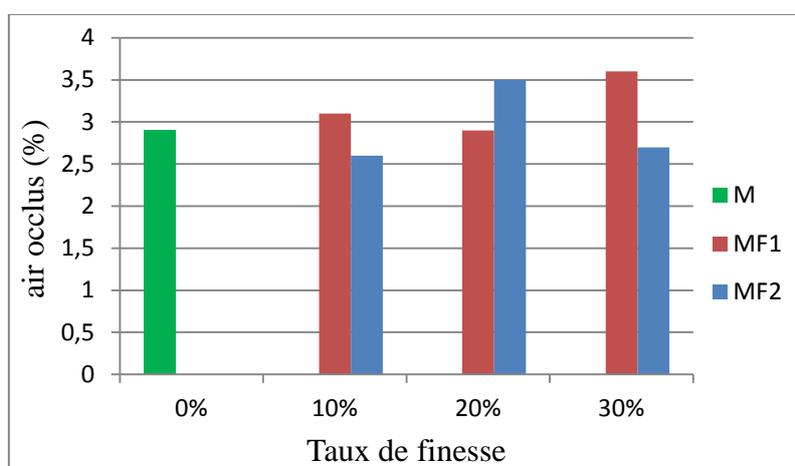


Figure IV.5 : Effet de la finesse des déchets de brique sur l'air occlus

Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau IV.4 et par les histogrammes de la figure IV.5 tendent à prouver que :

- Pour les mortiers avec finesse F2 (5454 cm²/g), l'air occlus diminue sauf pour le taux de 20 %.
- Pour les mortiers avec finesse F1 (1704 cm²/g), l'air occlus est augmenté pour tous les taux de substitution, ce qui est avantageux pour les propriétés isolantes des enduits.

2- Résultats des essais de caractérisation sur mortier durci :

2-1 Résistance à la traction par flexion (28 jours) :

Le tableau IV.5 et la figure IV.6 illustrent les résultats des essais d'écrasements des éprouvettes des mortiers étudiés.

Tableau IV.5 : résistance à la traction par flexion 28 jours des éco-mortiers

Formulations	taux de substitution (%)	Resistance à la traction (MPa)
M	0	0,29
MF1	10	0,28
	20	0,28
	30	0,28
MF2	10	0,29
	20	0,28
	30	0,27

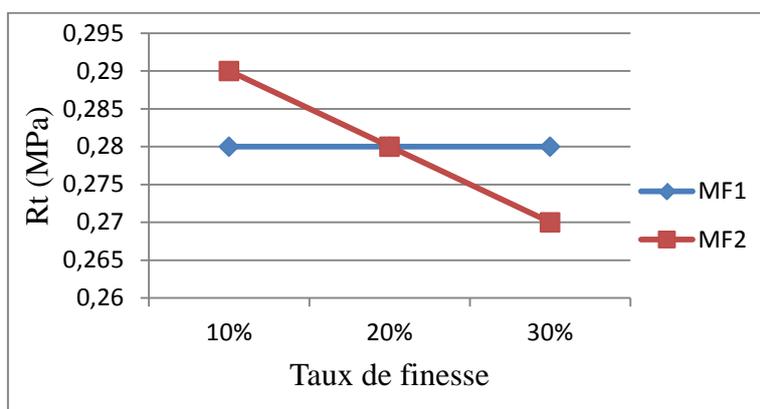


Figure IV.6 : Effet de la finesse des déchets de brique sur la résistance à la traction par flexion

Le taux de substitution ainsi que les finesses des déchets de briques mis en œuvre ne semblent pas affecter les résistances mécaniques à la traction des éco-mortiers élaborés.

2-2 Résistance à la compression (28 jours) :

Le tableau IV.6 et la figure IV.7 illustrent les résultats des essais d'écrasements des éprouvettes des mortiers étudiés.

Tableau IV.6 : résistance à la compression 28 jours des éco-mortiers

Formulations	taux de substitution (%)	Resistance à la compression (MPa)
M	0	1.03
MF1	10	0.65
	20	0.69
	30	0.62
MF2	10	0.78
	20	0.80
	30	1.00

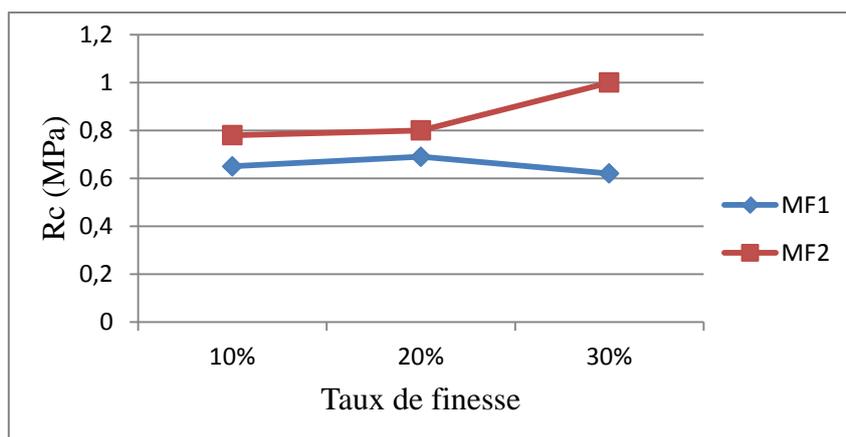


Figure IV.7 : Effet de la finesse des déchets de brique sur la résistance à la compression

Les résultats expérimentaux montrent que :

Les résistances à la compression régressent pour tous les taux de substitution des déchets de brique, cependant cette régression est plus significative dans le cas de la finesse F1.

Par ailleurs on a noté que les résistances à la compression sont quasi constantes et sont égales à 0.65 ± 0.04 MPa pour la finesse F1 des déchets de briques. Ceci n'est pas le cas des éco-mortiers avec déchets de briques de finesse F2, les résistances à la compression augmentent avec le taux de substitution.

Nous avons, à travers les résultats expérimentaux établi les rapports entre les résistances mécaniques à la compression et à la traction des éco-mortiers élaborés (voir tableau VI.7). Les rapports obtenus sont variables en raison de la variation dans les résistances à la compression, les résistances à la traction étant pratiquement constantes et sont en moyenne égales à 0.28 MPa.

Tableau IV.7 : rapport de Rc/Rt

Formulations	taux de substitution (%)	Resistance à la compression (Mpa)	Resistance à la traction (Mpa)	Rc/Rt
M	0	1.03	0.29	3.55
MF1	10	0.65	0.28	2.32
	20	0.69	0.28	2.46
	30	0.62	0.28	2.21
MF2	10	0.78	0.29	2.68
	20	0.8	0.28	2.85
	30	1	0.27	3.70

2.3 Absorption d'eau par immersion totale :

Le tableau IV.8, et la figure IV.8 illustrent la capacité d'absorption totale d'eau des éco-mortiers élaborés. Les résultats montrent une augmentation de la capacité d'absorption pour tous les taux de déchets de briques par rapport au mortier de référence (M), ce qui confirme l'affinité de l'argile contenue dans les déchets de briques avec l'eau.

Tableau IV.8 : capacité d'absorption totale des éco-mortiers

Formulations	Taux de substitution (%)	Capacité d'absorption totale d'eau (C_{abs}) (%)
M	0	14.09
MF1	10	15.34
	20	15.28
	30	14.89
MF2	10	15.03
	20	14.77
	30	14.36

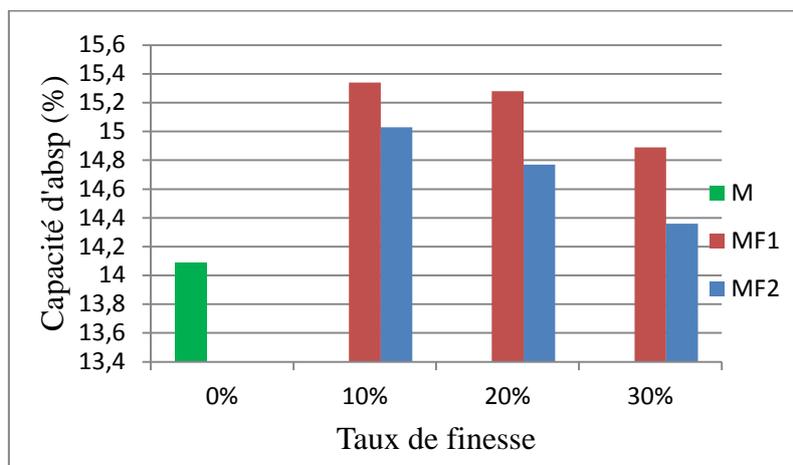


Figure IV.8 : Effet de la finesse des déchets de brique sur la capacité d'absorption totale d'eau

On remarquera que les éco-mortiers élaborés avec la finesse F1 (1704 cm^2/g) présentent les plus grandes capacités d'absorption d'eau. De même qu'on note l'existence d'une proportionnalité inverse entre C_{abs} et les taux de déchets de brique mis en œuvre. Plus le taux de déchets augmente et plus C_{abs} diminue sans atteindre la valeur de C_{abs} du mortier de référence. Par ailleurs, la finesse joue un rôle significatif ; à taux égal, le C_{abs} des mortiers élaborés avec les déchets de brique les plus fins sont les plus importantes.

Chapitre IV : Résultats et discussions

2.4 Absorption d'eau par capillarité :

Le tableau IV.9 qui suit regroupe toutes les valeurs de la masse d'eau absorbée par unité de surface en contact de l'eau (i en cm^3/cm^2 ou gramme d'eau par cm^2 ou encore en désignant la profondeur de pénétration de l'eau).

Ce coefficient i est déterminé pour l'ensemble des sept compositions de mortiers sélectionnées pour ce travail. La formule qui suit nous a permis de déterminer ce coefficient pour les temps $t = 15, 30, 60, 120, 240$ et 1440 mn.

$$i = \frac{w}{A}$$

W étant le poids de l'eau cumulée et A la surface de l'éprouvette en contact avec l'eau (soit $4 \times 4 = 16 \text{ cm}^2$).

Tableau IV.9 : Masse d'eau cumulée absorbée (W) par unité de surface (A)

Mortiers	t (min)	W (g)				i (cm^3/cm^2) ou (g/cm^2)			
		0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
M	15	16.8	/	/	/	1.05	/	/	/
	30	23.43	/	/	/	1.46	/	/	/
	60	33.03	/	/	/	2.06	/	/	/
	120	45.79	/	/	/	2.86	/	/	/
	240	60.16	/	/	/	3.75	/	/	/
	1440	62.28	/	/	/	3.89	/	/	/
MF1	15	/	14.44	14.16	15.26	/	0.90	0.88	0.95
	30	/	20.29	19.63	20.83	/	1.26	1.22	1.30
	60	/	28.49	27.76	29.09	/	1.78	1.73	1.81
	120	/	39.66	39.27	41.15	/	2.47	2.45	2.57
	240	/	54.78	57.88	57.73	/	3.42	3.42	3.60
	1440	/	66.87	68.01	67.23	/	4.17	4.25	4.20
MF2	15	/	14.27	9.95	18.17	/	0.89	0.62	1.13
	30	/	19.89	14.83	23.37	/	1.24	0.92	1.46
	60	/	28.32	22.17	31.06	/	1.77	1.38	1.94
	120	/	39.6	32.87	42.15	/	2.47	2.05	2.63
	240	/	55.02	38.76	57.38	/	3.43	2.42	3.58
	1440	/	68.65	61.55	71.22	/	4.29	3.84	4.45

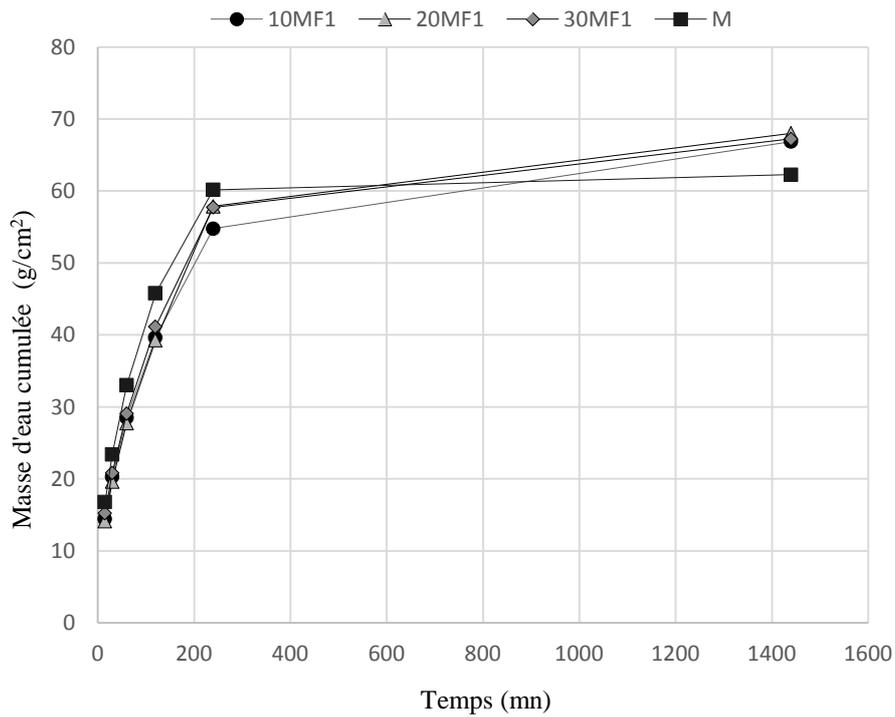


Figure IV.9 : cinétique d'absorption des mortiers avec déchets de brique de finesse F1= 1704 cm²/g

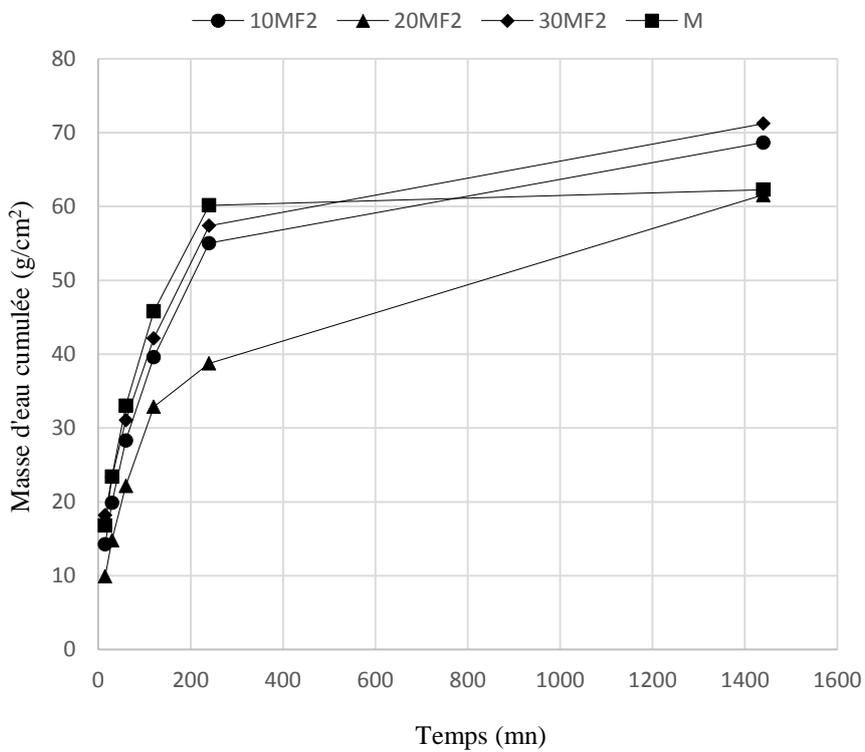


Figure IV.10 : cinétique d'absorption des mortiers avec déchets de brique de finesse F2= 5454 cm²/g

Chapitre IV : Résultats et discussions

Dans les figures IV.9 et IV.10 nous présentons l'évolution de cette absorption d'eau dans le temps, ce qui est communément appelé « la cinétique d'absorption ».

La figure IV.9 est relative aux mortiers avec déchets de brique de finesse F1 (=1704 cm²/g) avec les différents taux de déchets de brique mis en œuvre pour la confection de ces mortiers : 0% pour les mortiers de référence et 10, 20, et 30 % pour le reste des mortiers avec la finesse F1. La figure IV.10 est relative à la deuxième finesse F2 (= 5454 cm²/g) pour les mêmes taux de déchets de brique.

Les mesures ont été prises durant 1440 minutes, soit 24 heures. La masse d'eau absorbée est en évolution quasi-constante jusqu'à t= 240 mn (soit 4 heures) pour toutes les compositions. Au-delà, elle semble être freinée à cause de l'effet de la gravitation (cumul de la masse d'eau absorbée). Il faut noter que pour le mortier de référence (symbolisé par M sur les figures IV.9 et IV.10) a cessé d'absorber l'eau par succion capillaire à l'instant t=240 mn (ou 4 heures) non pas à cause de sa saturation mais en raison de l'équilibre atteint entre la force de capillarité (ascendante) et celle de la gravitation (descendante).

Cet équilibre a été atteint lorsque le mortier M a absorbé 60.16 g/cm², ce qui correspond à une hauteur d'éprouvette égale à 6.016 cm.

Afin de caractériser, en terme de sorptivité, les sept compositions de mortier, nous avons regroupé dans le tableau IV.10 les valeurs expérimentales puis nous avons tracé les figures IV.11 et IV.12 les courbes d'évolution de i (cm³/cm²) en fonction de la racine du temps (\sqrt{t} en $\sqrt{\text{mn}}$)

Tableau IV.10 : Masse d'eau cumulée (i) par la racine carrée du temps \sqrt{t}

Mortiers	\sqrt{t} (min) ^{1/2}	i cm ³ /cm ²			
		0%	10%	20%	30%
M	3.87	1.05	/	/	/
	5.47	1.46	/	/	/
	7.74	2.06	/	/	/
	10.95	2.86	/	/	/
	15.49	3.75	/	/	/
	37.94	3.89	/	/	/
MF1	3.87	/	0.90	0.88	0.95
	5.47	/	1.26	1.22	1.30
	7.74	/	1.78	1.73	1.81
	10.95	/	2.47	2.45	2.57
	15.49	/	3.42	3.42	3.60
	37.94	/	4.17	4.25	4.20
MF2	3.87	/	0.89	0.62	1.13
	5.47	/	1.24	0.92	1.46
	7.74	/	1.77	1.38	1.94
	10.95	/	2.47	2.05	2.63
	15.49	/	3.43	2.42	3.58
	37.94	/	4.29	3.84	4.45

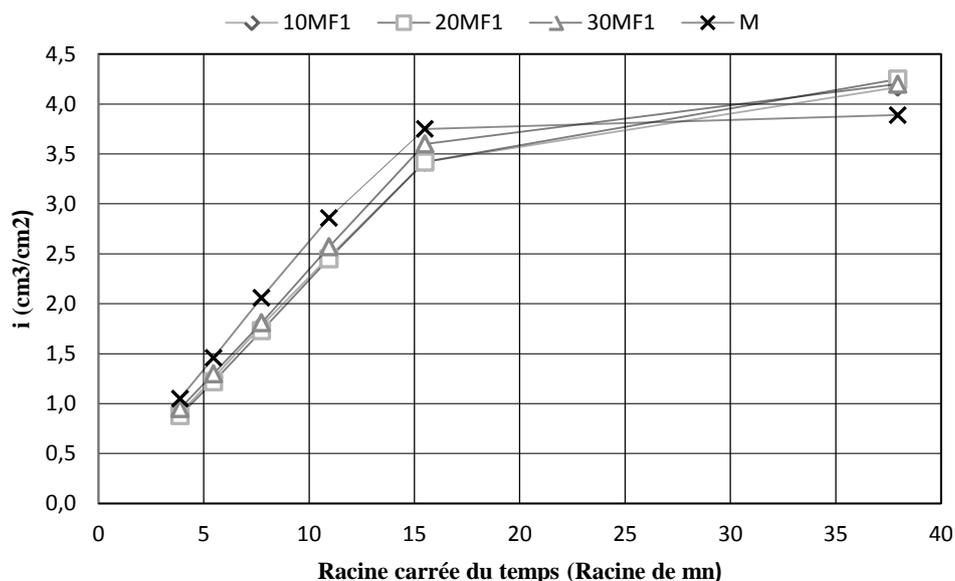


Figure IV.11 : Evolution de la masse d'eau cumulée (i) en fonction de la racine carrée du temps (\sqrt{t}) des mortiers avec finesse F1 = 1704 cm²/g

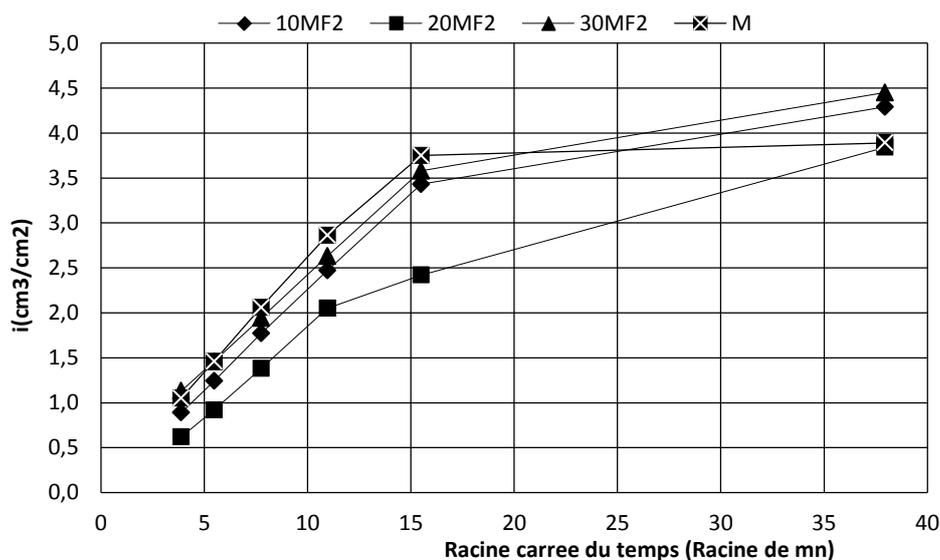


Figure IV.12 : Evolution de la masse d'eau cumulée (i) en fonction de la racine carrée du temps (\sqrt{t}) des mortiers avec finesse F2 = 5454 cm²/g

On peut noter que toutes les courbes ont la forme d'une droite bilinéaire. Cette forme a déjà été signalée par un certain nombre de chercheurs^{1,2,3} dans le cas de mortiers divers.

¹M. O'Farrell, S. Wild and B.B. Sabir. Sorptivity and water absorption of mortars incorporating waste brick. 7thCANMET/ACI international conference. ACI special publications (2001), 2, 853-868.

² Claisse, P. A (1997): Absorption and sorptivity of cover-mortar. Journal of materials in civil engineering, 9(3), 105-110.

³ Thokchom S, Ghosh P. Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortar. Journal of engineering and applied sciences (2009), 4(7), 28-36.

Chapitre IV : Résultats et discussions

La sorptivité est déterminée aux premiers moments de l'absorption, plus exactement à partir de la première partie de la droite bilinéaire.

Il s'agit, pour le cas de notre travail, du moment $t = 120$ mn correspondant à $\sqrt{t} = 10,95$ $\text{mn}^{1/2}$. Nous présentons dans la figure IV. 13 et IV. 14 les courbes $i = \sqrt{t}$ dans les limites de $\sqrt{t} = [3,87 - 10,95]$ pour les sept compositions élaborées.

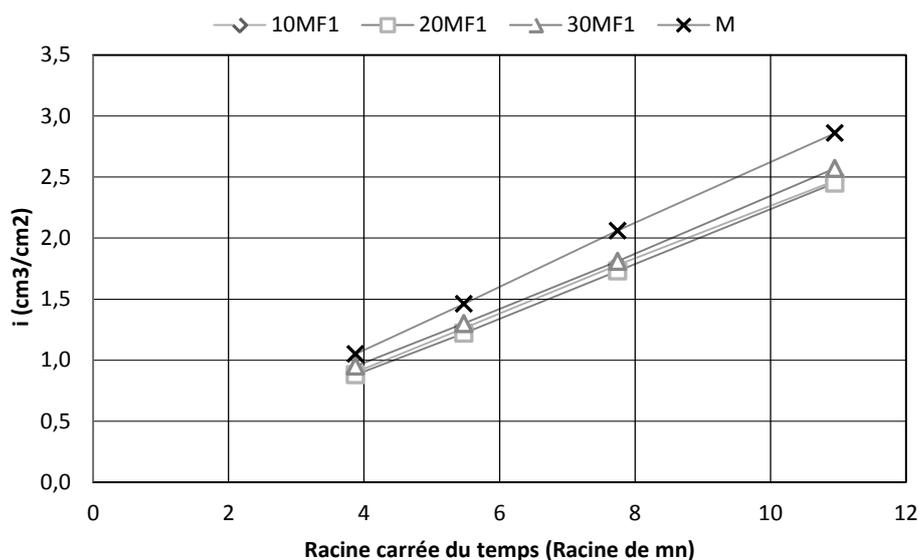


Figure IV.13 : Evolution de la masse d'eau cumulée (i) en fonction de la racine carrée du temps aux premiers moments de l'absorption des mortiers avec finesse $F1 = 1704 \text{ cm}^2/\text{g}$

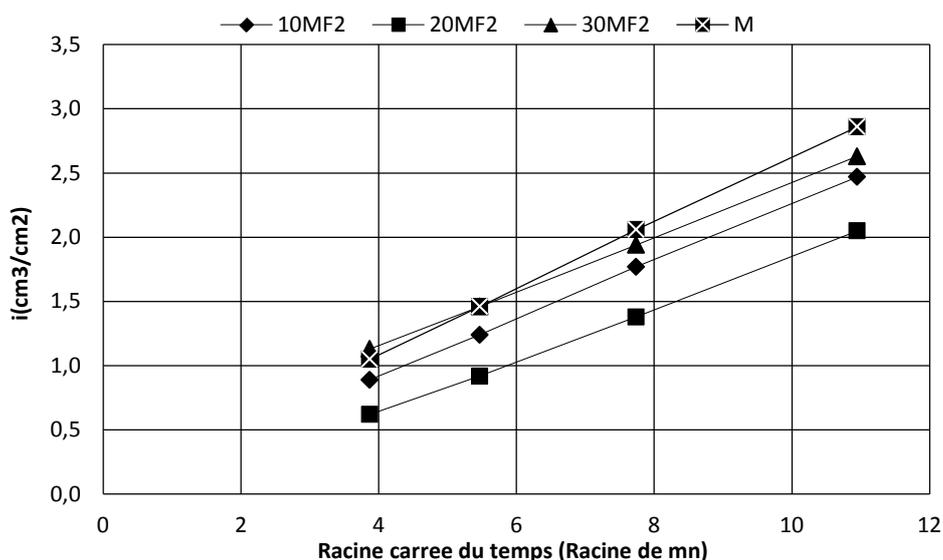


Figure IV.14 : Evolution de la masse d'eau cumulée (i) en fonction de la racine carrée du temps aux premiers moments de l'absorption des mortiers avec finesse $F2 = 5454 \text{ cm}^2/\text{g}$

Chapitre IV : Résultats et discussions

Pour les deux cas de figure, la relation est linéaire et conforme au modèle de Hall et al¹. Elle s'écrit :

$$i = S\sqrt{t}$$

Cette formule nous a permis de déterminer la sorptivité (s) des sept compositions étudiées par la relation :

$$S = \frac{i}{\sqrt{t}}$$

S représente dans les courbes, le gradient de i ou (Δi) au gradient de \sqrt{t} ou ($\Delta\sqrt{t}$). Les valeurs de (S) sont regroupées dans le tableau IV. 12 suivant :

Tableau IV. 11 : Sorptivité des mortiers d'étude S (mm/mn^{1/2})

Mortiers	Déchets de brique (%)			
	0	10	20	30
M	2.56	-	-	-
MF1	-	2.22	2.22	2.29
MF2	-	2.23	2.02	2.12

Quelque soit la finesse des déchets de brique et quelque soit le taux de ces déchets incorporés dans les mortiers en remplacement à la chaux aérienne, la sorptivité diminue toujours par rapport au mortier de référence (M) élaboré avec 100% de chaux. Ceci prouve l'apport des déchets de briques dans l'amélioration de cette caractéristique. Il est cependant difficile de se prononcer sur l'effet de la finesse sur cette caractéristique hydrique, même si parmi les sept compositions testées, le mortier 20MF2 et le mortier le plus sorptif (20% de remplacement et finesse F2).

2.5 Auscultation à l'ultrason et module d'élasticité dynamique :

Le tableau IV.8 regroupe les résultats obtenus pour le calcul des vitesses de propagation des ondes ultrasons dans les éprouvettes 4x4x16 cm³ dans les deux sens longitudinal et transversal, ainsi que le module d'élasticité dynamique calculé suivant la relation suivante :

$$E = \left(\frac{L}{t}\right)^2 \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

¹Hall C, Kam-Ming Tse T. Water movement in porous building materials-VII. The sorptivity of mortars. Build Environ 1986; 21(2): 113-8.

Tableau IV. 12: Vitesse de propagation des ondes dans les deux sens et module d'élasticité dynamique

Formulations	Taux de substitution (%)	ρ_s (kg/m ³)	Vitesse pour D = 4cm (m/s)	Vitesse pour D = 16cm (m/s)	E MPa
M	0	1695	1489	1210	2776
MF1	10	1758	1476	1144	2715
	20	1731	1429	1028	2351
	30	1720	1392	990	2196
MF2	10	1703	1387	960	2109
	20	1749	1331	1001	2140
	30	1735	1529	1240	2993

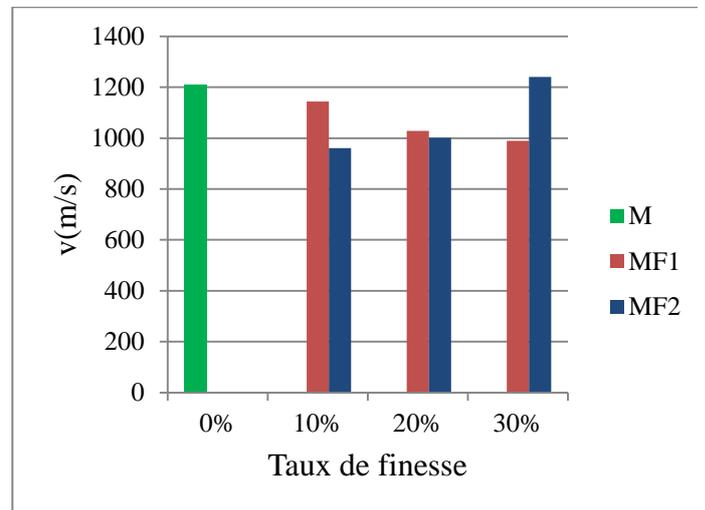
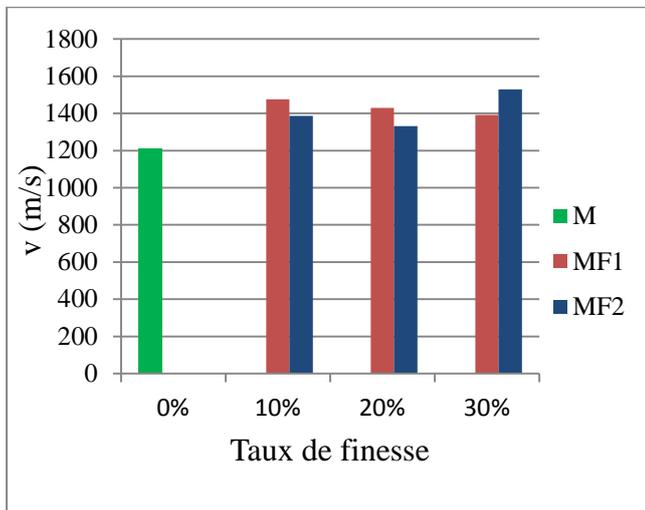


Figure IV.15 : Effet du taux de finesse des déchets de brique sur la vitesse de propagation dans le sens transversal

Figure IV.16 : Effet du taux de finesse des déchets de brique sur la vitesse de propagation dans le sens longitudinal

Les vitesses de propagation des ultrasons diminuent pour tous les taux de substitution comme on peut le remarquer sur les figures IV.14 et IV.15. Et par suite les modules d'élasticité dynamique suivent selon la relation qu'on a cité précédemment. Leurs faibles valeurs confirment la souplesse des mortiers d'enduits à base de chaux aérienne.

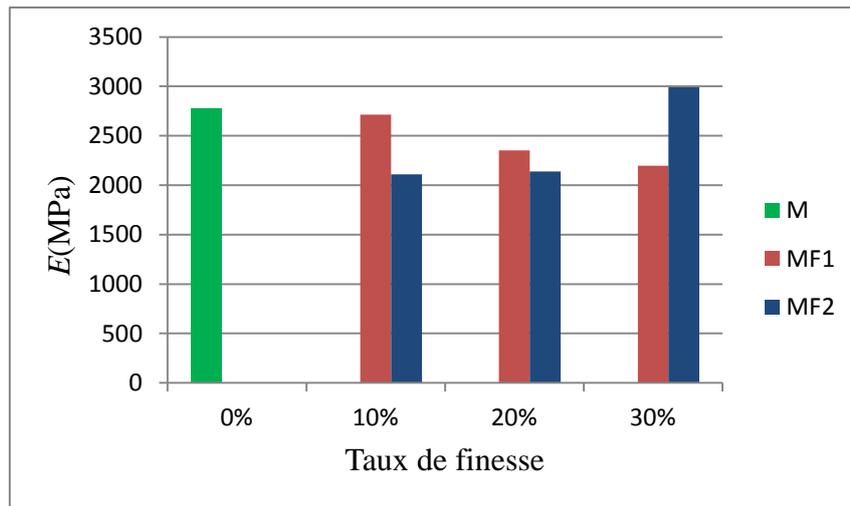


Figure IV.17 : Module d'élasticité dynamique des éco-mortiers

Le module d'élasticité dynamique qui traduit la déformabilité des matériaux a diminué pour la presque totalité des matériaux élaborés, sauf pour le mortier MF2 avec 30% de substitution de la chaux aérienne par les déchets de brique de finesse F2 ($= 5454 \text{ cm}^2/\text{g}$) qui a atteint une valeur record de 2992.66 MPa dépassant ainsi celui du mortier de référence valant 2776.42 MPa.

Conclusion :

A travers les essais de caractérisation qu'on a effectués sur les éco-mortiers élaborés, nous avons pu obtenir les résultats qu'on a regroupés dans le tableau IV. 14.

Ces résultats nous ont permis de retenir la formulation la plus adaptable pour la réhabilitation des mortiers d'enduit, pour les murs extérieurs du palais Meriem Azza qui est le mortier 20MF2 (mortier avec 20% de substitution):

- 3 volumes sable
- 0.8 volume chaux
- 0.2 volume déchets de brique avec finesse F2 = $5454 \text{ cm}^2/\text{g}$
- 1.25 volume eau.

Tableau IV. 13 : Récapitulatif regroupant les propriétés des éco-mortiers élaborés dans le but de la restauration des façades du palais Meriem Azza.

Mortier	TAUX DE DECHETS DE BRIQUE (%)						
	0	10		20		30	
	M	MF1	MF2	MF1	MF2	MF1	MF2
Mortier frais							
M_v (kg/m ³)	1874	1909	1886	1904	1899	1915	1925
Consistance (Table à secousses) (mm)	225	232	238	237	243	242	238
Début de prise (heure)	50h00	45h33	46h21	45h41	47h00	44h47	45h41
Fin de prise (heure)	120h04	91h36	92h52	90h42	89h51	96h00	91h30
Air occlus (%)	2.9	3.1	2.6	2.9	3.5	3.6	2.7
Mortier durci							
ρ_s (kg/m ³)	1695	1758	1703	1731	1749	1720	1735
R _{C28} (MPa)	1.03	0.65	0.78	0.69	0.80	0.62	1.00
R _{t28} (MPa)	0.29	0.28	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27
R _{C28} /R _{t28}	3.55	2.32	2.68	2.46	2.85	2.21	3.70
C _{abs immersion} (% masse sèche)	14.09	15.34	15.03	15.28	14.77	14.89	14.36
i (cm ³ /cm ²) ou profondeur d'eau (cm)	3.89	4.17	4.29	4.25	3.84	4.20	4.45
Sorptivité (mm/min ^{1/2})	2.56	2.22	2.23	2.22	2.02	2.29	2.12
Vitesse ondes ultrasoniques Sens transversal (m/s)	1489	1476	1387	1429	1331	1392	1529
Vitesse ondes ultrasoniques Sens longitudinal (m/s)	1209	1144	960	1028	1001	990	1240
E _{dyn} (MPa)	2776	2715	2109	2351	2140	2196	2993

Chapitre IV : Résultats et discussions



*Conclusion générale et
perspectives*

Conclusion générale

Les monuments historiques sont sujet de dégradation et d'altération leur restauration nécessite des techniques et des connaissances dans la matière. Notre objectif dans ce travail était d'élaborer un mortier d'enduit de remplacement pour le palais Meriem Azza de la ville de Skikda.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le palais Meriem Azza, qui malgré son statut de patrimoine nationale à préserver il ne bénéficie malheureusement pas d'un entretien digne de sa valeur qui est historique, culturelle, et technique.

Pour la réhabilitation de ses façades, les matériaux utilisés doivent être compatibles avec les matériaux anciens, donc il faut une bonne connaissance de la matière.

L'analyse bibliographique du deuxième chapitre nous a confirmé que la chaux est le matériau le plus adaptable pour les chantiers de restaurations, et de réhabilitations. Employée dans les mortiers, elle fut durement concurrencée par les liants hydrauliques à cause de sa lenteur de prise, mais les anciens ont su palier cet inconvénient par l'ajout de matériaux à caractère pouzzolanique tels que le tuileau pilé en proportions bien définies.

L'élaboration du mortier d'enduit pour la restauration des murs extérieurs du palais, ne pouvait se faire sans une analyse du support d'origine afin de respecter la compatibilité, pour ce faire nous avons prélevé un échantillon de mortier d'enduit in situ. Les analyses chimiques et minéralogiques nous ont confirmé la constitution de ce dernier d'argile et de chaux, nous avons alors entrepris la formulation de nos éco-mortier à base de chaux aérienne et de déchets de brique, afin d'apporter le côté hydraulique à la chaux aérienne qui est caractérisée par sa lenteur de prise.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des sept formulations de mortier qu'on a confectionné de manière traditionnelle, comme le préconise les architectes restaurateurs du métier, sont tous locaux et ont été caractérisés au laboratoire selon les normes.

Afin de réaliser notre objectif, nous avons procédé à des essais mécaniques, hydriques, et rhéologiques. Les résultats obtenus sont globalement positifs :

- Concernant la masse volumique, les déchets de brique ont conduit à une nette densification des mortiers.
- Le pourcentage d'air occlus a augmenté avec l'incorporation des déchets de brique, ce qui confère une meilleure perméabilité.
- Concernant la prise, les déchets de briques ont sensiblement accéléré le temps de prise, et cette amélioration est significative.

- S'agissant des résistances mécaniques à la traction, les déchets de brique n'ont eu aucune influence vu que les résistances sont restées pratiquement constantes, ce qui n'est pas le cas pour les résistances à la compression qui ont régressé.
- Enfin les modules d'élasticités dynamiques, leur faible valeur confirme la souplesse des éco-mortiers d'enduit à base de chaux aérienne et de déchets de briques.

La formulation retenue est le mortier 20MF2 (mortier avec 20% de substitution):

- 3 volumes sable
- 0.8 volume chaux
- 0.2 volume déchets de brique avec finesse $F2 = 5454 \text{ cm}^2/\text{g}$
- 1.25 volume eau.

Cette formulation est celle qui parait la plus adaptable pour la restauration des mortiers d'enduit des murs extérieurs du plais Meriem Azza.

Afin de valider cette formulation, il est nécessaire de poursuivre ce travail en menant des investigations dans :

- Les observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) pour voir l'adhésion de la chaux avec les déchets de brique et avec le sable utilisé.
- L'utilisation d'autres taux de déchets de briques inférieurs à 30% pour raffiner les analyses et préciser encore plus composition adoptée.
- L'addition de la poudre de marbre pour avoir un effet stuc.
- L'évaluation de l'altération des enduits à base de l'éco-mortier étudié par le test du cycle séchage-mouillage pour simuler les cas de température et d'humidité extrême.

Bibliographie

Références bibliographiques

(Listées par ordre alphabétique)

1. **A. Caussarieu, T. Gaumart**, « Guide pratique de la rénovation de façades pierre, béton, brique ». Edition Eyrolles, Paris, 2005.
2. **A. Boukhenouf**. « Caractérisation des mortiers archéologiques, le cas des sites historiques de Djemila et de la Citadelle d'Alger ». Mémoire de magister. 2006. Université de Boumerdes.
3. **A. Coutelas**, « Le mortier de chaux ». Éditions errance, Paris 2005.
4. **A. Riegl**. « Le culte des monuments », socio-anthropologie en ligne : www.socio-anthropologie.revues.org/5
5. **B. Farouk**, « Effet de la nature du sable sur les propriétés des mortiers ». Mémoire magister. 2010. Université de Guelma.
6. **BRUNDTLAND Gro Harlem**, Notre avenir à tous, Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1987.
7. **C. Amouri**. « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires ». Mémoire de doctorat 2009. Université de Constantine.
8. **C. Brandi**. « Théorie de la restauration. Edition du patrimoine, Paris 2001.
9. **C. Lemaitre**. « Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction ». Edition Eyrolles, Paris, 2012.
10. Charte de Venise 1964 : http://www.icomos.org/charters/venice_f.pdf
11. **Cimbéton**, « Les constituants des bétons et des mortiers ». Fiche technique tome 1.
12. **Claisse, P. A** (1997): Absorption and sorptivity of cover-mortar. Journal of materials in civil engineering, 9(3), 105-110.
13. **CNERIB** Centre Nationale d'Etudes et de Recherches intégrées du Bâtiment. Travaux d'enduit pour bâtiments : D.T.R. E 6-1. Algérie.
14. **D. Dekoumi, O.T. Bouznada**. « Législation algérienne et gestion du patrimoine ».
15. **DTU** Document Technique Unifié, n°26.1 p1-2 travaux d'enduits de mortiers, critères généraux des choix des matériaux. Avril 2008.
16. **E. Solal**. « Philippeville et sa région 1837-1870 », éditions : « la maison des livres », Alger.
17. **Ecole d'Avignon**. « Techniques et pratiques de la chaux ». Deuxième édition : Eyrolles, Paris, 2003.
18. **Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc**: Stichwort "Restauration". In: Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVe siècle, 10 Bände, Paris 1854-1868
19. **Euromed héritage**. Architecture traditionnelle Méditerranéenne, enduit à la chaux. Algérie.
20. **F. Béguin**, « Arabisances décor architectural et tracé urbain en Afrique du Nord 1830-1950. Bordas, Paris, 1983.

21. **G. Dreux et J. Festa** . « Nouveau guide du béton et de ses constituants » ». Edition Eyrolles. 8^{ème} édition.416 pages. 1998. France.
22. **G. Dreux**, « Nouveau guide de béton ». 2eme édition. Paris, 1979.
23. **G. Herrier, M. Pelletier, et D. Puiatti**, 2010. Chaux aérienne. Contexte, fabrication, domaines applicatifs. Collection Techniques de l'ingénieur, C-923, France : 1-18.
24. **G. Martinet, A. Le roux, F. Martineau**. « Mise au point et optimisation de mortiers pour la restauration des monuments de Haute-Egypte Actualisation de résultats », Bull. liaison Labo. P. et Ch.-190- mars-avr. 1994- Réf. 3788.
25. **G. Martinet, A. Le roux**. « Etude de contacts entre grès et mortiers Temple d'Amon à Karnak », Bull. liaison Labo. P. et Ch.-188- nov.-déc. 1993- Réf. 3787.
26. **G. Martinet, F.X. Deloye, A. Le roux**. « Natures et altérations des mortiers du Temple d'Amon à Karnak », Bull. liaison Labo. P. et Ch.-182- nov.-déc. 1992- Réf. 3682.
27. **G. Martinet, F.X. Deloye, J.C. Golvin**. « Caractérisation des mortiers pharaoniques du temple d'Amon à Karnak », Bull. liaison Labo. P. et Ch.-181- sept.-oct. 1992- Réf. 3679.
28. **H. Benseddik.Souki**. « La valorisation des monuments historiques en Algérie ». Mémoire magister 2012. Université de Constantine.
29. **Hall C, Kam-Ming Tse T**. Water movement in porous building materials-VII. The sorptivity of mortars. Build Environ 1986;21(2): 113–8.
30. **J. Baron**, « Les bétons : base et données pour leur formulation ». 2eme tirage Eyrolles. Paris, 1997.
31. **J. Claude**, « La chaux ses utilisations ». Editions Nathan Communication. Paris 1990.
32. **L. Bertrand**. « Histoire de philippeville 1838-1093 », imprimerie administrative et commerciale moderne, 18 rue Théophile Réguis, 18, France, 1903.
33. **M. Bourezg**. « Etude géologique et minière de quelques roches industrielles. Cas d'applications dans le Nord-est Algérien ». Thèse de doctorat en science, Université de Constantine.
34. **M. Hamiane, S. Aitouakli, L. Boumghar, W. Zekagh, M. Saidi**. « Design of jointing Mortar Compatible with the Masonry of the Villa Maheddine of the Ottoman Era », 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 Septembre 2010, Prague, Czech Republic.
35. **M. O'Farrell, S. Wild and B.B. Sabir**. Sorptivity and water absorption of mortars incorporating waste brick. 7thCANMET/ACI international conference. ACI special publications (2001), 2, 853-868.
36. **M. Quatremère de Quincy**. « Dictionnaire historique d'architecture », Tome second, 1832.P125, (en ligne)
37. **M.R. Labiadh, M. benOuezdou, R. El Mensi**. « Propriétés physico-mécaniques de mortiers d'enduit de restauration à base de chaux aérienne et pouzzolanes artificielles ». 5^{ème} congrès arabe des sciences des matériaux ACMS V. Gabès, Tunisie 2007.
38. **M.S. Messikh**. « Histoire ancienne et contemporaine de Skikda, l'antique Rusicade », édition RAIS, Juin 1996.

39. **M.Z. Bessenouci**, « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat ». Université Tlemcen 2010.
40. **MEATF**, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, « les pouzzolanes et les basalts », bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978.
41. **Meukam P.** « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.
42. **N. Aberrahim Mahindad, M. Hamine**, « Identification of Mortars in the Ottoman Era in Algeria through Historical Documentation and Laboratory Analyses », 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 Septembre 2010, Prague, Czech Republic.
43. **N. Zaid, S. Amokrane, K. Tazairt.** «Skikda art et monuments», sous la tutelle du wali D.E. Salhi.
44. **N.S. Martys, C.F. Ferraris.** « Capillary transport in mortars and concrete ». National Institute of Standards and Technology Building Materials Division, 226/B350 Gaithersburg, MD 20899.
45. **Nouveau DTU 26.1.** Les mortiers de chantier et la chaux naturelle hydraulique. Avril 2008.
46. **OPVM** : Office de la Protection de la Vallée du M'zab, «La chaux matériau de construction et de restauration ».
47. **P. Habib**, « De l'importance du diagnostic pour la restauration des monuments et structures ». Laboratoire de mécanique des solides. Imprimerie Giraud. Juin 1984.
48. **P. Joffroy.** « la réhabilitation des bâtiments ». Editions : Le Moniteur, Paris, 1999.
49. **Petit Larousse 2010.** Edition Larousse 2009
50. **Petit Larousse illustré 1984.** Librairie Larousse, 1980.
51. **R. Cerny', A. Kunca a, Vratislav, V. Tydliatà, J. Drchalová, and P. Rovnanyková**, "Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters", Construction and Building Materials, N° 20, 2006, pp. 849-857.
52. **R. Dupain, R. Lanchon, J-C. Saint-Arroman.** « Granulat, Sols, Ciments et bétons. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », éditions : Casteilla, Paris, 2000.
53. **S. Sanchez-Moral, L. Luque, J.C. Canveras, V. Soler, J. Garcia-Guinea, A. Aparicio**, « Lime pozzolana mortars in Roman catacombs: composition, structures and restoration, Cement and Concrete Research, N°35, 1555-1565, 2005.
54. **Thokchom S, Ghosh P.** Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortar. Journal of engineering and applied sciences (2009), 4(7), 28-36.
55. **V. Biston** « Manuel théorique et pratique du chaufournier, 1836». Réédition Léonce Laget, Paris, 1981.
56. **V. Vorobiev**, « Matériaux de construction ». Édition. Mir, Moscou 1967.
57. **Vitruve**, « Les dix livres d'architecture corrigés et traduits en 1684 par Claude Perrault». Edition Pierre Mardaga.
58. **Weber et Broutin France.** « Restaurer le caractère du bâti ancien », 2008