



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL & D'ARCHITECTURE

N° D'ORDRE : M..... /2021

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCE

SPECIALITE: _GENIE-CIVIL

Thème

**Amélioration des performances d'accolement du plâtre dédié
à la restauration et la fabrication des ornements
architecturaux suspendus**

Présentée Par.

Mr BELDJILALI Said

Soutenue le : 10/06/2021 devant le Jury composé de:

Président:	BENANANE Abdelkader	Professeur	U. Mostaganem
Rapporteur:	BOUGARA Abdelkader	Professeur	U. Chlef
Co-rapporteur:	BOUHAMOU Nasr-Eddine	Professeur	C. U. El-Bayadh
Examinatrice:	BELAS Nadia	Professeur	U. Mostaganem
Examineur:	BOULEKBACHE Bensaid	Professeur	U. Chlef
Invité	Nabil ROUBAI CHORFI	MCB	U. Mostaganem

Année Universitaire 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à tous ceux qui se sont sacrifiés pour m'offrir les conditions propices à ma réussite :

A la mémoire de mon père

Que ce travail soit l'expression de ma grande affection et un témoignage de mon attachement et de mon grand profond amour à l'homme de ma vie, mon père le grand Monsieur AHMED, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études, avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'il a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'il m'a enseigné depuis mon enfance, les échos de tes paroles sont gravés dans ma mémoire, je ne t'oublierai jamais .الله يرحمك يا الغالي

Remerciement

En préambule à ce travail, nous remercions le bon Dieu, de nous avoir donné la volonté, la foi, la force et le courage de réaliser ce travail.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans le concours et la contribution de bon nombre de personnes de près ou de loin.

Je tiens à remercier mon encadrant Mr BOUGARA Abdelkader et mon Co-encadreur Mr. BOUHAMOU Nasr-Eddine d'avoir accepté, dirigé et guidé ce travail par leurs méthodologies et leurs stratégies de développement du sujet qu'ils m'ont transmis, et pour les précieux conseils qui ont bien voulu me fournir afin de réaliser ce modeste travail.

Je remercie également Mr. José Aguiar, Professeur à l'université de Minho –Portugal- pour ses efforts fournis durant toute la période des expérimentations au Portugal, qu'il m'a toujours soutenu et encouragé durant toute cette période.

Sans oublier les personnels du laboratoire CTAC au Portugal pour la fourniture de tous les matériaux nécessaires afin de réaliser les essais dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier vivement Mr BENANANE Abdelkader, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, sa présence me fait l'honneur.

Je remercie également Madame BELAS Nadia, Professeure à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Monsieur BOULEKBACHE Bensaid, Professeur à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, d'être présents comme membre du jury dans ma thèse. Leur présence me honore.

Je tiens à remercier également notre invité Mr Nabil Roubai Chorfi, chef de département d'architecture pour sa présence.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma sœur Soumia, mon épouse Malika, et à tous ceux qui m'ont aidé, soutenu, et encouragé pour la réalisation de cette travail.

Abstract

The architectural ornaments used as decorative elements, are made from stone, but most of their components contain gypsum. It is reported that the deterioration of the ornaments is attributed to the penetration of water, biological colonization, micro and macro cracking and the partial and complete detachment, many rehabilitation operations of architectural ornaments have not succeeded to use appropriate material for purpose of the project.

Currently, the use of construction waste, especially the waste brick, is largely expanded in the world due to construction and rehabilitation of buildings.

For efficient and sustainable use of such material in the rehabilitation of architectural ornaments, an experimental study was conducted to examine the influence of the content of the waste brick on the physical and mechanical properties of the gypsum mortar. The materials used to prepare the gypsum mortar were gypsum, natural sand, waste brick, water and superplasticizer.

The main variable in this study were the waste brick content (0% to 100%) and the type of the substrate (limestone and brick). The W/B ratio of all the mixtures was kept constant to maintain a similar level of the workability. Many tests were performed to assess the physical and the mechanical behaviour of the gypsum mortars including the adhesion test, XRD and the SEM analysis.

The results found show that the adhesion strengths in the mortars are more important when the substrate is made from limestone with the regard to the substrate made with brick. However, excessive percentage of waste brick in the mortar can lead to adverse effects and reduce the adhesive strength. Gypsum mortars made with 75% of waste brick should be recommended for the rehabilitation of the architectural ornaments.

Key-words: ornament, gypsum, waste brick, adhesion strength,

Résumé

Les ornements architecturaux utilisés comme des éléments décoratifs sont fabriqués en pierre, mais la plupart de leurs composants contiennent du gypse. Il est constaté que la détérioration des ornements est attribuée à la pénétration de l'eau, à la colonisation biologique, à la micro et macro-fissuration et au détachement partiel et complet. De nombreuses opérations de réhabilitation des ornements architecturaux n'ont pas réussi à utiliser le matériau approprié pour les besoins du projet.

Actuellement, l'utilisation des déchets de construction, en particulier la brique usagée, est largement répandue dans le monde en raison de la construction et de la réhabilitation des bâtiments.

Pour une utilisation efficace et durable de ces matériaux dans la réhabilitation des ornements architecturaux, une étude expérimentale a été menée pour examiner l'influence du contenu des déchets de briques sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier de plâtre.

Les matériaux utilisés pour préparer le mortier de gypse étaient le gypse, le sable naturel, les déchets de briques, l'eau et le superplastifiant. Les principales variables de cette étude étaient la teneur en briques usagées (de 0 à 100 %) et le type de substrat (calcaire et brique). Le rapport E/L de tous les mélanges a été maintenu constant afin de conserver un niveau d'ouvrabilité similaire.

De nombreux tests ont été effectués pour évaluer le comportement physique et mécanique des mortiers de gypse, y compris le test d'adhérence, la radiographie et l'analyse MEB.

Les résultats obtenus montrent que les forces d'adhérence des mortiers sont plus importantes lorsque le substrat est fait de calcaire par rapport au substrat fait de briques. Cependant, un pourcentage excessif de déchets de briques dans le mortier peut avoir des effets négatifs et réduire la force d'adhésion. Les mortiers de plâtre fabriqués avec 75 % de briques usagées sont recommandés pour la réhabilitation des ornements architecturaux.

Mots-clés : ornement, gypse, déchet de brique, force d'adhérence.

الموجز

كل الزخارف المعمارية المستخدمة كعناصر زخرفية مصنوعة من الحجر ، لكن معظم مكوناتها تحتوي على الجبس. تبين أن تلف الزخارف يرجع إلى تغلغل المياه ، والاستعمار البيولوجي ، والتشقق الجزئي والكبير والانفصال الجزئي والكامل ، ولم تنجح العديد من عمليات إعادة تأهيل الزخارف المعمارية في استخدام المواد المناسبة لاحتياجات المشروع.

حاليًا، ينتشر استخدام نفايات البناء، وخاصة الطوب المستخدم، على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم بسبب تشييد المباني وإعادة تأهيلها. من أجل الاستخدام الفعال والمستدام لهذه المواد في إعادة تأهيل الزخارف المعمارية ، أجريت دراسة تجريبية لفحص تأثير محتوى مخلفات الطوب على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لملاط الجبس.

وكانت المواد المستخدمة في تحضير مونة الجبس هي الجبس والرمل الطبيعي و مخلفات الطوب والماء والملدنات القوية. كانت المتغيرات الرئيسية في هذه الدراسة هي محتوى مخلفات الطوب المستعمل (0 إلى 100٪) ونوع الركييزة (الجير و الطوب). تم الحفاظ على نسبة E/L لجميع المخاليط ثابتة من أجل الحفاظ على مستوى مماثل من قابلية التشغيل.

تم إجراء العديد من الاختبارات لتقييم السلوك المادي والميكانيكي لملاط الجبس ، بما في ذلك اختبار الالتصاق وتحليل DRX وتحليل MEB.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن قوة التصاق الملاط تكون أكبر عندما تكون الركييزة مصنوعة من الحجر الجيري مقارنة بالركييزة المصنوعة من الطوب. ومع ذلك ، فإن النسبة الزائدة من مخلفات الطوب في الملاط يمكن أن يكون لها آثار سلبية وتقليل قوة الرابطة. يوصى باستخدام ملاط الجبس المصنوع من 75٪ من مخلفات الطوب لإعادة تأهيل الزخارف المعمارية.

الكلمات المفتاحية الزخارف المعمارية ،الجبس، مخلفات الطوب، قوة الالتحام.

N°

Liste des figures

Introduction générale

I.1.	Organigramme de la structure de la thèse.....	3
------	---	---

Chapitre :I

I.1.	Organigramme de l'organisation du l'analyse architecturale des ornements.....	5
I.2.	Les types de répétitions des ornements architecturaux.....	6
I.3.	Différence entre les ornements selon le type de fabrication.....	7
I.4.	Les différentes composantes de la façade.....	11
I.5.	les composantes ornées de la façade.....	13
I.6.	Les quartiers du centre-ville de Mostaganem.....	18
I.7.	Les façades des immeubles du centre-ville de Mostaganem a analysés.....	19
I.8.	Les motifs des ornements architecturaux.....	22

Chapitre :II

II.1.	Origine du gisement du gypse	26
II.2.	Un gisement pour extraction du gypse.....	28
II.3.	Structure cristalline du gypse.....	29
II.4.	Les faces de cristaux de gypse.....	30
II.5.	Modification des cristaux de gypse par l'utilisation des adjuvants.....	31
II.6.	Les images (MEB) du semi hydrate α et β	32
II.7.	Les images (MEB) d'une microstructure de plâtre.....	34
II.8.	La variation volumique du plâtre.....	35

Chapitre :III

III.1.	La composition d'un matériau composite.....	38
III.2.	Typologie des matériaux composites.....	39
III.3.	Typologie du renfort pour les matériaux composites.....	41
III.4.	Résistances mécaniques du mortier de ciment renfermant différent taux de PDB à l'âge de 28 jours.....	43
III.5.	Résistance à l'adhésion du mortier de ciment avec et sans PDB à 28 jours.....	44
III.6.	Façade du quelques bâtiments historiques.....	44
III.7.	Pathologie détecté par observation visuelle.....	45
III.8.	Analyse minéralogique par XRD.....	46

III.9.	Analyse granulométrique des matériaux.....	47
III.10.	Résultat de l'absorption par immersion des échantillons.....	48
III.11.	Résultats de la résistance à la flexion de l'échantillon étudié.....	48
III.12.	Résultats de la résistance à la compression de l'échantillon étudié.....	49
III.13.	Résultats de la résistance à l'adhésion des échantillons.....	50
III.14.	Déchets de céramique et de polystyrène expansé.....	51
III.15.	Echantillons élaborés avec 30% de gypse et renforcer par les DC (essais A1).....	52
III.16.	Echantillons élaborés avec 30% de gypse et renforcer par les DC (essais A2).....	52
III.17.	Echantillons élaborés avec le gypse A1 et renforcer par déchets de DPE (Essais B)	53

Chapitre :IV

IV.1.	Equipements et méthode utilisés pour la préparation du sable à base de déchet de brique.....	57
IV.2.	Organigramme de caractérisation employé.....	57
IV.3.	Essai de tamisage.....	59
IV.4.	Distribution granulométrique des grains des deux sables.....	59
IV.5.	Absorption d'eau des granulats de sable.....	62
IV.6.	Absorption des grains par liquide de kérosène.....	62
IV.7.	Taux absorption des grains.....	63
IV.8.	Le malaxeur automatique.....	64
IV.9.	Essai de mesure de l'ouvrabilité	65
IV.10.	Mode de préparation des éprouvettes de mortier.....	66
IV.11.	Eprouvettes de mortier après le démoulage.....	66
IV.12.	Organigramme des essais réalisé.....	67
IV.13.	Microscopie électronique à balayage (FEG-MEB), NOVA 200 Nano.....	68
IV.14.	Analyse DRX Bruker D8 Discover.....	69
IV.15.	Essai d'absorption par capillarité.....	70
IV.16.	Essai d'absorption par immersion.....	71
IV.17.	Principe de traction par flexion.....	72
IV.18.	Dispositif d'essai de traction par flexion.....	73
IV.19.	Dispositif d'essai de compression.....	74
IV.20.	Schéma de principe de l'essai d'adhésion.....	75
IV.21.	La pose du mortier sur les supports.....	75
IV.22.	Mise en œuvre des échantillons pour le test d'adhérence.....	76
IV.23.	Dispositif d'essai d'adhésion.....	77

Chapitre :V

V.1.	Rapport Eau/Gypse (E/G) de différents mortiers.....	78
V.2.	Analyse de diffraction des rayons X des échantillons de mortier.....	79
V.3.	Images MEB des cinq échantillons contenant différentes quantités de DB.....	81
V.4.	Absorption d'eau par immersion en % des mortiers.....	83
V.5.	Absorption d'eau par capillarité des mortiers en fonction du temps.....	84
V.6.	Eprouvette soumise à l'essai de traction.....	85
V.7.	Résultats des résistances à la traction par flexion des mortiers de plâtre en fonction de l'âge.....	86
V.8.	Essai de compression sur le mortier du plâtre.....	87
V.9.	Résultats des résistances à la compression des mortiers en fonction de l'âge.....	88
V.10.	Résistances à l'adhésion des mortiers à 28 jours sur support en brick et pierre de calcaire.....	90
V.11.	Diagramme d'évaluation des couleurs pour le mortier.....	91
V.12.	Vue du support de brique de mortier d'interface après le test d'adhérence.....	92
V.13.	Schéma descriptif de la rupture adhésive et la rupture cohésive.....	93

Liste des tableaux

Chapitre :I

I.1.	Les avantages et les inconvénients des ornements selon le type de fabrication.....	8
I.2.	Les différents supports des ornements.....	9
I.3.	Les différentes composantes de la façade.....	11
I.4.	Les étapes proposées pour analyse des ornements à suivre architecturaux.....	14
I.5.	Phase de lecture historique de la façade.....	15
I.6.	Phase de lecture architecturale de la façade.....	16
I.7.	Analyse des ornements architecturaux sur la façade.....	16
I.8.	Analyse des ornements architecturaux isolés.....	16
I.9.	Caractéristique des motifs d'un ornement architectural.....	17
I.10.	Lecture des façades.....	20
I.11.	Analyse des ornements architecturaux par rapport à la façade.....	21

Chapitre :II

II.1.	Etape de fabrication du plâtre.....	28
II.2.	Les différents composés du plâtre obtenus en fonction des températures.....	31
II.3.	Les propriétés du semi hydrate α et β	32
II.4.	Les Phases de déshydratation du plâtre.....	33

Chapitre :III

III.1.	Analyse chimique de l'échantillon prélevé dans les bâtiments étudiés.....	46
--------	---	----

Chapitre :IV

IV.1.	Composition chimique (%) et caractéristiques des matériaux utilisés.....	58
IV.2.	Classification des différents types de sable selon les USCS.....	60
IV.3.	Détail de calcul du taux absorption des grains.....	63
IV.4.	Constitution des cinq mélanges de mortier pour 1 m ³	64

Chapitre :

V.1.	Compositions chimiques des zones dans les différents mélanges.....	83
V.2.	Résultat des résistances à la traction par flexion des mortiers du plâtre.....	86
V.3.	Résultats des résistances à la compression des mortiers du plâtre en fonction de l'âge.....	88
V.4.	Résistances à l'adhésion des mortiers de plâtre à 28 jours sur support en brick et pierre de calcaire.....	89
V.5.	Mode de rupture sur les deux supports.....	94

SOMMAIRE

1.	Introduction générale.....	1
1.1	Généralités.....	1
1.2	Problématique.....	1
1.3	Objectif.....	2
1.4	Méthodologie et organisation de la thèse.....	2

Chapitre I: Etude architecturale des ornements architecturaux « cas du centre-ville de Mostaganem »

1.	Introduction.....	4
2.	Définition d'ornement.....	5
3.	Industrialisation des ornements.....	6
4.	Les motifs de l'ornement.....	8
5.	Les supports d'ornement.....	9
6.	La façade comme un support des ornements architecturaux.....	10
6.1	Introduction.....	10
6.2	Définition de la façade.....	10
6.3	Les composantes de la façade	10
7.	vocabulaire des ornements architecturaux dans les façades coloniales.....	12
8.	Les étapes d'une étude architecturale des ornements des façades des ornements architecturaux	13
8.1	Introduction.....	13
8.1	1-Etape de lecture de la façade.....	15
8.1	2- Etape d'analyse des ornements.....	15
9.	Etude architectural des ornements architecturaux des façades de la ville de Mostaganem.....	17
9.1	La lecture des façades.....	18
9.2	Analyse des ornements architecturaux par rapport à la façade.....	21
10.	Conclusion.....	23

Chapitre II: Généralités sur le plâtre.

1.	Introduction.....	24
2.	Le plâtre comme un liant minéral aérien.....	25
2.1	Historique.....	25

3.	Généralités et caractéristiques du gypse	25
3.1	Définition.....	25
3.2	Origines.....	26
3.3	Historique des recherches sur le plâtre.....	28
4.	Fabrication du plâtre.....	27
5.	Caractéristiques structurelles du gypse « pur ».....	29
5.1	La morphologie des faces de cristaux de gypse.....	30
5.2	Hydratation, Prise et durcissement	32
6.	Microstructure du plâtre.....	34
7.	Caractéristiques générales du plâtre	34
7.1	Phénomène de la prise.....	34
7.2	Durée de prise.....	34
7.3	Le retrait	35
7.4	Résistance au feu.....	35
7.5	Résistance à la compression et à la traction.....	35
7.6	Adhérence du plâtre	36
8.	Conclusion.....	37

Chapitre III: Etat de l'art sur le renforcement du plâtre.

1.	Introduction.....	38
1.1	Définition du matériau composites.....	38
2.	Typologie des matériaux composites.....	39
2.1	Matériaux composites selon la matrice.....	39
2.2	Matériaux composites selon le renfort.....	39
2.3	But de l'utilisation des matériaux composites.....	40
3.	Utilisation des déchets de constructions comme ajouts dans le domaine de la réhabilitation.....	41
3.1	Déchet de démolition de construction.....	42
4.	Effet de la poudre de déchet de brique (PDB) sur le comportement du mortier de ciment blanc.....	42
5.	Effet des déchets de rochet sur le comportement physique et mécanique du mortier de plâtre.....	44
6.	Influence des déchets céramiques et de polystyrène expansé sur le comportement de la matrice de plâtre.....	51
7.	Effet des déchets de construction et de démolition sur les propriétés de la matrice de plâtre.....	54
8.	Conclusion.....	55

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et méthodes d'essais

IV-I. Caractérisation des matériaux

1.	Introduction.....	56
2.	Matériaux utilisés.....	56
3.	Caractérisation des matériaux.....	57
3.1	Composition chimique.....	58
3.2	Analyse granulométrique.....	58
3.3	Absorption des grains des deux matériaux.....	61
4.	Préparation du mortier.....	63
4.1	Confection des éprouvettes de mortier du plâtre.....	65

IV-II. Méthodes d'essais

1	Introduction.....	67
2.	Caractérisation du mortier de gypse du plâtre.....	68
3	Essais d'absorption.....	70
3.1	Absorption par capillarité.....	70
3.2	Absorption par immersion.....	71
4	Essais destructifs.....	71
4.1	Essai de traction par flexion.....	72
4.2	Essai de compression.....	73
4.3	Essai d'adhésion.....	74
5.	Conclusion.....	77

Chapitre V : Résultats et discussion

1.	Comportement du mortier de plâtre à l'état frais.....	78
2.	Comportement du mortier de plâtre à l'état durci	79
2.1	Caractérisation du mortier.....	79
2.1.1	Résultats de la diffraction des rayons X (DRX)	79
2.1.2	Résultats de la microscopie à balayage électronique(MEB)	80
2.2	Absorption d'eau par immersion	83

2.3	Absorption d'eau par capillarité	84
2.4	Résistances mécaniques.....	85
2.4.1	Résistance à la traction par flexion.....	85
2.4.2	Résistance à la compression.....	87
2.5	Résistance à l'adhésion.....	89
2.5.1	Observations physiques.....	91
3.	Conclusion.....	95
	Conclusion générale	97
	Références	100

Introduction Générale

1-Introduction générale

1.1 Généralités

L'Algérie englobe une variété inestimable en matière de patrimoine archéologique, architectural et urbanistique. Ce qui fait la richesse de ce patrimoine, ce sont les Médinas du nord, les Ksours sahariens ou les villages Kabyles, sans négliger l'héritage architectural durant l'époque coloniale française du 19^{ème} et 20^{ème} siècle, acquis comme patrimoine exceptionnel. La préservation de ce patrimoine architectural en Algérie constitue aujourd'hui un enjeu majeur, car il est considéré comme l'un des repères les plus importants de nos villes. Ce patrimoine occupe une partie non négligeable de notre parc immobilier et contribue fortement à la définition de l'image urbaine de nos villes et de ses qualités architecturales.

Le tissu colonial du centre-ville de Mostaganem reflète un exemple de ce portefeuille colonial. Malgré les tentatives de mise en valeur du patrimoine colonial (comme les travaux de réhabilitation des façades du centre de ville de Mostaganem), il n'existe aucune preuve vis-à-vis de la durabilité de ces opérations, ce doute est exprimé par le manque de la méthodologie qui appartient dans le cadre théorique, ainsi que le savoir-faire qui se manifeste par l'utilisation des matériaux de construction standards pour les travaux de réhabilitation surtout les éléments sensibles comme les ornements architecturaux. Ces derniers sont des éléments décoratifs, qui représentent un détail, largement utilisé au niveau des façades de constructions coloniales, ils sont exécutés en pierre, mais la majorité est fabriquée en plâtre.

1.2 Problématique

Il est constaté que la dégradation des ornements se fait selon plusieurs pathologies, à savoir l'effacement du dessin des motifs, l'apparition de micro fissures, l'apparition de grandes fissures ou de trous et le décollement partiel et total des ornements architecturaux. Ce dernier représente la pathologie la plus remarquée.

Le décollement de l'ornement en plâtre se produit en général sous l'action de son propre poids. Les forces d'adhésion et de cohésion dans la matrice du plâtre qui sont responsables de la fixation et l'attachement des éléments de plâtre aux supports doivent être assez importantes pour résister aux forces de traction et de décollement.

Il n'y a pratiquement aucune étude rigoureuse qui porte sur la recherche de la mise en valeur de ce patrimoine colonial et plus précisément la restauration des ornements

Introduction générale

architecturaux, à travers la recherche d'un matériau innovant et écologique capable d'apporter un meilleur comportement vis-à-vis de l'accolement de l'ornement au support.

1.3 Objectifs

Cette étude a une double vocation, d'une part l'identification, la répertoriations des ornements architecturaux du centre-ville de Mostaganem, ainsi que la démonstration de leurs degrés de dégradation selon les pathologies citées auparavant, et d'autre part proposer des techniques et des matériaux adéquats à la restauration de ces ornements, selon les normes et qui ne se fient pas aux critères d'authenticité, dans le but de transmettre ce patrimoine aux futures générations. L'objectif de ce deuxième volet est précisément la recherche d'un renfort susceptible d'améliorer les performances d'accolement des ornements en plâtre au support.

La fragilité du plâtre pose un problème lors de la conception et la restauration des pièces décoratives, cette fragilité est un défaut préoccupant pour l'utilisateur, c'est dans ce sens que notre travail est lancé, par un renforcement du plâtre par l'introduction des ajouts minéraux tel que le déchet de brique dans le mortier de plâtre destiné à la réhabilitation de l'ornement, a pour but d'améliorer le comportement physico-mécanique et chimique de ce composite vis-à-vis des différentes sollicitations (absorption, compression, traction, adhésion).

L'intérêt de cette étude de recherche est de fournir au marché algérien un matériau de construction à base de plâtre renforcé du déchet de brique sachant que l'Algérie est un pays en développement, ce qui augmente le taux de déchets générés par le secteur de la construction, qui s'intéresse de plus en plus à la valorisation des déchets de brique

Ce nouveau produit est destiné à la confection et la réhabilitation des ornements architecturaux. Ainsi, il est possible de sauvegarder une bonne partie de notre patrimoine architectural considéré comme un jalon de notre identité et nos valeurs.

1.4 Méthodologie et organisation de la thèse

Pour une meilleure maîtrise et compréhension du sujet traité, le manuscrit est composé de deux parties(**Figure.1**).

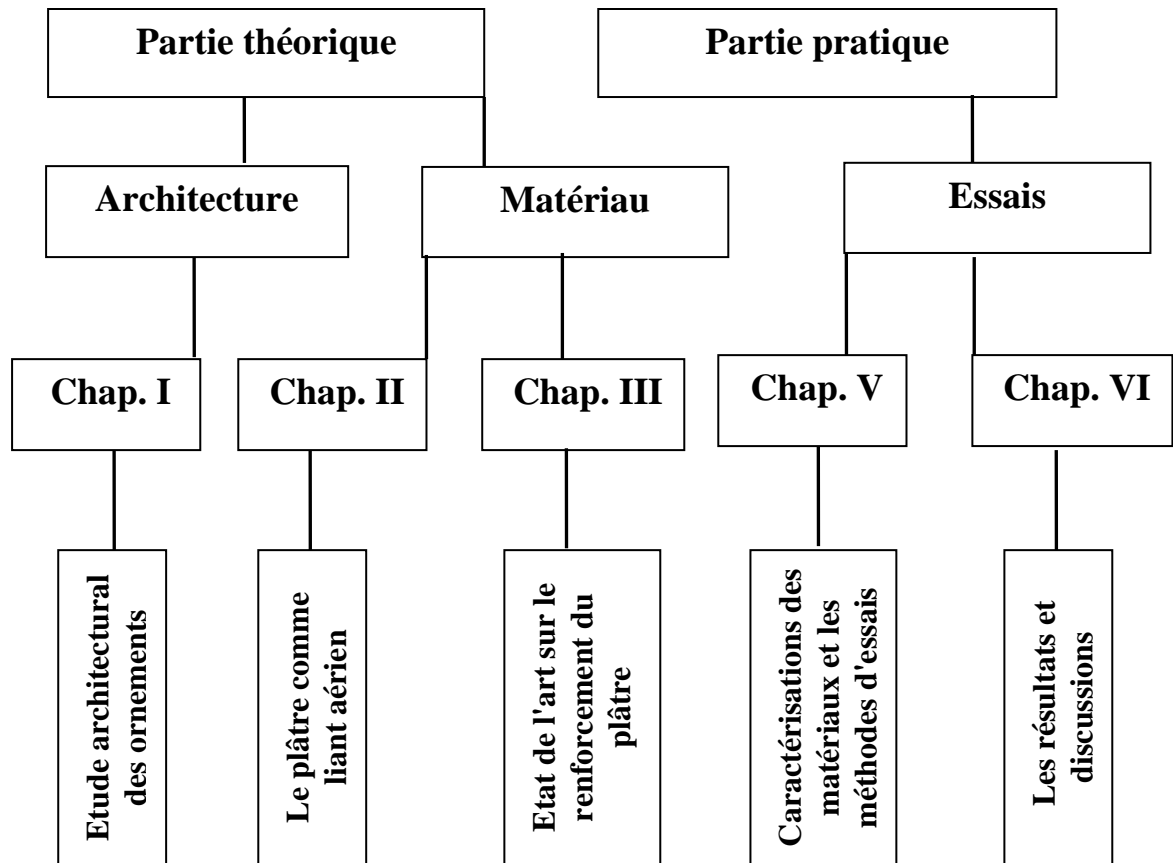


Figure 1: Organigramme de la structure de la thèse.

La première partie est composée de trois (03) chapitres, le premier définit l'élément « ornement », son rôle, sa valeur, ses motifs et ses différents supports et identifie la façade comme un des supports de l'ornement architectural. On a établi une étude architecturale sur les façades coloniales de la ville de Mostaganem, où il a été détecté une série de pathologies de dégradation de l'ornement, qui servira à décrire la problématique de la deuxième étude.

Le deuxième chapitre fait le point sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du gypse, tandis que le troisième chapitre présente un état de l'art des travaux de recherche réalisés sur l'amélioration des performances du plâtre par l'introduction des différents ajouts.

La partie expérimentale est scindée en deux (02) chapitres. Le premier chapitre décrit les matériaux utilisés et leurs caractéristiques, il décrit aussi le protocole expérimental et les méthodes d'essais. Dans le deuxième chapitre, les résultats trouvés sont analysés et discutés en considérant les travaux antérieurs.

Cette étude est close par des conclusions et des recommandations.

Chapitre I

Etude architecturale des ornements

-Cas du centre-ville de Mostaganem

1. Introduction

La notion d'ornementation n'a pas cessé d'évoluer, où les ornements architecturaux sont variés non seulement par ses peuples et ses époques mais aussi par ses différents styles reconnus beaucoup par le style art déco et art nouveau, ces derniers possèdent une grande diffusion sur la scène algérienne durant la période coloniales française qui est considérée comme un nouveau vocabulaire architectural adopté en Algérie

Mostaganem est une ville côtière comme plusieurs villes algériennes. L'héritage colonial architectural de 19eme et 20eme siècle représente une partie importante du cadre bâti algérien, Malgré les tentatives de mise en valeur de patrimoine colonial, comme les travaux de réhabilitation des façades du centre de ville de Mostaganem, mais on constate un grand manque des éclaircissements sur ce mode de réhabilitation soit par des étude dans le cadre théorique ou même des ressources sur ces différents opération de réhabilitation dans le cadre pratique, surtout ce qui concerne les éléments sensible comme les ornements.

L'ornement architectural est un ensemble de techniques et de motifs, souvent regroupés en listes et associés principalement avec les arts industriels ou bien recouvrant des surfaces architecturales, alors en architecture, un ornement est considéré comme une partie décorative utilisée pour embellir des façades de bâtiment ou des espaces intérieurs.

La connaissance et l'identification des ornements, participe à la mise en valeur de l'héritage colonial en vue de sa protection, sa réhabilitation et sa réinterprétation dans une perspective de durabilité. Alors la récupération des ornements constitue une opération complexe, elle comporte préalablement un jugement critique qui va dicter par la suite la manière d'intervenir propre à chaque cas, d'où la question initiale de notre recherche est : comment assurer le succès du projet de récupération des ornements architecturaux des façades coloniales?

Afin d'assurer un projet de récupération des ornements architecturaux, il nécessite une équipe pluridisciplinaire, ou elle doit passer systématiquement par une opération d'inventaire et de restitution à travers des étapes que nous avons proposé pour éviter de commettre des erreurs liées à l'esthétique ou une falsification historique.

L'établissement d'un inventaire est la première étape qui permet d'identifier et répertorier les différents types d'ornements.

Notre avons essayé à travers ce chapitre d'inscrire notre recherche dans un aspect architectural qui vise de proposer des principes et des étapes pour éventuel projet de récupération des ornements architecturaux des façades coloniales.

L'objectif, d'une part l'identification des ornements du centre-ville. Et d'autre part démontrer leurs degrés de dégradation, et par la suite de proposer des techniques et des matériaux de récupération de ces derniers.

La recherche architecturale de l'ornement est un passage obligatoire, elle se représente sous plusieurs formes comme les motifs et techniques exposés dans des enchaînements formelles ou chronologiques, cette étude est un travail difficile, précis et pointu.

D'une façon générale, ce chapitre traite la notion architecturale à travers trois aspects : Le cadre conceptuel de l'ornement, ainsi que la façade comme un support des ornements architecturaux et finalement le centre-ville de Mostaganem comme un cas d'étude (**Figure I.1**).

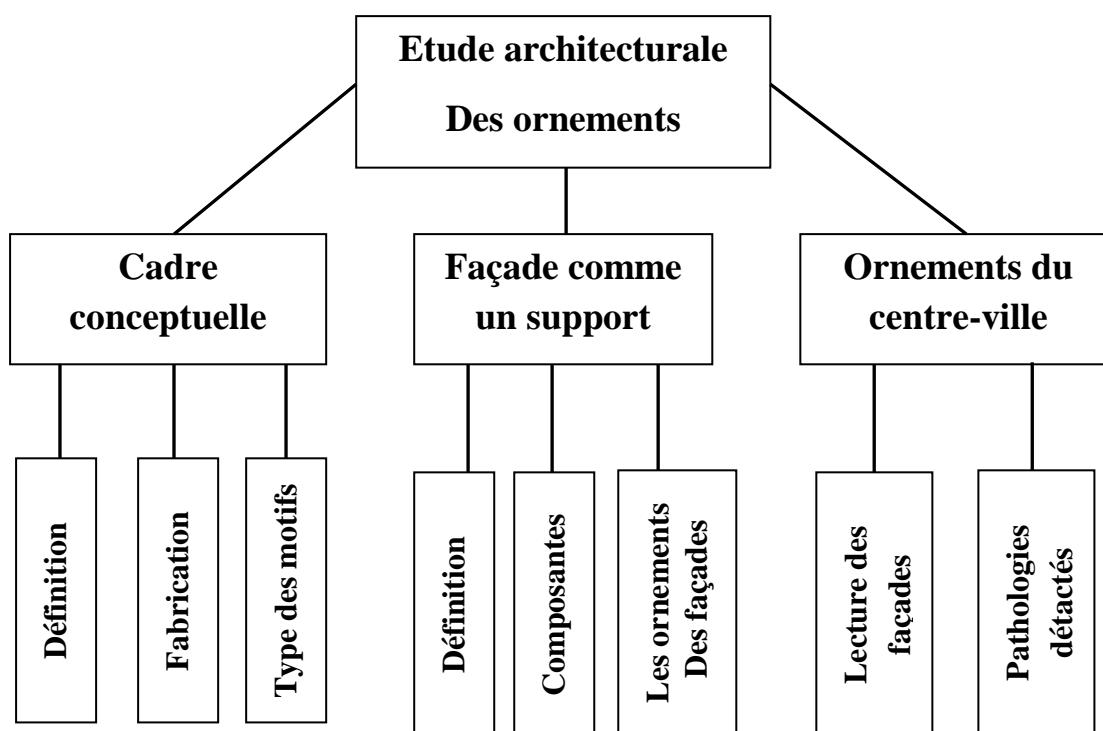


Figure I.1: Organigramme de l'organisation de l'analyse architecturale des ornements

2. Définition de l'ornement

Le mot ornement vient du latin *ornamentum*, qui décrit un costume, il existe aussi un ornement d'un discours et d'un texte, distinction, honneurs.

Les sens variés de ce terme ont été préservés jusqu'à l'époque contemporaine ou l'ornement est ce qui sert à décorer un objet, quelle qu'elle soit[1]

C'est un non masculin : élément qui orne, décore, agrémenté un ensemble en l'embellissant, en lui donnant un certain caractère. En architecture, les ornements sont des

petites parties pour décorer des édifices ou des pièces de mobilier intérieur de célébrations décoratives.

L'ornement est souvent bidimensionnel, il est utilisé pour décorer une surface[1]. Chaque ornement est composé d'éléments individuels qui se prêtent à différentes formes d'association, allant de la simple répétition (a-a-a-), à une autre alternance (a-b-a-b-a-) il peut y avoir un centre (**Figure I.2**), jusqu'à des combinaisons très complexes dans lesquelles les axes horizontaux et verticaux peuvent être combinés

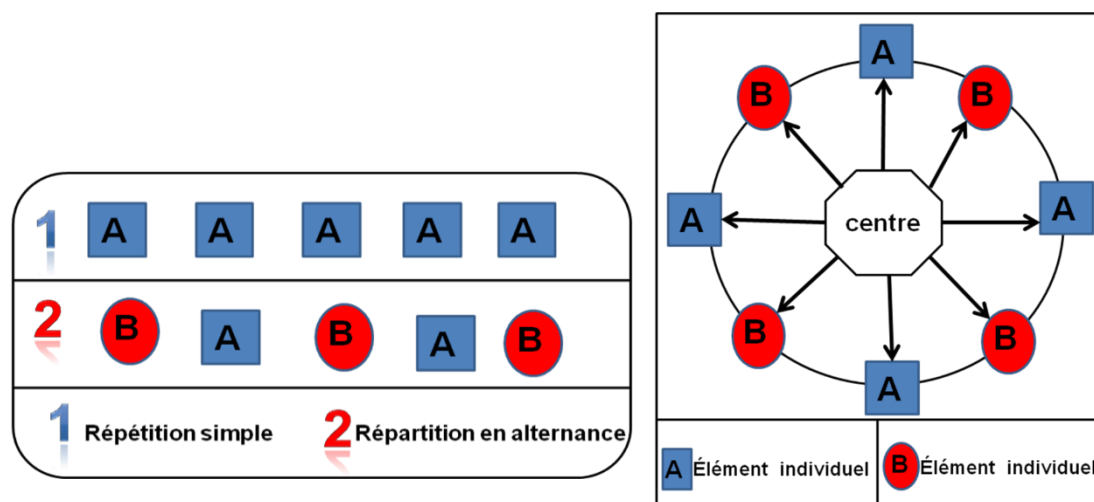


Figure I.2:Les types de répétitions des ornements architecturaux [2]

3. Industrialisation des ornements

Les ornemanistes ont largement participé à la définition des ornements, mais ce sont les industriels qui les produisent et les commercialisent, ont rendu populaire la culture architecturale et en particulier les styles architecturaux.

La première exposition universelle qui eut lieu à Londres, en 1851, dans le Crystal Palace est à la fois le couronnement de cette production et le signal de la révolte des artistes et des intellectuels contre la manipulation insouciant des styles du passé par l'industrie. Ils tiennent conscience du défi de la production industrielle aux arts ou l'ornementation est inclus dans ces arts, elle modifie complètement, par les mécanismes de la série, la signification et l'usage. Pendant la première moitié du XIX siècle, plusieurs pays d'Europe utilisent de nouvelles machines qui permettent désormais de produire des objets en série [3].

L'ornement jusqu'au l'artisanal est réservé à une clientèle limitée, va pouvoir connaître un essor important comme source d'inspiration, grâce à la nouvelle technique apprise avec la révolution industrielle.

Cette évolution technique admettre de d'élaboré des modèles : le moulage et l'estampage permettent la complication et la précision du dessin, les matières les plus nobles peuvent être contrefaites.

L'art et l'artisanat sont des valeurs respectables qui avaient été jusqu'alors proposées à l'appréciation des élites cultivées ou l'admiration respectueuse du peuple. Les ornements artisanaux sont considérés comme étant des objets témoignaient d'un patient et passionné du travail, soudain avec l'apparition du l'industrialisation ils sont galvaudés, ils entrent dans l'univers de consommation (Figure I.3).

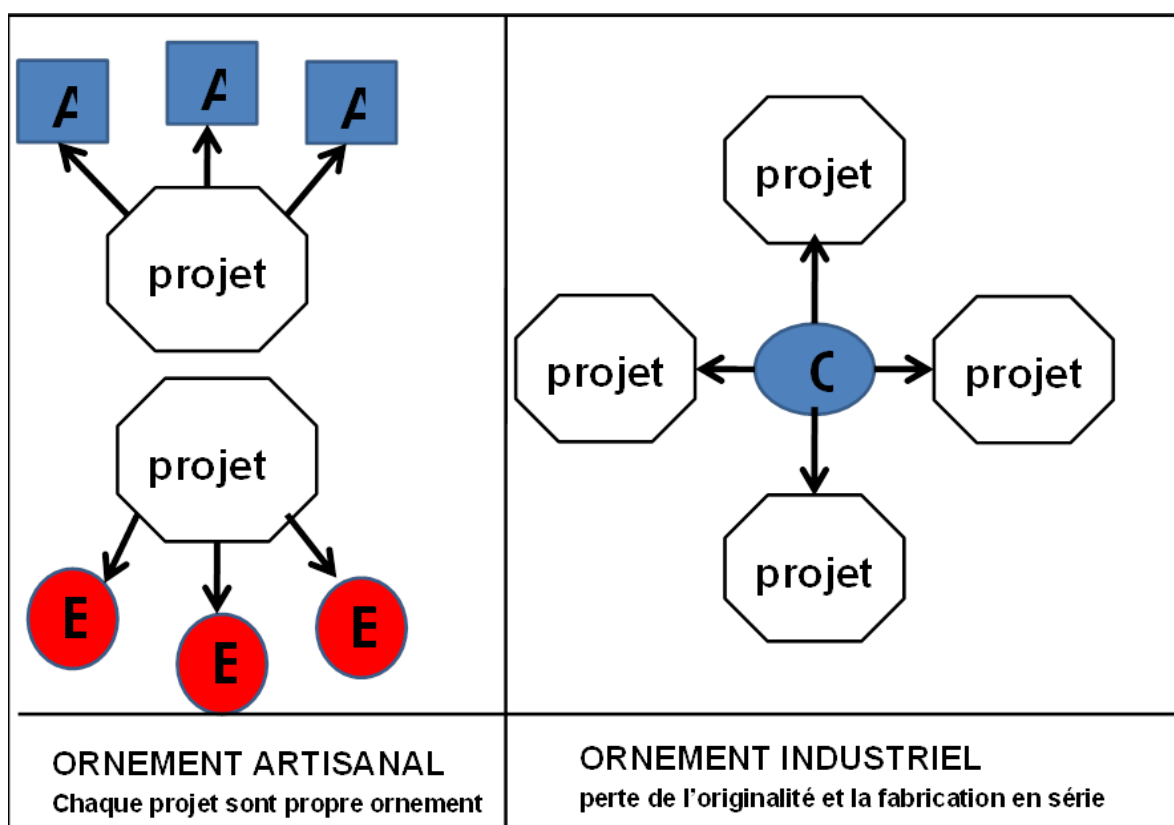


Figure I.3: La différence entre les ornements selon le type de fabrication

La première fonction de l'ornement est alors de cacher la matière brute, et la production industrielle empruntait aux arts ce qui leur était traditionnellement propre.

« On pensait que, grâce à la machine, on pourrait produire, en mieux, tout ce qui dans le passé montrait encore les défauts et les irrégularités du travail manuel. »[4].

Cette conscience eut la vie longue, bien que beaucoup se fussent rendu compte, dès le début du XIXe siècle, de l'impossibilité d'établir par la production de copies, même avec des variantes, une base viable pour l'art contemporain.

La réaction contre l'objet surchargé se manifesta à l'apogée de la fabrication industrielle de l'ornement, alors que la dissociation entre celui-ci et sa fonction, (Tableau I.1) montre les avantages et les critiques de types de mise en œuvres des ornements.

Tableau I.1: Les avantages et les inconvénients des ornements selon le type de fabrication

Type de mise en œuvre	Description	avantage	Inconvénients
Ornement Artisanal	-Fabrication et montage confondus: exécuté sur des ateliers particuliers mais avec l'utilisation des éléments préfabriqués comme, pièces de charpente...) -Chaque immeuble commande son propre ornementation	-précision dans la fabrication des ornements. -l'appréciation de la touche artistique dans les détails de produits. -l'originalité des ornements	-Perte de temps. -qualité de produit variables.
Ornement Industriel	Dissociation de la fabrication et du montage. -la fabrication des ornements répond à la commande de nombreux chantier.	-Rapidité de la production des produits.	-perte de l'originalité des ornements

4. Les motifs de l'ornement

Le motif est une composante de l'ornement, veux dire que l'ornement est concerté d'un ou plusieurs types de motif, Les procédures de description et des études détaillées sur l'ornement participent largement à la production des catalogues classés par techniques ou par thématiques, historiques et même par des motifs.

4.1. Motif géométrique

L'architecture qui utilise la trame géométrique pour son ornementation est l'architecture arabe car le Coran interdit toute représentation humaine ou animale. Cette décoration est fondée sur les tracés orthogonaux, généralement sans représentation précise, c'est un jeu de combinaison géométrique (lignes horizontales, verticales, obliques) c'est une décoration abstraite.

4.2. Motif des figures symboliques

L'ornement est un élément au rôle d'animer ou de souligné un point architectural important, exprimé par le sujet choisi des sentiments en une idée, c'est un élément significatif, le classicisme développe plus cette valeur symbolique, jusqu'au caractère figuratif de l'ornement.

4.3. Motif animal

Les formes animales ont été plus rarement utilisées. Il s'agit souvent d'animaux symboliques, comme le lion, le bœuf, le cerf, l'aigle, le bélier et parfois des poissons, coquillages et de serpents.[5].

4.4. Motif végétal

Depuis les temps les plus reculés, l'immense variété des végétaux a fait la plante l'un des motifs les plus utilisés dans la décoration.

Si l'on trouve l'ornement géométrique à l'origine de toutes les civilisations, l'ornement végétal semble au contraire avoir été utilisé à l'apogée de cette même civilisation et l'emploi du motif végétal se trouve généralisé dans les plus brillantes périodes de l'histoire de l'architecture, on peut distinguer deux motifs végétales les plus marqué.

4.4.1. Motif floral

L'ornement floral, plus ou moins stylisé, est présent dans de nombreux domaine de décoration. L'ornement floral peut être abstrait et inventé complètement : il peut être une imitation parfaite d'un modèle, il peut enfin être dérivé de ce modèle dont il s'inspire tout en l'interprétant d'une façon personnelle [5].

4.4.2. Motif des feuilles

Les feuilles peuvent s'inscrire dans des formes géométriques, par exemple la feuille de lierre qui s'adapte à la forme pentagonale, comme il est possible arriver à assimilé toutes les formes des feuilles a d'autre figures géométriques : triangles, carrés, cercles, losanges, hexagones.

5. Les supports d'ornement

L'ornement souligne les formes, accentue certains éléments et contribue à lier les différentes parties entre elles. Sa présence peut renforcer le caractère de l'objet auquel il s'applique, l'objet représente le support alors c'est celui qui porte l'ornement, Il existe plusieurs objets ou supports des ornements qui sont mentionnés dans le tableau I.2.

Tableau I.2: Les différents supports des ornements

Support de l'ornement		
1-le meuble		
Table	Chaise	Armoire
2-plafond		
Plat		Coupole
3- intérieur		
Panneau	Sol	Escalier
4-façade		
Habitat		Equipement

6. La façade comme un support des ornements architecturaux

6.1. Introduction

La façade en tant que composante principale des édifices érigés au rang de patrimoine, est un élément principal, nécessaire à l'identification et à la connaissance de ces objets patrimoniaux auquel elle est associée.

Le rapport de l'ornement et de l'objet qu'il décore est intrinsèque, et il est parfaitement impossible de les séparer.

6.2. Définition de la façade

Le mot façade vient du mot latin « facie » ou la face vient de la « perception » dont du « regard », l'homme préhistoire utilisait la façade comme support pour ces représentations avant l'écriture et pour transmettre des messages sémantiques, mais aussi des représentations de la vie sociale et des projections religieuses [6].

6.3. Les composantes de la façade

Il existe plusieurs supports des ornements, la façade est l'une de ces supports, La façade n'est pas juste un simple mur percé d'ouvertures. Elle est une enveloppe, une membrane, le lieu de multiples échanges entre l'extérieur et l'intérieur, l'environnement naturel et le bâti.

DEILMANN dans son ouvrage définit trois fonctions pour la façade [6], la première est fonction protectrice contre les étrangers et les ennemis, contre le public et contre les intempéries est la raison primaire, la deuxième transitaire ou la façade assume la fonction de « transition », de « traversée », de « passage ».

Chapitre I: Etude architecturale des ornements -Cas du centre-ville de Mostaganem

Elle agit comme un « filtre » ; elle doit être perméable, accueillante pour certaines personnes, pour la lumière et, par contre, protéger des regards directs, des pertes de chaleur (tout en permettant une visibilité aussi bonne que possible).

La troisième une fonction représentatif [6] Cette fonction est prise en soins par les architectes à travers le traitement de la façade, la décoration est l'une des solutions de ces traitements par les ornements architecturaux.

Il existe plusieurs composantes de la façade qui jouent un rôle soit fonctionnelle comme les fenêtres et les balcons ou esthétique comme les frontons ou les corbeaux, ces composantes forment une terminologie architecturale (Figure I.4).

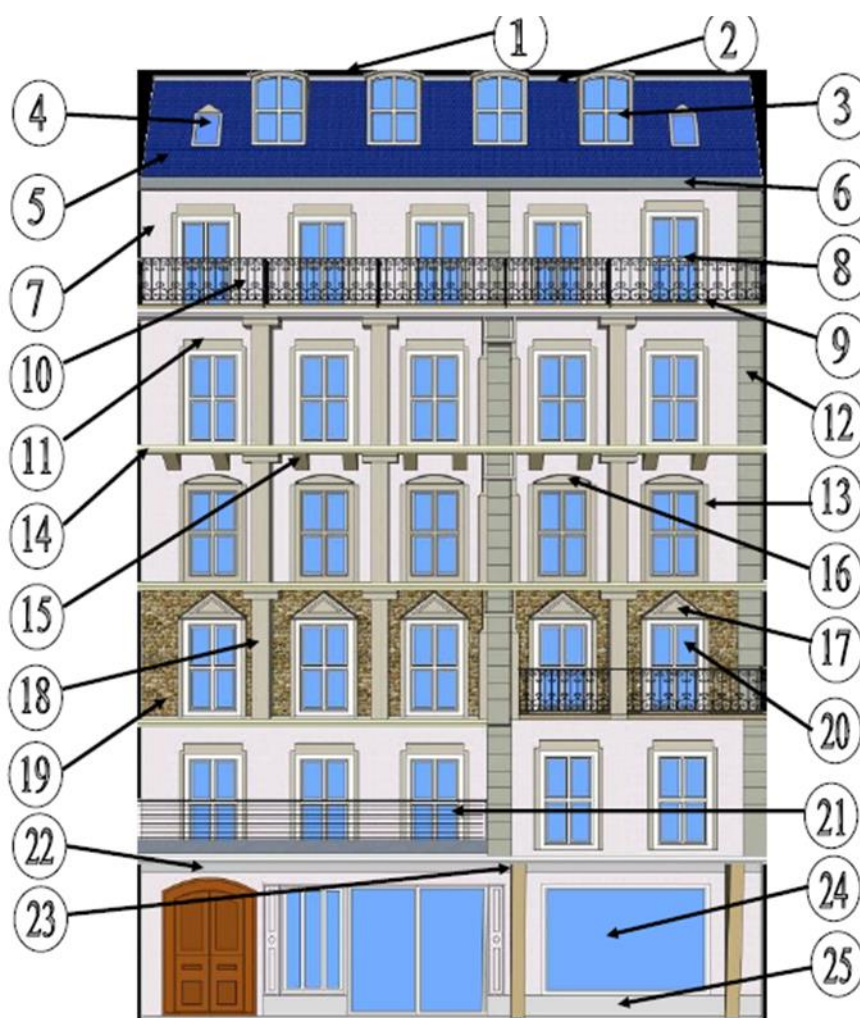


Figure I.4 :Les différentes composantes de la façade [2]

Chapitre I: Etude architecturale des ornements -Cas du centre-ville de Mostaganem

Tableau I.3:Les différentes composantes de la façade [2]

Composantes	Définition	
Faîtage	Pièce de recouvrement (ex. : tuiles faîtières) assurant la jonction entre les deux pans d'une toiture.	1
Membron	Baguette en plomb ou zinc en faîtage.	2
Lucarne	Ouverture en saillie percée en toiture afin d'assurer un apport lumineux dans les combles.	3
Châssis de toit	Fenêtre percée en toiture pratiquée dans le sens de la pente - également "fenêtre de toit".	4
Brisis	Partie inférieure d'un pan de toit "brisé"	5
Chéneau	Conduit en métal, terre cuite ou en pierre situé à la base d'une toiture, destiné à recueillir l'eau de pluie et à la conduire vers tuyau de descente.	6
Parement enduit	Revêtement consistant en une couche de plâtre, de mortier ou en crépis.	7
Barre d'appui	Barre à hauteur d'appui d'un balcon, d'un garde-corps ou d'un escalier.	8
Balcon	Plateforme en saillie d'un mur.	9
Barreaudage	Ensemble de barreaux.	10
Linteau	Pièce horizontale en partie supérieure d'une ouverture ou d'une baie soutenant la maçonnerie.	11
Chaîne d'angle	Assemblage vertical de pierres de taille ou de moellons en jonction des murs périphériques (extérieurs).	12
Moulure d'encadrement	Encadrement en relief des baies ou des ouvertures.	13
Corniche	Couronnement continu en saillie du bâtiment ou d'un de ses éléments de composition.	14
Corbeau	Pièce en relief sur le parement de la maçonnerie destinée à supporter un élément d'avant-corps : linteau, corniche.	15
Fronton arqué	Couronnement en saillie d'une façade ou d'une baie en forme demi-circulaire, sur base horizontale.	16
Fronton triangulaire	Couronnement en saillie d'une façade ou d'une baie de forme triangulaire.	17
pilastre	Pilier adossé ou intégré à un mur.	18
Parement en pierre	Revêtement consistant en un assemblage de pierres de taille ou de moellons	19
Baie	Ouverture ménagée dans une paroi extérieure servant à l'éclairage, le passage ou l'aération. Une paroi transparente ou translucide est considérée comme une baie	20
Garde-corps	Barrière de protection à hauteur d'appui destiné à empêcher les chutes accidentelles.	21
Bandeau	Moulure horizontale ou verticale continue intégrée au nu extérieur d'une façade.	22
Console	Moulure en relief sur le parement de la maçonnerie destinée à porter un élément d'architecture en large saillie d'une façade : oriel, balcon.	23
Vitrine	Devanture vitrée d'un commerce.	24
Soubassement	Socle continu en partie basse d'une baie, d'une porte ou d'une clôture.	25

7. Vocabulaire des ornements architecturaux dans les façades coloniales

L'ornement souligne les formes, accentue les éléments de la façade et contribue à lier entre les différentes parties de la façade. Sa présence peut renforcer le caractère de l'objet auquel il s'applique, l'objet représente le support alors c'est celui qui porte l'ornement.

La façade autant qu'un support des ornements architecturaux, elle est considérée comme un élément complexe y compris plusieurs et différentes composantes, certaines de ces dernières jouent un rôle fonctionnel tel que les ouvertures qui permettent la pénétration de la lumière, et des composantes qui assure la protection comme les linteaux qui protègent contre les intempéries. Tandis que d'autres composantes ont la fonction esthétique, et peuvent être ornées et décorées, comme les corbeaux et les frontons (**Figure I.5**).

a). Ferronnerie des balcons : Balcons, impostes et grilles de fenêtre sont toujours équipés la façade pour la protection, Ces éléments sont caractérisés par un dessin très contrasté-

b). Linteaux : Le linteau est un élément architectural, qui sert à soutenir les matériaux du mur au-dessus d'une baie, d'une porte, ou d'une fenêtre.

c). Corbeaux : Un élément saillant d'un mur

d). Les corniches : Couronnement orné qui fait saillie sur la partie supérieure, elle est le plus souvent horizontale

e). Les frontons : Un couronnement composé d'un cadre mouluré et d'un tympan

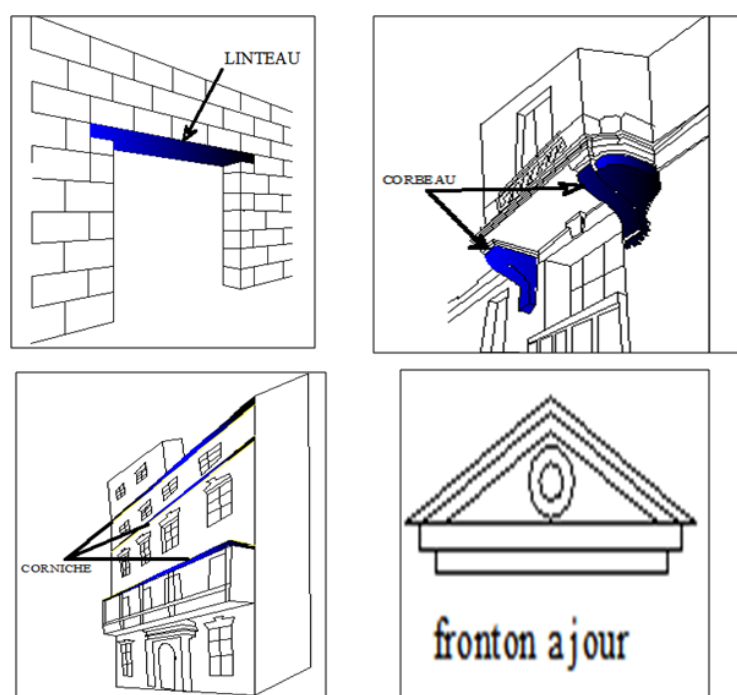


Figure I.5: Les composantes ornées de la façade.

8 Les étapes d'une étude architecturale des ornements architecturaux

8.1 Introduction

Il s'agit d'une série des étapes qui consiste à être clair, objectif, précis et facile dans son usage, en donnant une grande importance à différentes phases afin de choisir le type d'intervention. (Tableau I.4)

Tableau I.4:Les étapes proposées pour l'analyse des ornements architecturaux [7]

Les étapes de l'analyse	Domaine	Les étapes du domaine	Détailles d'une étape
Lecture de la façade	Domaine historique	-historique	-occupation initiale
		-date de réalisation	
		-style de réalisation	-néo-classique - éclectisme -art déco-art nouveau
	Domaine architectural	-localisation	
		-nombre des façades	
		-largeur de la façade	
		-hauteur de la façade	Nombre des étages
		Caractéristiques de la façade	Symétrie/asymétrie
			Présence d'un corps central
		Type des ouvertures	Métaphore
Dimensions			
ornements par rapport à la façade	Domaine architectural	Nombre des ornements	Paire/impaire
		Position des ornements sur la façade	Haut/bas
			Les cotés/central
			Symétrique/sur l'ensemble
		Type de répétition	Simple/complexe
			Aléatoire
	Centrale		
des ornements isolés	Domaine architectural	Taille des ornements	Bas-relief/moyenne/statu
		dimension des ornements	Longueur/largeur/épaisseur
		Type des motifs	Géométrique-écriture
			Végétal-animal
			Humaine
		Caractéristiques des motifs	Taille-position
	Type d'organisation		
	Domaine constructif	Matériau de fabrication	La surface couverte sur l'ornement
		Les pathologies	Pierre –pâtre –stuc-staff
			Effacement du dessin de motif
Apparition des micros fissure			
Apparition des grandes fissures			
Décollement partiel			
Décollement total			

A travers ce tableau, on peut constater que l'étude architecturale est composée deux étapes [8]:

8.1.1. Lecture de la façade

Tous travaux de récupération des éléments sensibles tels que les ornements, nécessitent au premier lieu une bonne connaissance de son support, cette méthodologie demande une démarche logique de la lecture de la façade, allant de la simple observation visuelle jusqu'à la classification de la typologie de la façade (**Tableau I.5 et I.6**)

8.1.2. Analyse des ornements

Elle représente la deuxième étape, cette dernière est composée de trois phases :

a). Analyse des ornements par rapport à la façade : Les ornements architecturaux sont considérés comme des composantes de la façade, dans cette phase il s'agit d'analyser les ornements comme une entité ou un regroupement sur son support (**Tableau I.7**)

b). Analyse des ornements isolés : Dans cette phase nous avons isolé l'ornement hors de son contexte et de son support, où on a choisi un type représentatif (linteau, corbeau, corniche, fronton...). Dans laquelle on a étudié ses proportions, ses motifs et d'autres caractéristiques (**Tableau.8 et 9**)

c). Analyse des ornements au domaine constructif : Nous avons appliqué dans cette phase la même démarche comme la précédente, mais l'ornement est analysé dans le domaine constructif, c'est à dire suivant ses matériaux de fabrication, et suivant le type de ses pathologies.[7]

Tableau I.5: Phase de lecture de la façade.

Fonction initiale de l'immeuble			
Habitat individuelle	Habitat collectif	Habitat collectif intégré	équipement
Epoque de réalisation			
Poste colonial (avant 1830)	Colonial Entre 1830-1962	Précolonial Après 1962	
Style de la façade			
Baroque	néoclassique	Art nouveau	
Art déco	Eclectique	Moderne	

Chapitre I: Etude architecturale des ornements -Cas du centre-ville de Mostaganem

Tableau I.6: Phase de lecture architectural de la façade.

Nombre et largeur des façades			
4 façades	2 façades	3 façades	1 façade
Hauteur de la façade			
R+1	R+2	R+3	R+4
Types d'angle de coin des façades			
Unidirectionnel=90°	Unidirectionnel ≤90°	Unidirectionnel ≥90°	
Bidirectionnelle	Bidirectionnelle	Bidirectionnelle	
Type de la façade			
simple avec étage répétitif	simple avec entresol	avec balcons filants	
Avec balcons isolés	Mixe entre filant et isolé	Avec un corps central	
Caractéristique de la façade			
Symétrie		Asymétrie	
Type d'ouverture de la façade			
Plat	Arc surbaissé	Arc en plein cintre	

Tableau I.7: Analyse des ornements architecturaux sur la façade

Nombre des ornements			
Unique	Double	Moyen	Autre
Position des ornements sur la façade			
Haut	Bas		Les coté
Centrale	Symétrique		l'ensemble de la façade
Type de répétition			
Simple		Aléatoire	
Central		Complexe	

Tableau I.8: Analyse des ornements architecturaux isolés

Taille		
Petite	Moyenne	grande (statuette)
Epaisseur		
Imprimé	Relief	En creux
Type des motifs		
motif géométrique	Motif florale	Motif des feuilles
motif humain	motif animal	Carractère écriture

Tableau I.9: Caractéristique des motifs d'un ornement architectural

-Caractéristique des motifs				
1-taille				
Petite	Moyenne		Grande	
2-Composition				
Horizontal	Vertical	oblique	Central	autre
3-Type d'organisation				
Organisation en symétrie pure		Organisation en symétrie pure		Organisation asymétrique
4-Position des motifs				
Haut	Bas	centre	Latérale	autre
5-Surface couvert				
10%	10 à 25%	25 à 50%	50 à 75%	75 à 100%

9 Etude architecturale des ornements architecturaux des façades de la ville de Mostaganem

Cette partie pratique vise à l'application d'un guide de récupération des ornements architecturaux des façades du centre-ville de Mostaganem qui possède un grand nombre d'immeubles coloniaux, pour une meilleure analyse nous avons sélectionné les immeubles considérés comme des échantillons plus représentatifs à notre corpus de travail (riche en matière d'ornementation de style art déco et art nouveau).

Cette partie pratique vise à établir une étude analytique des ornements architecturaux des façades du centre-ville de Mostaganem.

Mostaganem est une ville côtière située à 360 km à l'ouest d'Alger, comme plusieurs villes algériennes a subi à une mutation de son paysage architectural où l'occupant français avait enclenché le dogme urbanistique de la ville en la transformant à une ville occidentale.

On distingue une certaine logique au niveau de localisation de composante de la ville dans laquelle on identifie deux tissus urbains, séparés par une barrière naturelle du rivièrè Ain Safera (**Figure I.6**)

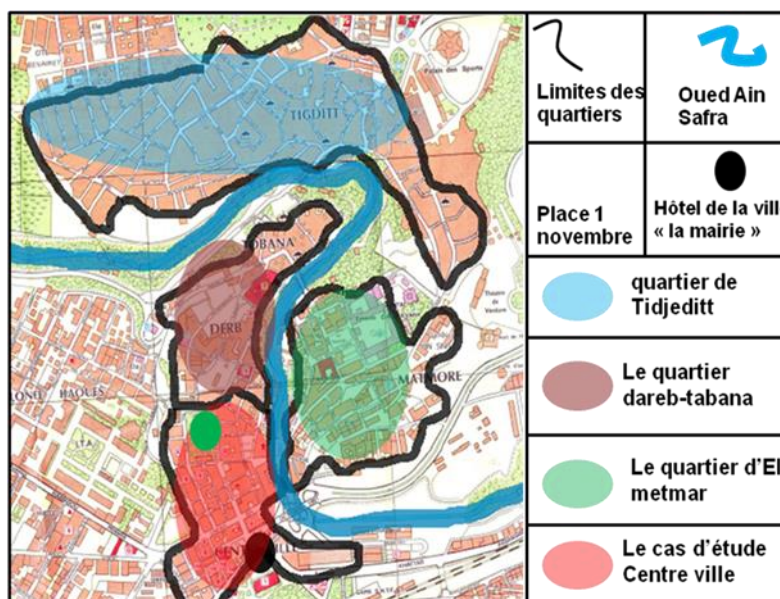


Figure I.6: Les quartiers du centre-ville de Mostaganem

La typologie de l'ensemble est significative de l'expression d'un modèle d'intégration aux données physiques du site cette rivière. Ces deux tissu urbains correspondent chacun à une période particulière et beaucoup plus distinctive: l'une précoloniale Le quartier d'El-metmar dareb-tabana ,Tidedjitt et l'autre, coloniale alors le centre représente une composante importante de cette ville d'où L'héritage colonial architectural de 19^{eme} et 20^{eme} siècle constitue une partie importante du cadre bâti du centre-ville [9].

9.1. Lecture des façades

L'Algérie a connu sous la colonisation française un nouveau vocabulaire avec des langages architecturaux importés de la métropole [10], alors Mostaganem à l'instar des villes algériennes connu durant la période coloniale la diffusion des styles suivantes :

-Néoclassique : entre 1730 et 1925 exprime l'élégance traditionnelle, qui signifie la recherche de la noblesse des édifices gréco-romains, caractérisé par l'utilisation des ornements en pierre souvent dans la partie haute.

-Eclectisme : entre 1830 et 1870 empruntant ses éléments à des écoles souvent très différentes caractériser par une surcharge des ornements.

-Art nouveau : entre 1890 et 1914 en réaction contre la production industrielle, introduisit par des courbes inspirées de la nature, des façades ornementées par motif des fleurs, des oiseaux, des femmes statues, alors un retour de la nature est déclaré.

- Art déco : entre 1925 et 1937 il constitue l'étape de la transition vers le mouvement moderne, l'innovation essentielle de ce style est la droite, la décoration est toujours présente mais reste très simple. Les ornements sont inspirés de l'architecture Egypte ancienne

Chapitre I: Etude architecturale des ornements -Cas du centre-ville de Mostaganem

-Moderne : 1920 et 1960 il est caractérisé par le refus de l'ornementation qui est considéré comme un placage [10].

Notre étude sera focalisée sur les façades de style ornementé, Le centre-ville possède un grand nombre des immeubles coloniaux, pour une meilleure analyse nous avons sélectionné les immeubles considérés comme des échantillons plus représentatifs à notre corpus de travail (riche en matière d'ornementation) et pour que notre recherche scientifique tourne vers l'exhaustivité, nous avons étudié 10 immeubles. **(Figure I.7)**.



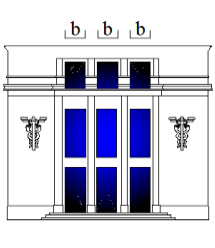
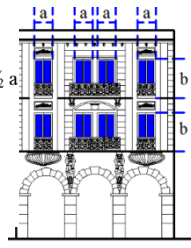
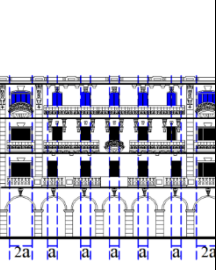
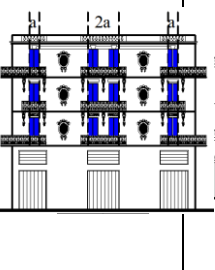
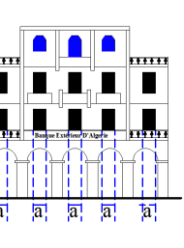
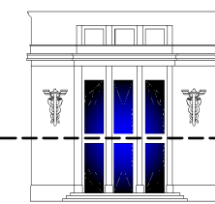
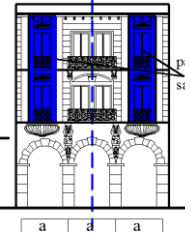
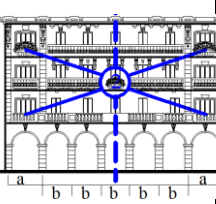
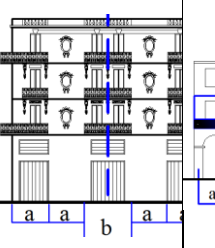
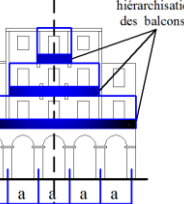
Figure I.7: Façades des immeubles du centre-ville de Mostaganem à analysés.

Après l'identification des styles architecturaux des façades coloniales nous avons constaté la dominance du style art déco, la répartition des styles est **(Tableau I.10)** :

- Un immeuble d'équipement de style néoclassique :10%
- Cinq immeubles d'habitation et quatre équipement de style art déco : 50% .
- Quatre immeubles d'habitation de style éclectisme : 40% .
- Un immeuble d'habitation de style art nouveau : 10%

Chapitre I: Etude architecturale des ornements -Cas du centre-ville de Mostaganem

Tableau I.10: Lecture des façades

Caractéristique	équipement	Immeuble d'habitation	Immeuble d'habitation	Immeuble d'habitation	équipement
style	néoclassique	Art nouveau	éclectisme	Art déco	Art déco
Nombre des constructions	01	02	08	06	04
Date de réalisation	1938	1895	1914	1915	1916
Hauteur	h=27.00m	h=14.00m	h=18.00m	h=18.00m	h=18.00m
largeur	a =6.00m b=5.00m 27.00	a=4.00m	a =4.00m b=6.00m	a =4.00m b=6.00m	a =4.00m b=6.00m
Type des ouvertures					
			a =1.20 m b=2.40m	a =1.20 m	a =1.20 m
Autres caractéristiques					
	Symétrie horizontal	Présence partie saillante	Elément centrale	symétrie	Hiérarchisation des balcons

Nous avons tiré des résultats qui permettent d'établir les caractéristiques suivantes :

a)-la tripartition : c'est une sorte de métaphore du traitement de la façade par le corps humain (base, corps, tête), ARISTOTELE définit cette notion par le début, un milieu et une fin de la façade, les façades coloniales du centre-ville à l'exception du palais consulaire se caractérisent par une organisation tripartite qui définit un commencement, une continuité et un achèvement selon trois sections, la première est une section de départ : qui établit un rapport avec l'urbain et subit généralement un traitement démarquant (galerie avec des arcades.), la

Chapitre I: Etude architecturale des ornements -Cas du centre-ville de Mostaganem

deuxième section centrale : elle est animée par des balcons, les rythmes et parfois les oriels. Et la dernière section d'arrivée : qui évoque un rapport au ciel.

b). Les limites : toutes les façades sont marquées par des bandes verticales qui lance les extrémités de la façade, elles sont toujours présentées même si l'immeuble occupe l'ensemble du parcellaire, tandis que les limites horizontales sont fournies par une série de pilastre.

c). Types des ouvertures : pour les quatre styles les ouvertures verticales de la forme rectangulaire avec un module d'où la hauteur est deux fois la largeur.

d). Les travées : on distingue que les façades sont structurées à partir des travées identiques du 5.8 m marqué par les pillées des arcades. A l'exception de deux immeubles d'où l'extrémité des arcades a une largeur plus importante.

e). La symétrie : toutes les façades ont du traitement symétrique.

9.2. Analyse des ornements architecturaux par rapport à la façade

Les ornements sont considérés comme des composantes de la façade, dans cette phase il s'agit d'analyser les ornements comme une entité ou un regroupement sur son support.

Tableau I.11: Analyse des ornements architecturaux par rapport à la façade

Caractéristique	équipement	Immeuble d'habitation	Immeuble d'habitation	Immeuble d'habitation	équipement
style	néoclassique	Art nouveau	éclectisme	Art déco	Art déco
Nombres des corbeaux		02 au RDC et 02 au premier étage	07 au RDC et 10 au deuxième étage	07 au première étage et 07 au deuxième étage	
Type de répétition	/	Par série	Par série	Par série	Individuelle
Position	/	latérale	Latérale	Latérale	latérale
Nombre des frontons		02 au premier et 02 au deuxième étage	05 au deuxième étage et 05 au troisième étage.	04 au premier et deuxième et troisième étage	04 au deuxième et troisième étage
Type de répétition	individuelle	Par série	Par série	Par série	Par série
Position	centrale	centrale	centrale	Centrale	latérale
Motif	animal	végétal	Mixte	Végétal	végétal

A partir d'une analyse approfondie des données collectées, nous avons tiré des résultats qui nous a permet d'établir une liste des caractéristiques des ornements architecturaux, nous allons essayer de présenter les caractéristiques semblables et dissemblables.

Nous remarquons la prédominance des motifs végétaux, notamment le floral et motifs géométriques sont moins utilisés puisque la dominance était orientée fortement vers les formes organiques, par contre on remarque l'absence des motifs animales à l'exception d'une tête de lion dans des bas-reliefs et on remarque peu de visages humains. (Figure.I.8)

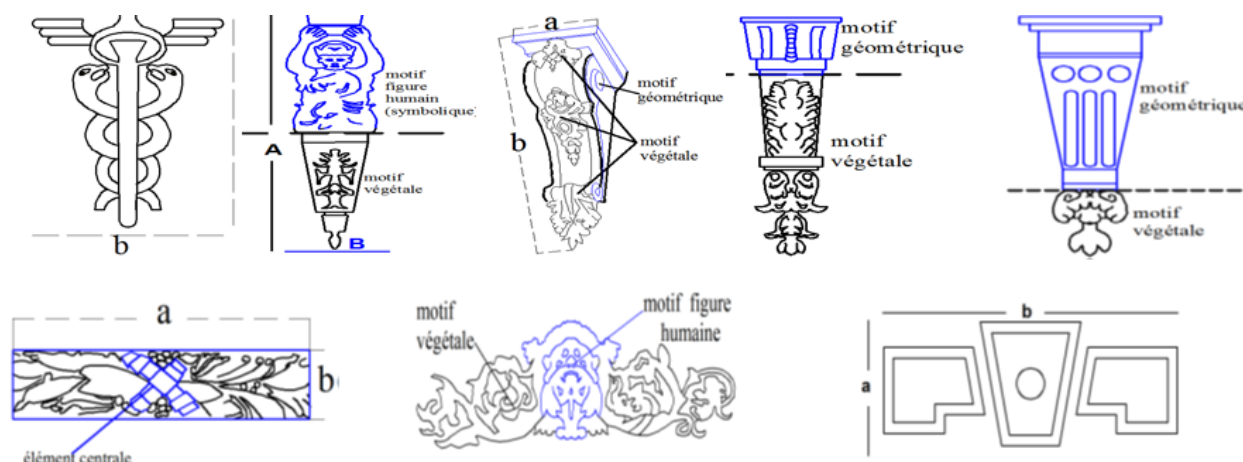


Figure I.8: Motifs des ornements architecturaux[7]

a). Caractéristiques semblables :

- La symétrie :** Est l'une des caractéristiques les plus partagées et utilisées soit au niveau de la conception des façades, au niveau des ornements ou des motifs.
- Les proportions :** les ornements architecturaux ont généralement des proportions dimensionnelles identiques.
- Les corbeaux :** Ce sont des ornements architecturaux les plus exploités et les plus décorés.
- Les bas-reliefs :** Ils sont considérés comme un type des ornements architecturaux largement usé au niveau de fronton, grâce à ses épaisseurs très réduites qui permet d'avoir un poids léger, il résulte un bon accolement sur la façade pour cela ils sont toujours en bon état.

b). Caractéristiques dissemblables :

- Originalité** Chaque immeuble possède sa propre ornementation architecturale et ses motifs sauf quelques ornements de traitement identique comme la forme arrondie sous les balcons isolés
- Hiérarchisation ornemental aux étages :** Chaque étage n'est pas identique aux autres, il existe une distinction claire et d'une façon hiérarchique généralement le dernier étage est le plus ornementé.
- Nombre des ornements :** Les immeubles d'habitation disposent un grand nombre des ornements contrairement aux équipements qui ne disposent qu'un nombre réduit.

-Type des motifs : L'utilisation d'un seul type de motif dans les différents équipements en revanche, il existe une combinaison entre les motifs pour les immeubles à l'usage d'habitation

10. Conclusion

Le patrimoine colonial du 19eme et 20eme siècle, forme un trésor inestimable en Algérie, il est considéré comme l'un des repères importants où, il occupe une partie non négligeable du parc immobilier algérien.

La richesse de ce portefeuille coloniale s'expose clairement au sein du traitement des façades de leurs immeubles qu'ils sont très décorés et embellies par des ornements architecturaux, Mostaganem à l'instar de plusieurs villes algérienne se distingue clairement deux types de façade, la première des façades décorées par des ornements architecturaux et l'autre sont lisses et simples de style moderne

En guise de conclusion, nous pouvons confirmer que les ornements architecturaux sont des éléments sensibles, et leur récupération exige une étude architecturale comprend deux étapes : la première étape correspond à la lecture globale de la façade, tandis que la deuxième est consacrée à l'analyse des ornements selon trois phases ; l'analyse par rapport à son support (façade), une analyse isolée, et la dernière phase, une analyse selon les types de matériaux et pathologies, l'ensemble des résultats obtenus lors de cette étude architecturale des façades du centre-ville de Mostaganem, nous permettent de classer cinq formes de pathologies des ornements architecturaux : apparition des grandes fissures et des trous, effacement de dessin des motifs, apparition des micros fissures décollement total des ornements architecturaux et un décollement partiel d'où la partie inférieure reste collée.

Chapitre II :

Généralités sur le plâtre.

1. Introduction

Les liants minéraux sont des substances finement pulvérisées qui peuvent former avec l'eau une pâte collante, qui durcit progressivement et qui prend la consistance de la pierre. Le durcissement de la pâte (c'est-à-dire sa transformation en une matière analogue à la pierre) est le résultat de phénomènes physiques et chimiques qui se déroulent entre le liant et l'eau.

Dans les travaux de construction, on emploie les liants minéraux mélangés soit avec l'eau, soit avec l'eau et des agrégats, qui peuvent être du sable ou du gravier[11]. D'après la composition, on distingue trois types de mélanges :

- a) Pâte : qui est un mélange de liant et de l'eau
- b) Mortier de sable : mélange de liant, d'eau et d'agrégats fins (sable)
- c) Béton : mélange de liant, d'eau et d'agrégats fins et gros.

Certains liants minéraux possèdent des caractéristiques communes qui permettent de les classer en plusieurs groupes, il existe trois caractéristiques principales qui sont à la base de cette classification :

- a) Les propriétés du liant elles-mêmes qui déterminent le domaine de son application.
- b) Les matières premières employées pour obtenir le liant, et qui détermine sa composition chimique.
- c) Les caractéristiques technologiques de la fabrication, par exemple la température et la durée de cuisson.

Les caractéristiques les plus importantes pour le constructeur sont les propriétés proprement dites du liant. Il est connu que certains liants durcissent seulement à l'air, tandis que d'autres peuvent durcir dans un milieu humide, et même dans l'eau. D'après cette dernière caractéristique, on classe les liants minéraux en liants hydrauliques et aériens. Les liants hydrauliques peuvent acquérir, conserver ou augmenter leur résistance mécanique d'une façon prolongée, ou seulement à l'air mais encore dans l'eau. Parmi ces liants, on peut citer le ciment Portland et la chaux hydraulique. Les liants aériens ne peuvent durcir et conserver longtemps, leur résistance mécanique n'augmente qu'à l'air. Parmi ces liants aériens, on peut citer, les liants de plâtre.

Dans le présent chapitre, nous exposerons des généralités sur le plâtre, à savoir son origine, ses caractéristiques, ses propriétés et ses différentes applications.

2. Le plâtre comme liant minéral aérien

Le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction utilisé par l'homme. Malgré qu'il soit rencontré quotidiennement, l'homme de bâtiment ne connaît pas toujours les divers aspects et possibilités d'applications.

Le plâtre est un matériau de grande disponibilité et très connu pour ses qualités, contrairement au ciment, le plâtre est un matériau très intéressant sur le plan scientifique. C'est un liant aérien, mais avec une structure nettement plus simple que celle du ciment[11]. Il est favorable à la protection de l'environnement, assez malléable, de faible densité, aux propriétés fonctionnelles remarquables (coupe-feu, isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie des enceintes, décoratif, ...), ce qui justifie l'intérêt accordé à ce matériau pour les constructions. Sa grande fragilité préoccupante est à l'origine des travaux de recherches dans le monde entier en vue de son renforcement.

2.1. Historique

Le plâtre est un matériau de construction d'utilisation très ancienne, les plus vieilles ont été au moyen orient. Elles datent du VIème millénaire avant J.-C. ; aux IXème siècles avant J.-C. Les constructeurs de la Syrie transformaient déjà le gypse en plâtre, un matériau, qui allait être utilisé en maçonnerie ou dans la décoration pour les habitations populaires comme pour les demeures princières. Les égyptiens en faisaient un grand usage et l'on cite souvent son emploi pour le scellement des blocs de plusieurs tonnes lors de la construction de la grande pyramide de Chéops [12]. Ils s'en servaient pour leurs monuments funéraires, leurs temples, et même pour la confection d'enduits destinés à recevoir une peinture murale.

On retrouve aussi l'utilisation du plâtre chez les grecs, les assyriens, les phéniciens. Le philosophe grec Théophraste en parle dans son traité (de la pierre) en 370 avant J.-C. Les romains l'utilisèrent semble-t-il assez peu, bien que PLIN L'ANCIEN en décrive la fabrication dans ses livres sur « l'histoire naturelle », 100ans avant J.-C.[11].

3. Généralités et caractéristiques du plâtre

3.1. Définition

Le plâtre est un liant peu connu par les scientifiques, tandis que le ciment a pris sa place dans les travaux de recherche malgré que le plâtre est toujours appliqué dans le domaine de la construction.

En fait, c'est un liant en poudre à base de sulfate de chaux anhydre, provenant de la déshydratation des pierres de gypse suivie d'une pulvérisation plus ou moins poussée. La pierre de gypse du plâtre se trouve dans la nature sous deux formes :

-L'anhydrate ou le sulfate de calcium anhydrite répondant à la formule chimique CaSO_4 ; assez rare.

-Le gypse ou sulfate de calcium a deux molécules d'eau, répondant à la formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ce qui correspond à 7.07 % de sulfate de calcium associé à 20.93 % d'eau. Très abondant, c'est sous cette forme de gypse que la pierre de plâtre est employée pour fabriquer industriellement du plâtre[13].

3.2. Origines

Le gypse est un minéral courant composé de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) formé par précipitation du sulfate de calcium dans l'eau de mer. C'est donc une roche saline sédimentaire. Il peut aussi être formé par l'action de l'acide sulfurique sur le calcaire. Le gypse est très répandu dans les régions volcaniques. C'est une pierre qui appartient à la famille des évaporites qui sont les roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau[14].

Le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées, lorsque le niveau des océans augmente, les lagunes se remplissent (**Figure II.1**).

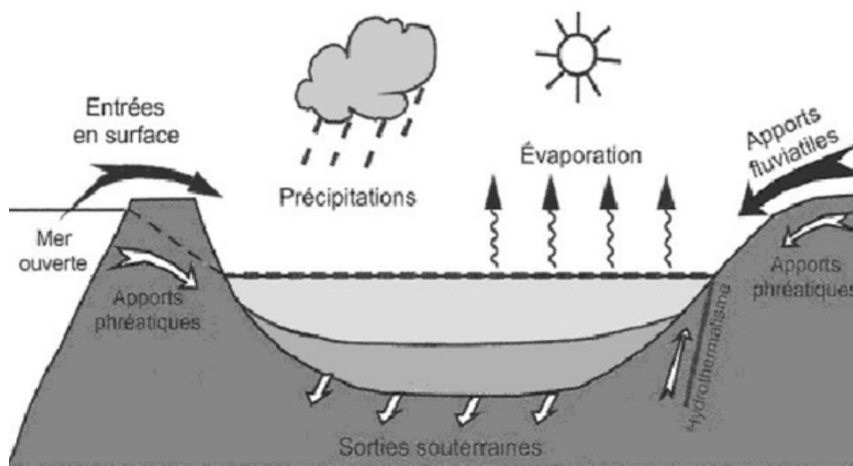


Figure II.1: Origine du gisement du gypse [15]

En Algérie, les études géologiques ont localisé d'importants gisements de très bonnes qualités dont la teneur en gypse dépasse les 75%[16].

Le plâtre résulte de la cuisson, à températures modérées, du gypse ou sulfate de calcium déshydraté. On peut obtenir toute une gamme de produits en retirant plus ou moins d'eau au gypse. C'est justement cette transformation qui est utilisée par les industries de production du plâtre, bien qu'ils soient tous appelés plâtres.

Ces produits présentent des formules chimiques intermédiaires entre celles des deux états naturellement stables, déshydrate $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ et l'anhydrite CaSO_4 [15]. Gâché, c'est-à-dire mélangé avec l'eau, les plâtres se réhydratent, font prise et durcissent pour redonner un sulfate de calcium bi-hydraté proche au gypse initial. C'est le processus de base de la construction en plâtre [13].

Les principaux phénomènes (déshydratation, hydratation) paraissent simples, cependant elles dissimulent une réalité beaucoup plus complexe. Il existe en effet une très grande variété de plâtre: plâtre de préfabrication, plâtre de construction gros et fin, plâtre pour enduits de haute dureté, plâtre à projeter, plâtre pour enduits extérieurs, plâtre à mouler pour l'industrie, plâtre médicaux, etc. ... Chaque carrière, chaque mode de traitement, et plus précisément chaque type de cuisson influe sur les caractéristiques du produit final.

Pour bien comprendre les raisons de cette diversité, il s'avère nécessaire d'étudier en premier lieu le système $\text{CaSO}_4, \text{H}_2\text{O}$, ensuite d'exposer les principaux traitements artisanaux et industriels mis au point, au premier plan desquels figurent les installations de cuisson.

3.4. Historique des recherches sur le plâtre

Les premières recherches sur le plâtre ont été faites par LAVOISIER, qui a présenté un mémoire sur l'analyse du gypse à l'académie royale des sciences de paris [12], puis par GAY-LUSSAC, ensuite LE CHATELIER en 1887 explique le phénomène de prise du plâtre dans sa théorie cristalloïde, qui a été ultérieurement généralisée au domaine des liants hydrauliques.

Vers 1903, VANT HOTT a pu déterminer les points de transformation du gypse suite à des études thermodynamiques. En 1926, CHASSEVENT présenta sa thèse intitulés (recherche sur le sulfate de chaux), il se consacra entièrement depuis à l'étude de ce matériau. On lui doit, l'explication et la quantification de plusieurs phénomènes grâce à l'application de méthodes physicochimiques les plus avancées. D'autres auteurs tels qu'ALBERCHT, ANDERON, KELLY, SOUTHARD et BUDNIKOFF se sont aussi intéressés à l'étude du plâtre [14].

4. Fabrication du plâtre

Les différents types du plâtre proviennent du gypse naturel, un minéral essentiellement composé de sulfate de calcium hydraté. Il peut être extrait à ciel ouvert ou en carrière souterraine (**Figure.II.2**). Le choix de gisement du gypse, le mode de cuisson et le broyage déterminent les caractéristiques de la variété du plâtre choisi. la température de

cuisson et les proportions des mélanges des composantes permettre d'obtenir la différente variété du plâtre.



Figure II.2: Gisement pour extraction du gypse

Le principe de fabrication du gypse de plâtre passe généralement par les étapes suivantes (Tableau II.1).

Tableau II.1: Etape de fabrication de plâtre[17]

N°	Etape	Description
1	L'extraction	Le plâtre provient du gypse, un minéral essentiellement composé de sulfate de calcium hydraté. Il peut être extrait à ciel ouvert ou en carrière souterraine.
2	La réception du gypse et le calibrage	Les blocs de gypse extraits des carrières sont fragmentés en morceaux de plus en plus petits par des passages dans divers concasseurs à mâchoires, à cylindres ou à percussions. Pour réduire ensuite le grain des pierres obtenu par concassage, on procède à un broyage primaire à l'aide de broyeurs à percussion ou à marteaux oscillants. Le concassage-Broyage est suivi d'un classement des grains selon leur grosseur, qui s'effectue à l'aide de cribles.
3	Cuisson	La cuisson permet d'obtenir par une déshydratation plus ou moins poussée du gypse, les divers éléments constitutifs du plâtre : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O}$ Deux méthodes sont utilisées : Cuisson effectuée en milieu aqueux (voie humide) Cuisson par voie sèche.
4	Broyage	- Le broyage standard : Le plâtre est réduit en particules de 200µm grâce à un système de marteaux en rotation à l'intérieur d'un tamis (garantie d'une granulométrie maximale). Le broyage sélecté : Comme dans le broyage standard, le plâtre est broyé par des marteaux en rotation puis aspire à travers une cage d'écureuil en rotation. Selon son poids (donc sa taille), le grain de plâtre, soumis à 2 forces opposées (centrifuge et aspiration).

5. Caractéristiques structurelles du plâtre

Le terme plâtre ‘pur’ indique que nous considérons un produit composé de gypse naturel, ou chimique, plus ou moins déshydraté, sans aucun effet extérieur en usine ou sur chantier; car pratiquement il n'existe pas de plâtre chimiquement pur, on a toujours affaire à un mélange d'impuretés et de différentes phases du système $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$. L'exploitation du plâtre s'est développée. De nos jours, ce matériau est très utilisé dans les constructions pour ses qualités décoratives, de coupe-feu, de légèreté, d'isolant thermique et phonique et pour son faible coût [17].

De nombreux travaux de recherche ont été menés pour mieux comprendre ses propriétés, sa structure cristalline, son comportement vis-à-vis de l'environnement d'une part, et d'autre part pour améliorer son comportement mécanique.

Le cristal de gypse est de symétrie monoclinique, composé d'un empilement de couches d'ions calcium Ca^{2+} sulfate SO_4^{2-} (de forme tétraédrique) avec un atome de soufre au centre et des atomes d'oxygène au sommet, séparées par doubles couches d'eau (voir Figure II.3). Les travaux de S. MEILLE permettent de donner une idée bien précise. Le cristal de gypse est de symétrie monoclinique [17].

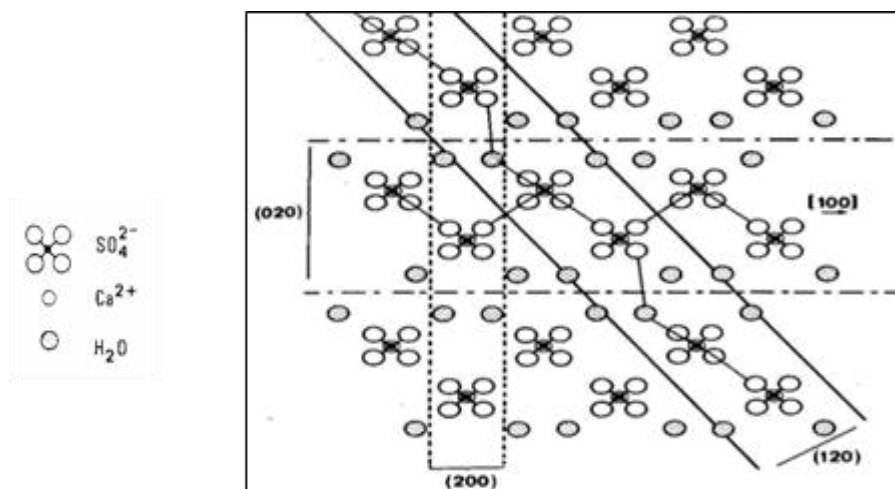


Figure II.3: Structure cristalline du gypse[17]

Il est composé d'un empilement de couches d'ions Calcium Ca^{2+} de forme tétraédrique avec un atome de soufre au centre et des atomes d'oxygène aux sommets. Ils sont séparés par des doubles couches d'eau. Cet empilement est bien visible dans la direction 001. Il existe deux types de liaison chimique entre les molécules :

- a) Liaisons ioniques dans les feuilles $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ due à la différence de charges électriques, ce sont des liaisons fortes.

- b) des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène, des ions de sulfate, l'atome d'oxygène de molécule d'eau étant relié à un ion de calcium, cette liaison est moins forte que la liaison ionique[15].

5.1. Morphologie des faces de cristaux de gypse

La morphologie la plus courante de cristaux de gypse est aiguille élancée dans la plus grande dimension, elle est orientée selon l'axe C[15]. Les faces de type (010) possèdent en surface des molécules d'eau, les faces de type (120) sont majoritairement des ions sulfates, et celle de type (-101) des ions de calcium, sulfates et des molécules d'eau (voir Figure II.4).

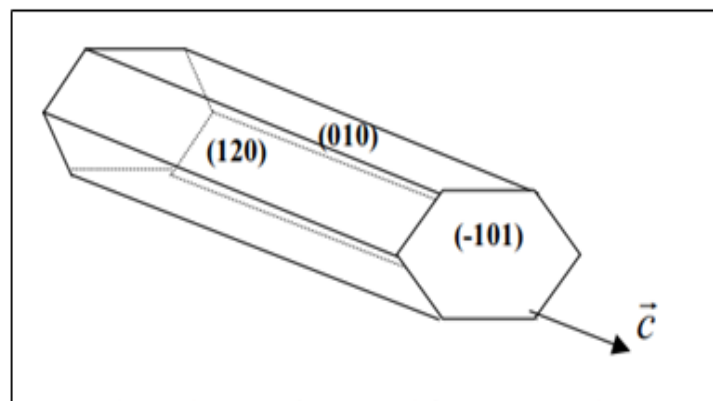


Figure II.4: Les faces de cristaux de gypse [15]

C'est possible de modifier des cristaux de gypse par l'utilisation des additifs, ceux-ci peuvent agir de plusieurs manières sur la cristallisation : soit en modifiant la solubilité du semi-hydrate de gypse soit en absorbant (modifiant) les faces du cristal.

-l'effet des différents additifs dépend de leur encombrement stérique et de leur affinité avec les faces cristallines, entraînant une modification de la cinétique de croissance et de la morphologie du cristal. Industriellement, des accélérateurs et des retardateurs sont utilisés pour contrôler le temps de prise (voir Figure II.5).

- **Accélérateurs** : les accélérateurs augmentent la vitesse de dissolution du semi hydrate ou la vitesse de croissance du gypse sans trop influencer les facies.
- **Retardateurs** : les retardateurs peuvent former un complexe avec le semi hydrate ralentissant sa dissolution. Ils se déposent sur les sites de croissances des cristaux, la forme finale peut varier des aiguilles élancées à des cristaux cubiques.

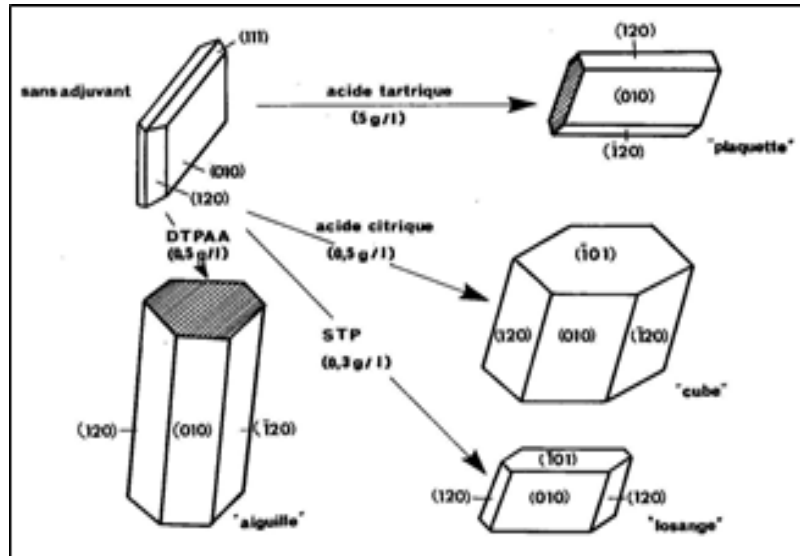


Figure II.5: Modification des cristaux de gypse par l'utilisation des adjuvants [15]

Le principe de fabrication du plâtre consiste à cuire le gypse à une température relativement modérée. Le Tableau II.2 donne les différents composés obtenus en fonction des températures. La transformation s'effectue suivant l'équation :

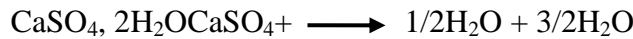


Tableau II.2: Les différents composés de plâtre obtenus en fonction des températures [17]

Non du produit	Variété chimique	Température d'obtention	Caractéristiques
Gypse	$\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$	Naturelle	d : poids spécifique d=2.31
Semi-hydrate	$\text{CaSO}_4, 1 \text{H}_2\text{O}$	110° à 180° C	Selon le procédé de cuisson 2 variété : α : Semi hydrate résultant de la déshydratation de gypse en milieu liquide ou sous pression vapeur d'eau d=2.76 β : Semi hydrate obtenu à pression ambiante (vapeur sèche), c'est un solide microporeux. d=2.62
Anhydrite soluble	CaSO_4 III	170° à 250° C	Variété instable à la température ordinaire d=2.58
Anhydrite insoluble	CaSO_4 II	400° à 600° C	Identique à l'anhydrite naturelle, appelé plâtre hydraulique, prise lente d=2.93 à 2.97
Plâtre hydraulique ou plâtre à plancher	CaSO_4 I	600° à 1200° C	Très courant en Allemagne avec une prise très lente

Structure cristalline du semi hydrate : La structure cristallographique du semi hydrate α et β a été étudiée par plusieurs auteurs notamment BERSHADSKII F.G, elle est dite rhomboédrique. La différence est que le premier a une structure non poreuse alors que le second est poreux. (Voir Tableau II.3).

-Le semi hydrate α est compact, faiblement soluble dans l'eau, avec laquelle il donne des mélanges fluides, on l'obtient par déshydratation du gypse en atmosphère de vapeur saturée : c'est le procédé dit cuisson humide.

-Le semi hydrate β , floconneux, à fissure écailleuses, plus soluble dans l'eau que le composé α , et donnant avec l'eau des mélanges plus épais, il demande donc une plus forte quantité d'eau de gâchage et il a un temps de prise plus long. On l'obtient par cuisson sec [15].

Tableau II.3 :Les propriétés du semi hydrate α et β [18]

Propriétés	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β
Masse volumique	2.757	2.637
Chaleur d'hydratation à 25 C° en cal.mol.g	4100	4600
Consistance Normale (ASTM C26) cm ³ d'eau	35	90
Temps de prise en minutes	15-20	25-35
Expansion (en mm par an)	2.8	1.6
Résistance à la traction (kg/cm ² à l'état sec)	66	13
Résistance à la compression (kg/cm ² à l'état sec)	560	56
Solubilité dans l'eau (en g de Ca SO ₄ pour 100 cm ³ à 20°C)	0.63	0.74

Comme on peut l'observer sur les images microscope à balayage électronique (MEB). C'est ce qui justifie la différence dans leurs applications (voir Figure II.6).

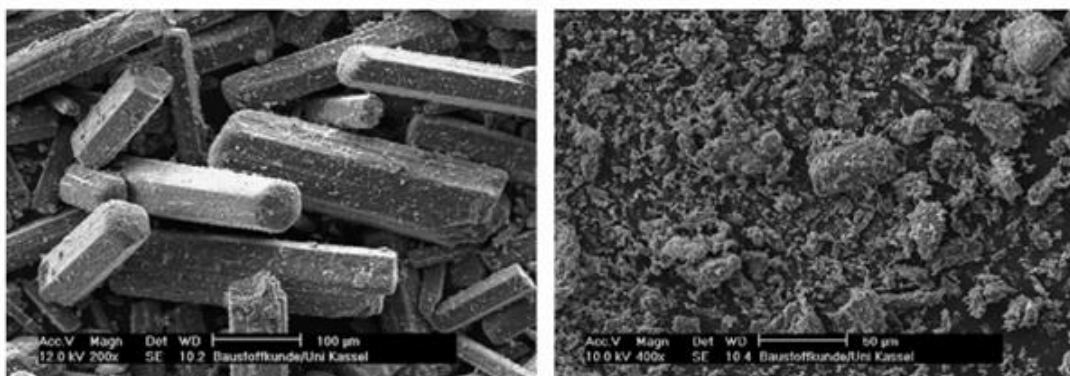


Figure II.6:Les images (MEB) du semi hydrate α et β [15]

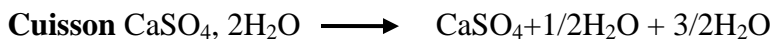
5.2. Hydratation, prise et durcissement

Les produits résultant de la déshydratation thermique du gypse ont la propriété hydraulique, lorsqu'ils se trouvent au contact de l'eau, de retrouver leur degré d'hydratation initiale et de reconstituer du gypse. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre. Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus, qui se déroule en trois étapes successives:

- Reprise de l'eau pour reformer le déshydrater.

- Cristallisation (qui constitue la prise proprement dite).
- Durcissement.

Mélangé à l'eau, le plâtre se transforme en hydrate à deux molécules d'eau par réaction inverse de sa fabrication.



Il y a un dégagement de chaleur et une légère expansion, AMATHIEU a décrit à l'aide du conductimètre les principales étapes de l'hydratation[17].

- Dissolution rapide du semi hydrate : variable selon le degré du semi hydrate et la température.
- Germination du gypse : avec un délai d'apparition des premiers cristaux de 2 à 3 minutes.
- Croissance des cristaux de gypse : la vitesse de croissance est élevée au départ, puis diminue lorsqu'il n'y a pas plus de semi-hydrate solide.

Les facteurs agissants sur la prise sont:

Tableau II.4: Phases de déshydratation du gypse [17]

Phase	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$		CaSO_4	
Forme α	Forme β		Forme III	Forme II		Forme I
Appellation	Gypse	semi-hydrate α	semi-hydrate β	Anhydrite III où anhydrite soluble	Anhydrite II où anhydrite insoluble	Anhydrite I
Système cristallin	Monoclinique	rhomboédrique	Hexagonal	Orthorhombique		cubique à faces centrées
Teneur en eau (% en masse)	20,92	6,20	6,20	0	0	0
Masse volumique (Kg/m ³)	$2,31 \cdot 10^3$	$2,76 \cdot 10^3$	$2,63 \cdot 10^3$	$2,58 \cdot 10^3$	$2,93 \cdot 10^3$ à $2,97 \cdot 10^3$	$2,93 \cdot 10^3$ à $3,0 \cdot 10^3$
Masse molaire (g/mol)	172,20	145,15	145,15	136,10	136,10	136,10
Volume molaire (cm ³ /mol)	74,50	52,40	55,20	52,80	52,80	45,8 à 46,4

- La vitesse de prise qui est fonction de la constitution du gypse.
- La prise est retardée par une augmentation de la quantité d'eau de gâchage.
- Un malaxage prolongé diminue le temps de prise, il ne doit pas dépasser une minute.

6. Microstructure du gypse plâtre

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) d'une microstructure de plâtre fait clairement apparaître la structure d'aiguilles de gypse enchevêtrées (**voir Figure II.7**).

La taille moyenne des cristaux dans des conditions classiques de gâchage à 23°C et sans adjuvant est environ 20x2x2 µm. Ces cristaux naissent et croissent, elles vont se rencontrer et créer une structure résistante. La formation de ce réseau est à l'origine des propriétés mécaniques. Leur liaison est de type feuilletée pour certains et de type tenonmortaise pour d'autres. L'image MEB permet de visualiser cette présentation de la microstructure du plâtre [19].



Figure II.7: Image (MEB) d'une microstructure du plâtre [15]

7. Caractéristiques générales du plâtre

7.1. Phénomène de la prise

Lorsqu'on gâche du semi-hydrate avec de l'eau, s'il combine pour revenir au déshydrate originel, la réaction est vive et très rapide. Elle s'accompagne d'une forte élévation de température et d'une légère augmentation de volume : c'est le phénomène de la prise, Puisque la prise est un phénomène dû à la sursaturation, sa rapidité dépend donc de la quantité d'eau de gâchage : elle est d'autant plus grande qu'on utilise moins d'eau.

7.2. Durée de prise

La durée de prise est celle qui correspond à la consistance pâteuse du plâtre, et donc à son temps d'emploi. Le mécanisme de la prise explique qu'elle ne soit pas instantanée, qu'elle varie avec la constitution du gypse et qu'elle demande d'autant plus de temps que la quantité d'eau de gâchage est plus grande [18].

7.3. Le retrait

La variation volumique du plâtre lors de la prise apporte des renseignements sur la naissance du réseau solide, une courbe habituellement est obtenue (**voir Figure.II.8**).

Une première phase de retrait est enregistrée car le volume de gypse est inférieur à la somme des semi hydrates et d'eau nécessaire à sa formation, les cristaux de gypse sont en contact par des forces de Van de Waals et des liaisons hydrogènes échangées avec l'eau contenu dans les pores. La première phase de gonflement traduit la répulsion des cristaux qui continue à croître[14].

Une structure continue se forme après le durcissement, avec un enchevêtrement des cristaux, un léger retrait est enregistré après l'hydratation complète environ 17%, lors de l'évaporation de l'eau résiduelle dans les pores. Cette propriété rend le plâtre particulièrement propre au moulage : augmentation de volume durant le temps du durcissement, permettre la pénétration à force dans tous les creux du moule, par contre, elle pourrait être nuisible dans les travaux du bâtiment.

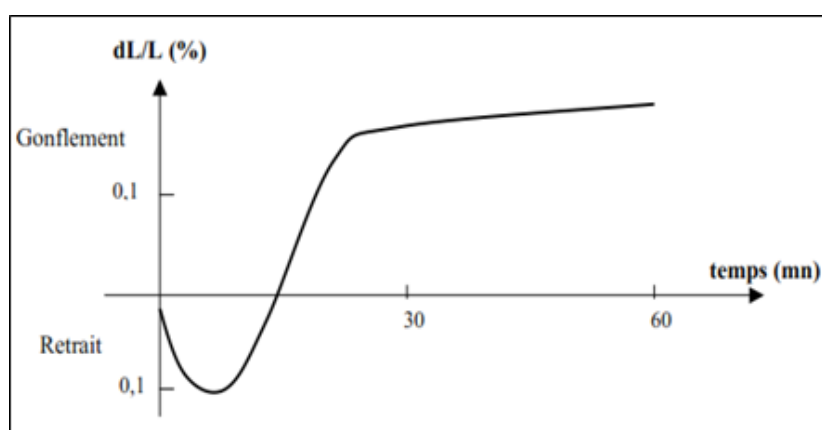


Figure II.8: La variation volumique du plâtre [14]

7.4. Résistance au feu

L'une des propriétés les plus caractéristiques du plâtre est son comportement remarquable au feu, qui a été reconnue et prouvée de tout temps, Cette protection a pu autre fois être obtenue grâce à délardes garnissages de plâtre remplissant complètement les intervalles séparant les éléments de construction. Elle peut aussi consister en enduits projetés de plâtre spéciaux (spécial feu) ou en enduits traditionnels comportant, de préférence, une armature légère de solidarisation ancrée sur l'ouvrage.

7.5. Résistance à la compression et à la traction

Il existe très peu de sources indiquant la résistance à la compression et à la traction du plâtre. Les valeurs que nous avons trouvé dans la littérature du XIXe siècle sont issues

presque exclusivement des valeurs trouvées par Rondelet (1803), Les plâtres gâchés correctement, conservés à sec et complètement desséchés peuvent atteindre à 28 jours une résistance maximale à la compression égale à environ 9 MPa et une résistance maximale à la traction d'environ 2 MPa. Mouillés d'eau, la résistance maximale. à la compression devient 3 MPa et la résistance maximale. à la traction est de 0,6 MPa[20].

Ces valeurs ne sont que des chiffres relatifs qui peuvent varier avec la qualité, les conditions de séchage et l'importance de la masse gâchée.

7.6. Adhérence du plâtre

Étymologiquement, adhérer signifie "tenir fortement à une chose", Ensemble phénomènes physiques et/ou chimiques qui prennent naissance lorsque deux surfaces mises en contact. Adhésion liée à adhésivité (aptitude à créer des forces d'interactions entre deux surfaces), état de surface des deux constituants (surface spécifique, porosité, sites actifs, pollution) et mouillabilité (aptitude à créer un contact entre deux surfaces).

On peut définir l'adhésion aussi comme ensemble des interactions qui se produisent. Le but fondamental est surtout la durabilité de l'adhésion. Cela implique une bonne connaissance des forces qui interviennent lorsqu'un contact se produit entre deux phases. Ces forces se réduisent finalement (à l'exception des forces purement mécaniques qui ressortissent d'une étude macroscopique) à des interactions moléculaires, de nature physico-chimique[21].

Si l'on dit que la prise du plâtre résulte bien de la croissance des cristaux de sulfate de calcium hydratés (et aussi des autres), on ne fait que reculer la résolution du problème de la cohésion d'ensemble : "pourquoi ces cristaux tiennent-ils ensemble ?

Une première réponse serait de dire qu'il y a continuité du réseau cristallin dans tout le système, une deuxième serait de dire que les cristaux, pressés les uns contre les autres en milieu confiné, adhèrent par des forces de surface à courte portée. Une troisième explication pourrait faire appel à des forces de friction suffisamment fortes pour que l'enchevêtrement entre les cristaux devienne pratiquement indéformable. S'agit-il de cohésion, d'adhésion ou de friction intercristalline?[22].

Les chercheurs sont un peu perplexes face à ces considérations, qui laissent un goût de trop peu car alors, comment expliquer l'adhérence du plâtre, sur un support en béton ou une pierre ou une brique? En fait, la réponse se trouve dans les progrès importants qui ont été faits ces dernières années dans la connaissance des forces de surface en présence de charges électriques.

La théorie de l'adhésion en tant que telle repose sur des piliers plus vastes, classés généralement en deux catégories principales, respectivement l'adhésion mécanique, liée principalement à la rugosité macroscopique et ce qu'il est convenu d'appeler l'adhésion spécifique, interprétée en termes de liaisons chimiques (quand elles existent), d'approche thermodynamique et de forces intermoléculaires (c'est dans cette catégorie que l'on retrouve les forces "électriques").

L'adhésion présente donc deux aspects, suivant que l'on s'intéresse aux conditions et à la cinétique de formation du lien entre les corps en présence ou au processus de séparation. C'est la première approche qui paraît la plus passionnante et intéressante même si, bien entendu, il est nécessaire de caractériser quantitativement le niveau d'adhésion par une mesure d'adhérence. Il est clair également que, chronologiquement, c'est le premier aspect qui préside à la création de l'interface.

Si deux corps, en l'occurrence un support et une couche d'apport avec le gypse du plâtre, sont capables de s'associer et de s'assembler, c'est parce que des liens se créent : au sens thermodynamique du terme, on peut dire que le travail d'adhésion est plus important que le travail de cohésion dans le matériau de réparation, c'est-à-dire que l'attraction est plus forte que la répulsion.

L'adhérence du plâtre aux pierres ou à la brique est nettement inférieure à sa propre force de cohésion et n'atteint que 0.3 MPa lorsque la traction a lieu perpendiculairement au plan de rupture et 0.15 MPa lorsque la traction s'exerce parallèlement à ce plan[23]. L'adhérence au bois est plus faible, par contre l'adhésion au fer est supérieure, ils peuvent atteindre 1 MPa au bout de 9 jours et 1.7MPa au bout de 17 jours[18].

8. Conclusion

Le plâtre est un liant aérien. Il est moins utilisé dans le domaine de génie civil et au gros œuvres mais par contre, il est très employé dans le domaine de décoration grâce à sa capacité de se mouler sur toutes les formes, et n'importe quelle finition, sans oublier sa légèreté très souhaitée.

Il est à conclure que ce matériau est largement utilisé dans les travaux secondaires tels que l'ornementation cependant, on a remarqué que ce liant possède une faible résistance à la traction, la compression et l'adhésion, mais il est possible d'améliorer les caractéristiques physiques du plâtre à l'aide des additions qui résultent un matériau composite à base d'une matrice de gypse.

Chapitre III :

Etat de l'art sur le renforcement du plâtre.

1. Introduction

Lorsqu'on pense aux matériaux composites, on a immédiatement présent à l'esprit l'idée d'amélioration des performances, cette image présente les composites comme des matériaux couteux. D'abord les matériaux composites permettent a priori d'obtenir une graduation continue de propriétés préférablement variables, propriétés physiques ou mécaniques, cela mérite que les matériaux composites soient considérés comme matériaux innovants.

1.1. Définition d'un matériau composite

Par définition, un matériau composite est constitué d'au moins deux matériaux différents non miscibles (voir Figure III.1). Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés différentes des constituants de base. Les matériaux composites sont constitués d'une ossature appelée renfort, qui assure le comportement mécanique, et d'une protection appelée matrice, qui assure la cohésion de la structure et répartit les contraintes appliquées au matériau.

La définition suivante de NASLAIN permet d'explicitier la contribution du matériau composite dans l'usage des matériaux. « *c'est un solide dans lequel plusieurs constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions ,un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne permettent pas d'obtenir* »[24].

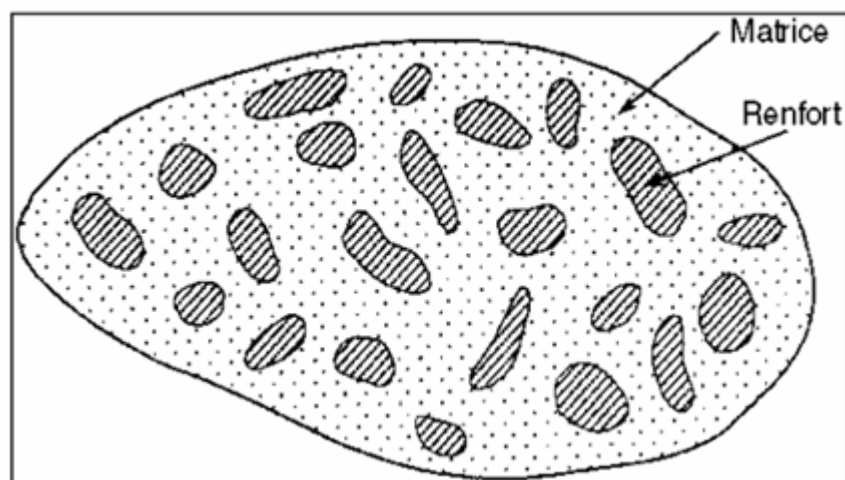


Figure III.1: Composition d'un matériau composite [24]

2. Typologie des matériaux composites

2.1. Matériaux composites selon la matrice

Trois grandes classes de matériaux composites existent selon la nature de la matrice : les composites à matrice organique (CMO) de grande utilisation industrielle ; les composites à matrice minérale (céramique) (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire, le militaire, et le freinage (freins carbone), les composites à matrice métallique (CMM) dont les applications sont les mêmes que les CMC [24](voir Figure.III.2). Notre étude porte sur les matrices minérales de type céramique (le plâtre).

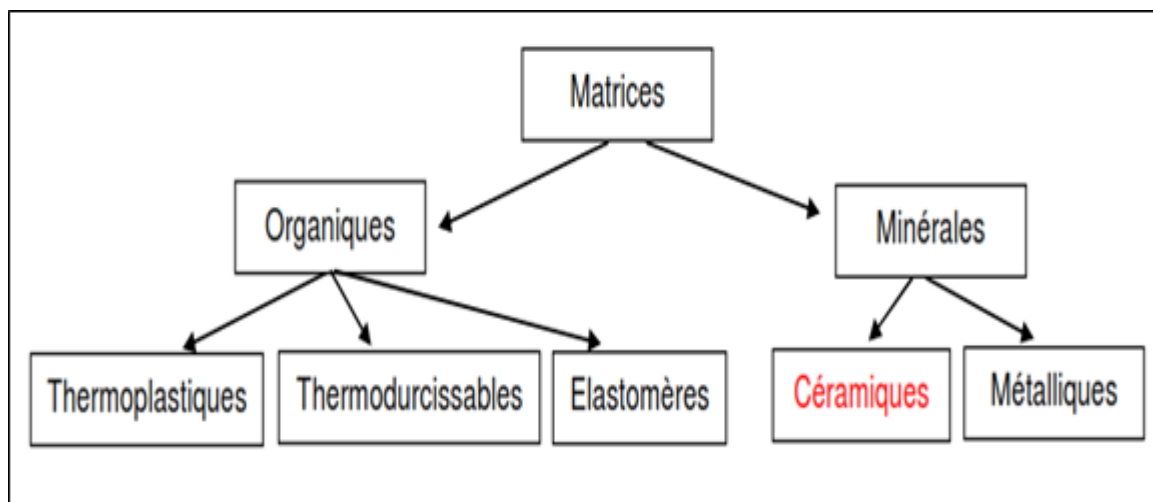


Figure III.2: Typologie des matériaux composites [25]

2.2. Matériaux composites selon le renfort

Il existe un grand nombre de renforts de type organique ou inorganique susceptibles d'être ajoutés à la matrice du composite afin d'améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du matériau, il est classé en fonction de la forme des constituants, les matériaux composites se regroupent en deux grandes classes : les matériaux composites à particules ou à fibres.

- **Matériaux composites à particules**

Cette catégorie renferme les composites dont le renfort est sous forme de particules. La rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait et autres sont les caractéristiques souvent recherchées lorsque les particules sont utilisées comme renfort réduisant ainsi le coût du matériau. Le choix du couple matrice/particules est fonction des propriétés recherchées: par exemple du plomb dans des alliages de cuivre améliore

l'usinabilité, des particules de tungstène, de molybdène et de chrome introduites dans une matrice métallique ductile augmentent ses propriétés mécaniques à température élevée, l'élastomère en particules dans une matrice polymère fragile améliore ses propriétés à la rupture et au choc.

- **Matériaux composites à fibres**

Il s'agit des composites dont le renfort est sous forme de fibres. Elles peuvent être longues ou bien courtes. L'arrangement des fibres et leurs orientations permettent d'avoir des matériaux à la carte avec des propriétés mécaniques spécifiques. La nature des constituants, leurs proportions et orientations constituent des leviers pour varier à volonté les caractéristiques mécaniques et physiques en fonction des performances recherchées.

2.3. But de l'utilisation des matériaux composites

Les renforts sont sélectionnés pour améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du matériau.

a) Renforts thermiques

En raison de sa faible conductivité thermique, le plâtre permet de réaliser des systèmes d'isolation efficaces lorsqu'il est associé à des matériaux isolants, minéraux ou de synthèse, ayant des conductivités thermiques très faibles (0,01 à 0,04 W.m⁻¹.K⁻¹). L'amélioration de l'isolation thermique peut aussi être obtenue en créant une porosité au sein d'une matrice plâtre. Compte tenu de la faible conductivité thermique de l'air ($\lambda_{\text{air}} = 0,0251 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), lorsque la porosité augmente, la conductivité thermique des matériaux diminue[24].

b) Renforts mécaniques

L'introduction de la porosité dans la matrice engendrée par l'ajout de renforts thermiques induit un effet négatif sur les propriétés mécaniques du matériau. Il est donc impératif de renforcer la matrice pour pallier à cette diminution des propriétés mécaniques. Le renfort de la matrice peut être envisagé à deux échelles. A l'échelle microscopique, ce renfort peut être effectué en diminuant le taux de porosité inter matricielle en optimisant les conditions de prise du plâtre (rapport E/P, granulométrie).

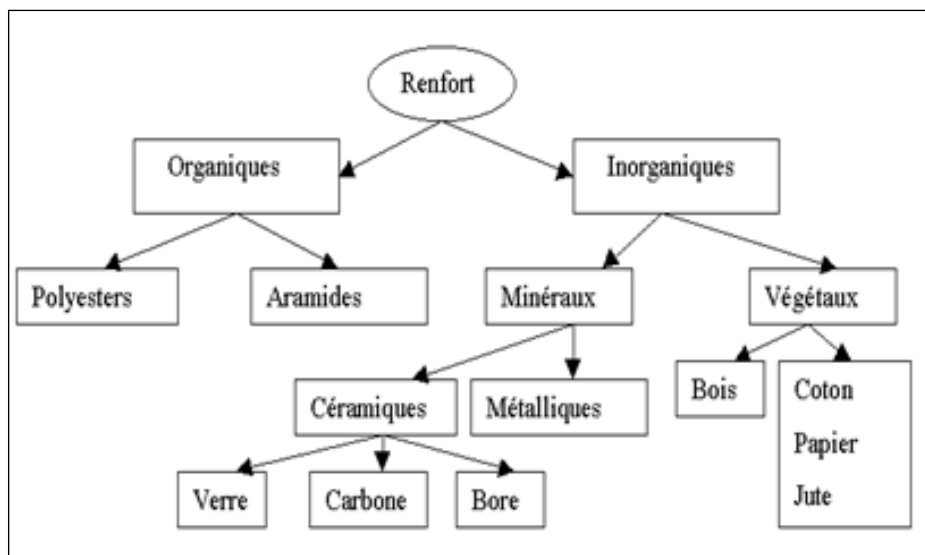


Figure III.3:Typologie du renfort pour les matériaux composites [24]

A l'échelle macroscopique, l'ajout de fibres en tant que renforts mécaniques est déjà couramment utilisé, que ce soit dans des matrices organiques ou inorganiques, Il existe une grande variété de fibres que l'on peut regrouper suivant deux grandes familles (Voir Figure III.3).

- Des fibres organiques qui regroupent les produits d'origine naturelle (végétales ou animales par exemple) et les produits contenant des polymères organiques.
- Des fibres inorganiques qui se subdivisent en produits métalliques et produits minéraux.

3. Utilisation des déchets de constructions comme ajouts dans le domaine de la réhabilitation

Récemment, la conservation des bâtiments pour le patrimoine architectural gagne une attention de la part des experts en urbanisme, car elle est considérée comme l'un des points de repère les plus importants pour les villes, en particulier dans les bâtiments d'habitation méditerranéens, Ce patrimoine occupe une place importante pour la valeur immobilière et contribue à la définition de l'image urbaine des villes. La plupart des bâtiments historiques sont riches en éléments décoratifs (ornements) qui leur confèrent une grande valeur architecturale et esthétique.

Au cours du XXe siècle, de nombreux exemples négatifs ont été donnés par des interventions faites avec des matériaux inadéquats dans des constructions historiques. Au cours des dernières décennies, des concepts tels que l'authenticité et la compatibilité

(chimique, physique, mécanique, esthétique) ont pris une importance accrue en ce qui concerne les matériaux utilisés pour la restauration/conservation [19].

3.1. Déchet de démolition de construction

Un déchet est défini comme toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire[26]. Actuellement, l'utilisation des déchets de démolition de construction (DDC), en particulier la brique usagée, s'accélère globalement en raison de la construction et de la réhabilitation des bâtiments, avec environ 45 % du total des DDC[27]. Cependant, il n'y a pas encore suffisamment d'informations sur la possibilité d'incorporer les matériaux DDC dans la fabrication de produits à base de plâtre, comme les mortiers ou les panneaux.

Ces déchets ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas avec d'autres matériaux. Le recyclage de ces déchets devient une solution efficace pour diminuer la grande quantité de déchets, qui sont considérés comme des ressources renouvelables et durables innovantes pour le domaine de la construction et du génie civil. Il en résulte une réduction de l'exploitation extensive des matières premières et des sites de décharge, ce qui entraîne d'énormes avantages environnementaux et économiques [28]. En Algérie, du fait de l'augmentation des activités du Bâtiment et des Travaux Publics depuis quelques décennies, on constate un afflux croissant du volume des déchets issus des chantiers, cela signifie que la revalorisation de ces déchets est devenue une exigence prioritaire.

4. Effet de la poudre de déchet de brique (PDB) sur le comportement du mortier de ciment blanc

Dans une étude expérimentale, le ciment blanc renforcé par les déchets de brique a été utilisé dans la fabrication des éléments décoratifs [29]. Les déchets de briques rouges proviennent d'un champ de démolition. Ils ont été séparés du béton et d'autres matériaux de construction et broyés dans un broyeur à boulet centrifuge. Les échantillons de mortier de ciment blanc ont été formulés avec différents taux de poudre de déchet de brique comme remplaçant du sable naturel (20, 40, 60, 80 et 100%). Les mélanges ont été gâchés avec différentes quantités d'eau pour obtenir un affaissement similaire d'environ 160 mm, Les mortiers ont été préparés dans des moules de 40 mm x 40 mm x 160 mm, Les éprouvettes moulées ont été maintenues à $20 \pm 2 \text{ C}^0$ et à une humidité relative supérieure à 90 % pendant 5

jours, puis ils ont été démoulés. Les échantillons ont été testés à la compression, la flexion et l'adhésion à différents âges.

Les résultats de l'absorption ont montré que le mortier de ciment blanc formulé avec 100% de poudre de déchet de brique a donné une résistance à l'eau satisfaisante et a dépassé la valeur correspondante requise pour les enduits décoratifs pour murs.

Les résistances à la compression et à la flexion du mortier incorporant la poudre de déchet de brique sont bien plus élevées que celles du mortier témoin sans PDB (voir **Figure 111.4**). On pense que les plus grosses particules de PDB remplissent les vides et les pores et rendent la microstructure du mortier plus dense.

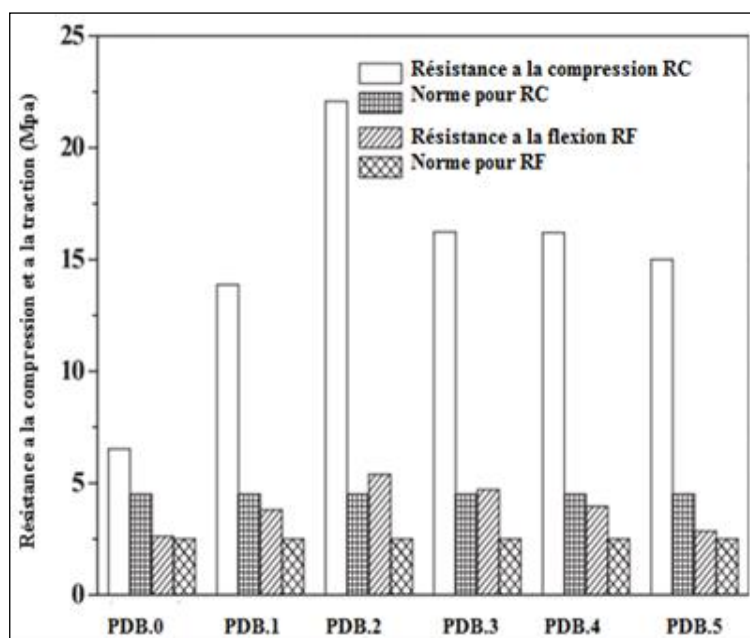


Figure III.4: Résistances à la compression du mortier de ciment renfermant différent taux de PDB à l'âge de 28 jours [29]

Les résultats de l'adhésion montrent que la résistance à l'adhésion du mortier augmente avec l'augmentation du taux de PDB jusqu'à une valeur maximum pour un taux de 40% de PDB. Un taux élevé de PDB entraîne une réduction de la résistance à l'adhésion, cette réduction est probablement due aux caractéristiques d'absorption d'eau de la PDB. Le mortier avec 100% de PDB répond toujours aux exigences des enduits décoratifs pour les murs, puisque la résistance à l'adhésion est supérieure à la norme (0,57 MPa) (voir **Figure III.5**).

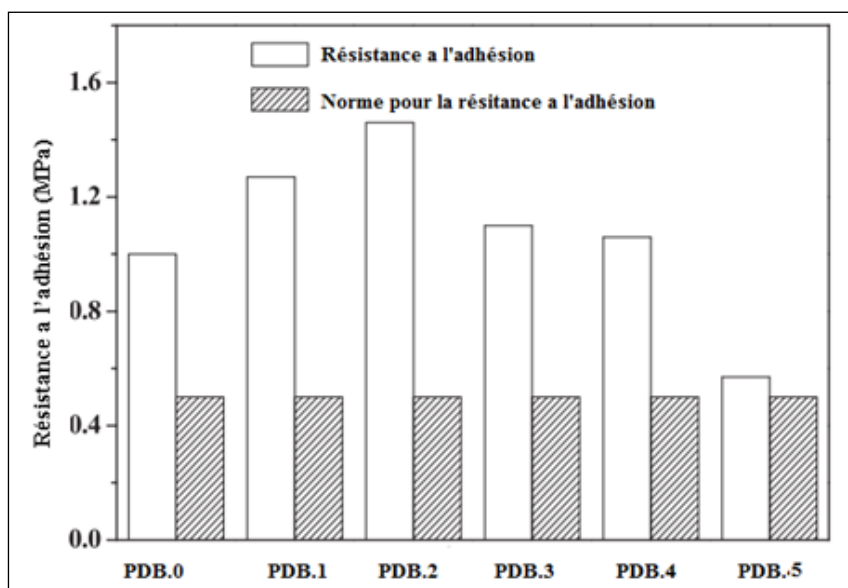


Figure III.5: Résistance à l'adhésion du mortier de ciment avec et sans PDB à 28 jours [29]

5. Effet des déchets de rochet sur le comportement physique et mécanique du mortier de plâtre

Dans une autre recherche, MARKSSUEL T a étudié le mortier de plâtre renforcé de déchets de roche dans le but de réparer les enduits des bâtiments historiques au Brésil [14]. Elle a constaté que la plupart des bâtiments historiques souffrent de l'usure de leur revêtement extérieur, qui nécessite des réparations pour maintenir les caractéristiques esthétiques et culturelles de ces bâtiments. Après l'analyse de l'architecture et la caractérisation des revêtements extérieurs, une méthodologie a été proposée pour évaluer la mise en évidence d'un nouvel enduit de gypse à base de déchets de roche pour réparer ces précieux revêtements (voir figure III.6).



Figure III.6: Façade de quelques bâtiments historiques en Brésil [14]

Une série de pathologie a été détectée par observation visuelle dans les revêtements des bâtiments analysés, certains de ces pathologies sont dues au vieillissement des revêtements et au manque d'entretien des bâtiments, souvent compromis par le manque de connaissance des matériaux utilisés dans le revêtement d'origine (**Voir Figure.III.7**).



Figure III.7: Pathologie détectée par observation visuelle [14]

A– fissuration - décollement et écaillage de la peinture - décollement et perte probable de matière résultant d'un impact mécanique, **D** et **E** - humidité, taches de moisissure et cloquage du revêtement - cloquage causé par la crypto florescence

Des échantillons ont été prélevés dans les bâtiments étudiés. Les échantillons ont été analysés par microscopie optique. Après avoir confirmé qu'une grande partie des enduits des bâtiments analysés étaient des gypses de plâtre, un programme expérimental a été mis en place pour développer un mortier de gypse avec des déchets de rochet qui pourra être utilisé pour les futures réparations du monastère de construction et d'autres églises.

L'analyse chimique révèle une prédominance du composé SO_3 , qui est due à la présence de gypse dans les échantillons évalués(**Tableau.III.1**). La présence de SiO_2 a également été détectée, ce qui peut être attribué au sable de quartz qui fait également partie de la composition des enduits évalués. Ainsi, l'analyse chimique des échantillons confirme les données historiques consultées en ce sens que les enduits sont faits de gypse.

Tableau III.1: Analyse chimique de l'échantillon prélevé dans les bâtiments étudiés[14]

Echantillon	1	2	3	4
SO ₃	38.6	47.6	45.2	51.8
CaO	32.3	24.2	29.6	26.2
SiO ₂	8.5	13.5	18.7	14.6
MgO	0.7	1.2	0.8	0.4
Al ₂ O ₃	1.4	-	0.2	0.1
Autre	6.3	4.9	2.1	2.5
Perte par calcination	12.2	8.6	3.4	4.9

L'analyse minéralogique(Voir Figure.III.8) prouve ces faits puisque dans tous les échantillons, les pics les plus pertinents étaient ceux du gypse suivi du quartz, concomitants avec la composition chimique de l'enduit [30].

Des pics de calcite ont également été trouvés dans tous les échantillons, ce qui peut être attribué à l'oxyde de calcium libre de la chaux, qui était aussi parfois utilisée comme matière première pour la production de revêtements. Une autre possibilité est que la calcite s'est formée pendant la durée de vie du revêtement en échangeant le SO₃ du plâtre avec le CO₂ de l'atmosphère, formant ainsi du CaCO₃[30].

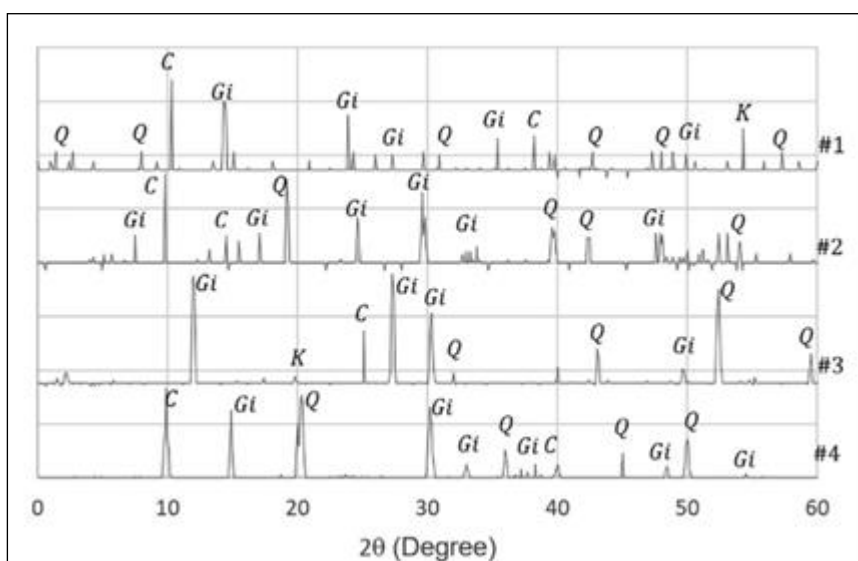


Figure III.8: Analyse minéralogique de l'échantillon par XRD [14]

Les distributions granulométriques des déchets de roche, du sable et du plâtre représentés dans la Figure III.9. Celle du déchet de rochet et du gypse sont relativement proches, c'est pourquoi le remplacement de ce matériau par les déchets a été testé, même le matériau en pierre n'a pas les caractéristiques d'un liant.

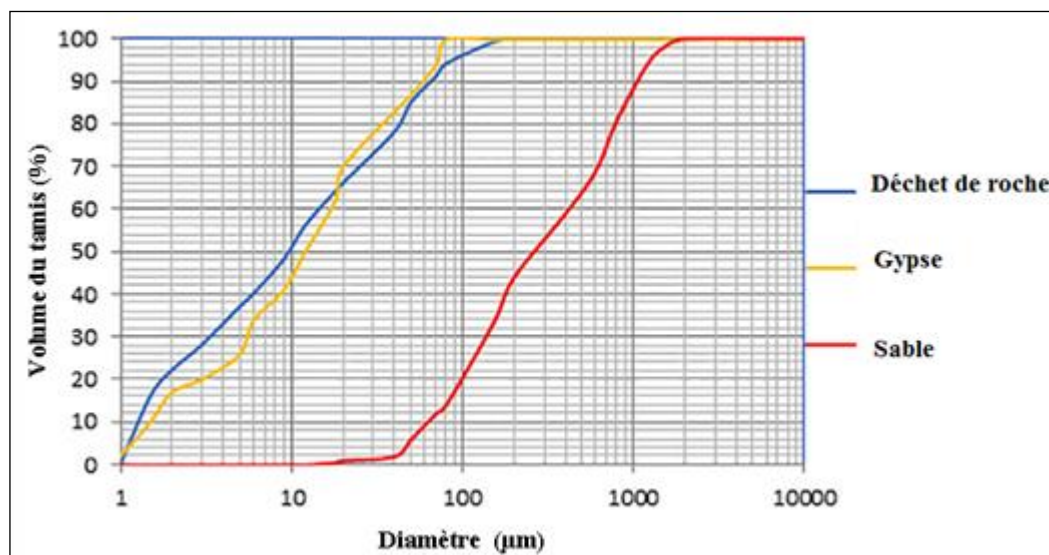


Figure III.9: Analyse granulométrique des matériaux de l'échantillon prélevé des bâtiments étudiés[14]

Les déchets ont une finesse élevée et cette finesse favorise les paramètres de résistance et de durabilité des enduits, puisqu'elle contribue à réduire leur porosité. Ce résultat a été rapporté par MARVILA et al. [31], qui ont utilisé un déchet similaire à celui étudié dans cette recherche et ont obtenu des mortiers ayant de meilleures propriétés de résistance, grâce à l'effet de remplissage fourni par les déchets.

Les résultats de l'absorption par immersion d'eau des échantillons sont illustrés sur la figure III.10. Il est à observer que l'utilisation des déchets de rochet entraîne une réduction substantielle de l'absorption d'eau des enduits, en raison de l'effet de remplissage causé par les déchets de rochet, un fait bénéfique puisque l'une des causes majeures de la pathologie des enduits est la pénétration d'humidité dans le matériau.

Cependant, tous les enduits modifiés par l'introduction des déchets de rochet avaient présenté une absorption d'eau plus faible que l'enduit de référence, à l'exception de la composition 20P, qui avait une absorption d'environ 12%. Probablement, l'enduit lorsqu'il était immergé dans l'eau, a subi une forte dégradation et une perte de masse, ce qui est suffisant pour exclure l'utilisation de cette composition. Le gypse est connu pour agir comme un liant et conférer une stabilité au plâtre. Cependant, le mortier 20P s'est donc révélé inadapté à l'application proposée en raison de sa faible quantité de liant, qui rendent le matériau instable en présence d'eau, même après 28 jours de durcissement.

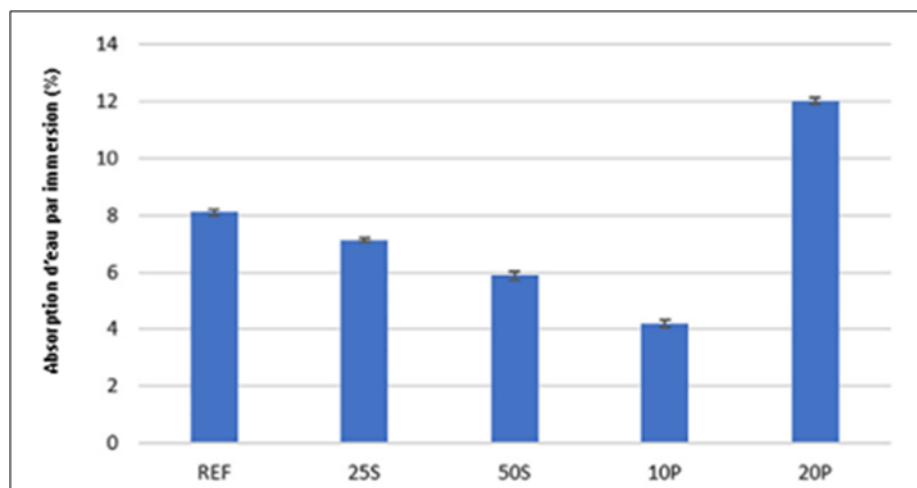


Figure III.10: Résultat de l'absorption par immersion des échantillons [14]

L'évaluation de la résistance à la flexion des mortiers est illustrée dans la figure III.11. Tous les mortiers de plâtres renfermant les déchets de rochet affichent une valeur de résistance à la flexion supérieure à la valeur indiquée dans la norme sur l'utilisation des enduits de plâtre. Selon la norme UNE-EN 13279 (Européen Norm, 2014), il est nécessaire que la résistance à la flexion soit supérieure à 1 MPa. En ce qui concerne la flexion, il n'est possible de respecter les recommandations de la norme qu'avec l'utilisation des déchets.

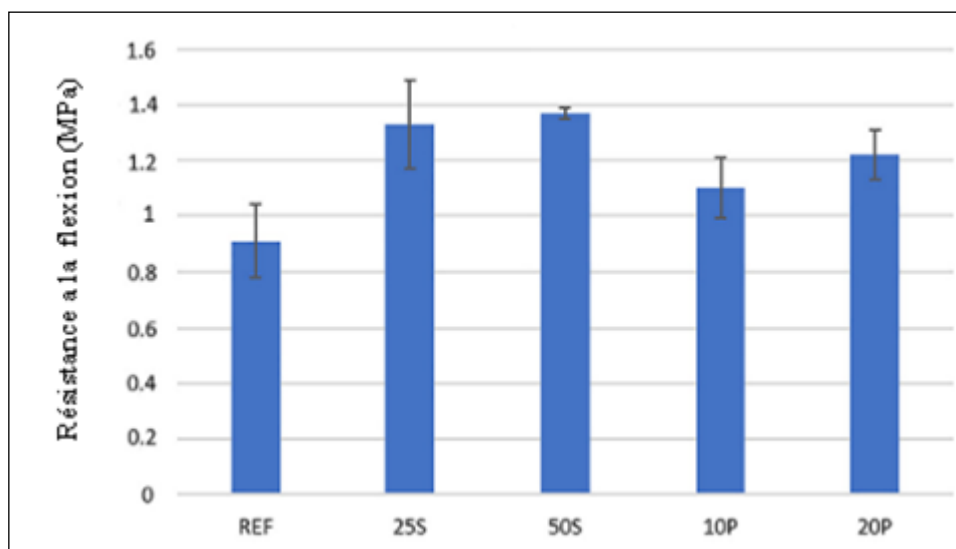


Figure III.11: Résultats de la résistance à la flexion de l'échantillon étudié [14]

La résistance à la compression du mortier est présentée sur la **Figure III.12**. Les meilleurs résultats de la compression sont obtenus pour un taux de 50% du remplacement du sable par les déchets de rochet. Ainsi, en considérant uniquement les résultats obtenus pour la résistance à la compression, le plâtre qui présente les meilleures performances et qui serait choisi si une seule composition de plâtre était appliquée dans la réparation des bâtiments serait 50S.

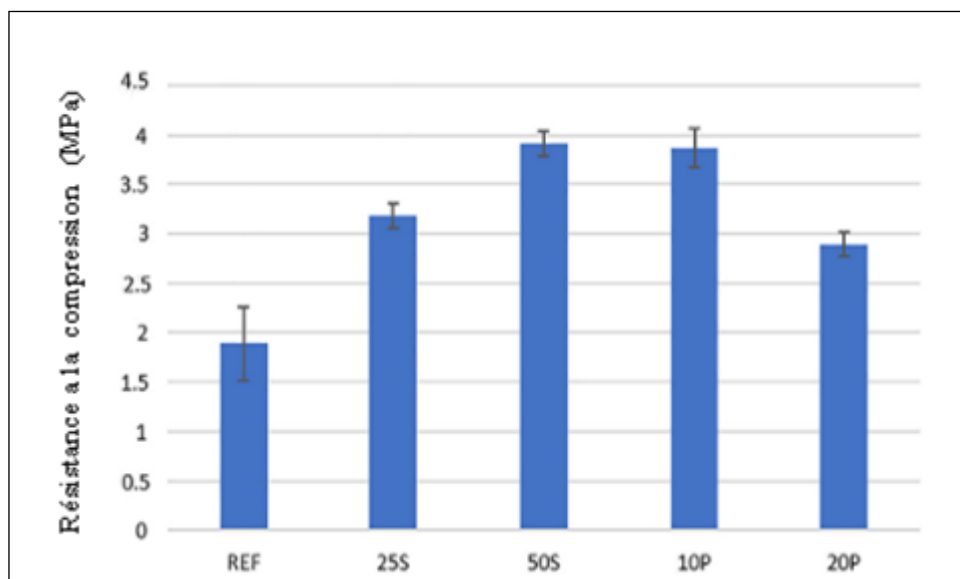


Figure III.12: Résultats de la résistance à la compression de l'échantillon étudié [14]

Toutefois, il est souligné que le choix de l'enduit qui présente la meilleure performance en service ne peut être fait uniquement sur la base de l'analyse de la résistance à la compression. D'autres propriétés, telles que la densité, l'absorption d'eau et l'adhérence, qui seront mises en évidence dans la séquence des travaux, doivent être prises en compte[19].

Il est à conclure que les déchets améliorent les propriétés de la résistance mécanique des plâtres, car ils fournissent une structure moins poreuse. A titre d'exemple, la porosité du mortier est passée de 12,76 % dans l'enduit de référence à 8,26 % dans l'enduit avec le taux de remplacement de 50% de déchet de rochet.

Dans certains échantillons, ou le remplacement du gypse par des déchets de roche a eu lieu dans le mortier (10P et 20P), ce qui a entraîné une augmentation de la résistance mécanique de l'échantillon, ceci peut être expliqué par le fait que les déchets de rochet agissent comme un renfort (une charge) et ne présente pas de propriétés liantes. Par conséquent, l'utilisation de déchets pour remplacer le plâtre (10P et 20P) n'est pas une application aussi intéressante que son utilisation comme remplaçant du sable (25S et 50S).

Les résultats de l'adhérence sont montrés dans la **figure III.13**. Les valeurs de résistance pour les mortiers 10P et 20P sont inférieures à celle du mortier de référence, ce qui peut être attribué à la faible quantité de liant de ces compositions. Ce comportement peut être attribué à l'absence d'ancrage entre le plâtre et le support, puisque l'ancrage est assuré par la pénétration du liant dans le support.

Tout comme les échantillons 10P et 20P ont une teneur en gypse plus faible, on a constaté une diminution de l'adhérence due au manque d'ancrage. Il est à noter que les compositions 10P et 20P se sont toutes fissurées à l'interface entre le plâtre et le support, ce qui démontre une faible adhérence entre ces deux systèmes.

Si la rupture était produite dans les échantillons 10P et 20P, et non à l'interface, on s'attendrait à des valeurs d'adhérence plus élevées pour ces compositions que pour le mortier de référence, puisque les deux enduits avaient des valeurs de résistance plus élevées que le REF. C'était également le cas avec les mortiers 25S et 50S, où la rupture s'est produite à l'intérieur du plâtre, en raison de l'épuisement de sa capacité de résistance, avec des valeurs supérieures à celles du mortier de référence.

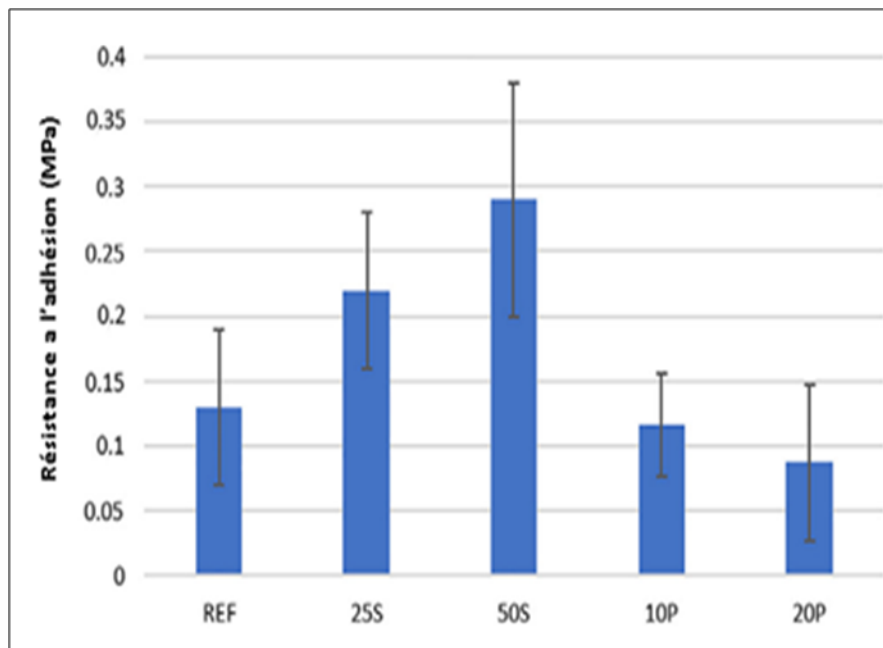


Figure III.13 : Résultats de la résistance à l'adhésion des échantillons [14]

Il s'en sort de cette étude qu'il est possible d'utiliser les déchets de rochet dans les enduits de réparation dans les bâtiments historiques. L'application de ces déchets peut contribuer à la durabilité du secteur de la construction, réduire le prix des enduits grâce à l'application d'un matériau peu coûteux et améliorer considérablement les propriétés des enduits, en particulier ceux à l'état durci.

6. Influence des déchets céramiques et de polystyrène expansé sur le comportement de la matrice de plâtre

ALICIA SAN-ANTONIO analysé la possibilité d'incorporer séparément dans une matrice de plâtre les déchets de céramique (D.C) et les déchets de polystyrène expansé (DPE) [33]. Plusieurs séries d'échantillons ont été préparées (voir **Figure III.14**).



Figure III.14: Déchets de céramique et de polystyrène expansé) [33]

Les échantillons ont été préparés avec différentes tailles de particules et différents pourcentages de ces déchets (déchets de céramique et de polystyrène expansé). Tous les échantillons ont été évalués par leur densité à l'état sec, leur résistance à la flexion et à la compression après 7 jours et leur dureté de surface, conformément aux normes européennes EN 13279-2 et UNE 102039. En outre, les mélanges renfermant les déchets de céramique ont été testés à l'absorption capillaire d'eau conformément à la norme européenne EN 459- 2:2001 et les mélanges renfermant les déchets de polystyrène expansé ont subi des essais de mesure de la conductivité thermique. Des échantillons prismatiques de taille $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été élaborés pour chaque mélange et préalablement testés pour établir un rapport eau/mortier (E/M) conformément à la norme européenne EN 13279-2.

L'analyse des résultats obtenus pour les échantillons contenant les déchets céramiques (25, 50 et 100 % en poids de gypse) par rapport à la valeur de référence a montré une augmentation de la densité jusqu'à 19 %, une réduction de la résistance à la flexion de 1 %, une réduction de la résistance à la compression de 4 %, une augmentation de la dureté superficielle jusqu'à 6 % et une réduction de l'absorption capillaire d'eau jusqu'à 23 % (**Voir Figure III.15**). En général, les meilleurs résultats sont obtenus avec le mélange renfermant 50% de déchet céramique(50A1G).

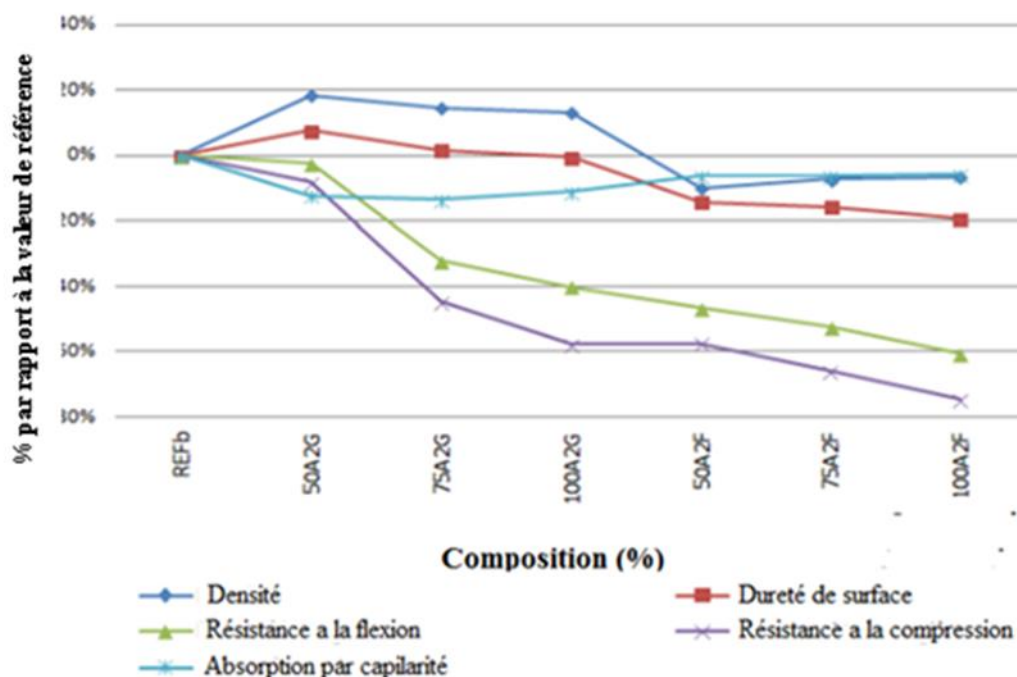


Figure III.15: Echantillons élaborés avec 30% de gypse et renforcés par les DC (essais A1)) [33]

L'analyse des résultats des mélanges comportant différents pourcentages de déchets de céramique grossiers a montré une augmentation de la densité jusqu'à 18 %, une réduction de la résistance à la flexion de 2 %, une réduction de la résistance à la compression de 8 %, une augmentation de la dureté superficielle de 7 % et une diminution de l'absorption d'eau capillaire jusqu'à 13 % (voir Figure.III.16).

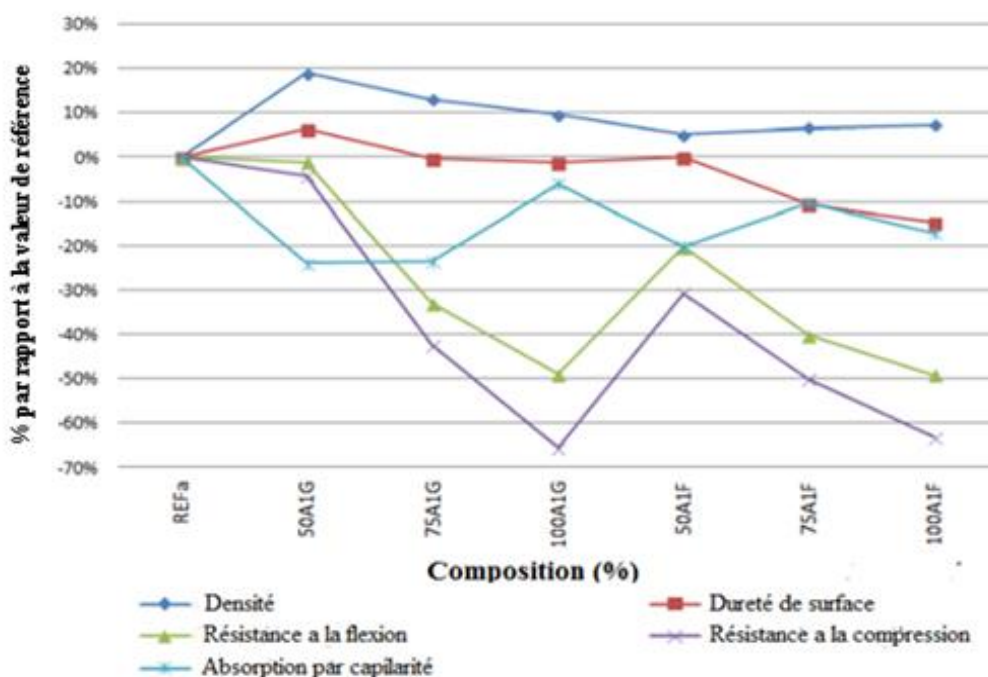


Figure III.16: Echantillons élaborés avec 30% de gypse et renforcés par les DC (essais A2)) [33]

En général, les meilleurs résultats sont obtenus avec le mélange renfermant 50% de déchet céramique de taille grossier (50A1G).

Les résultats obtenus pour les mélanges renfermant les différents pourcentages de déchets de polystyrène expansé (1, 2 et 3% en poids de gypse) de différentes tailles (grossier et fin) illustrés dans la **Figure III.17**, montrent une diminution maximale de la densité de 60%, une diminution maximale de la dureté superficielle de 51%, une diminution maximale de la résistance à la flexion de 67%, une diminution maximale de la résistance à la compression de 83%.

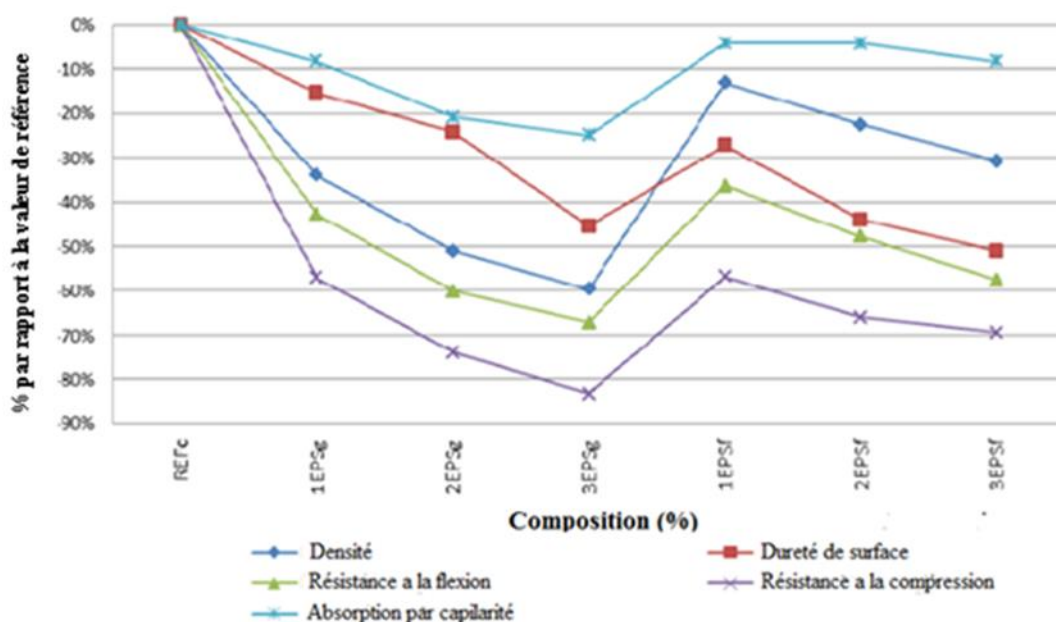


Figure III.17: Echantillons élaborés avec le gypse A1 et renfermant les déchets de polystyrène expansé (Essais B)) [33]

Les auteurs de cette étude ont conclu qu'il est possible d'utiliser le plâtre E-30 avec 50% de déchets de céramique provenant de briques ou de tuiles afin de produire du plâtre préfabriqué utilisé comme revêtement pour les murs intérieurs. Ce matériau répond non seulement aux exigences minimales établies par la législation actuelle en matière de résistance mécanique, mais il augmente également la dureté superficielle de 7 % et réduit l'absorption capillaire d'eau jusqu'à 23 %. En outre, en ce qui concerne les mélanges renfermant les déchets de polystyrène expansé, des réductions de densité plus importantes sont possibles en ajoutant des pourcentages plus élevés de déchets, mais cela nécessiterait l'ajout d'additifs pour améliorer la résistance à la compression.

7. Effet des déchets de construction et de démolition sur les propriétés de la matrice de plâtre

L'utilisation des déchets de construction et de démolition dans la confection du plâtre destiné aux revêtements intérieurs et les éléments préfabriqués des cloisons intérieures a été l'objet d'une investigation réalisée en Espagne par PAOLA VILLORIA SAEZ[18]. Des échantillons d'enduit de taille 4x4x16 cm incorporant des déchets de céramique (de taille 1 et 2 mm), de béton (de taille 1 mm et 2 mm), de polystyrène expansé (de taille variant de 4 à 6 mm) et de déchets mixtes à différents taux de substitution ont été préparés dans cette étude.

Les échantillons composés de différents déchets ont été formulé avec un rapport eau/gypse (E/G) de 0,8 et renfermant les pourcentages de substitution en poids de 25 %, 50 % et 75 %. Des échantillons témoins sans déchets ont été également préparés pour comparer les résultats. Dans toutes les séries, les déchets ont été mélangés avec le gypse manuellement, puis l'eau est ajoutée. Les échantillons ont été conservés 7 jours dans la température ambiante du laboratoire, ensuite ils ont été testés après séchage dans un four à une température constante de $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 h, conformément à la norme EN 13279-2 [32].

Des essais physiques tels que la mesure de la densité et la dureté superficielle et des essais mécaniques tels que l'évaluation de la résistance à la flexion et la résistance à la compression ont été réalisés sur les échantillons préparés.

Les résultats obtenus ont montré que la densité augmente avec l'augmentation du pourcentage de déchets sans exception. Même constat observé par l'auteur sur la dureté superficielle.

La résistance à la flexion des échantillons renfermant les déchets de céramique augmente avec l'augmentation du taux de substitution jusqu'à 50%. Pour des pourcentages plus élevés de déchets céramiques, les résultats diminuent légèrement, mais ils sont maintenus au-dessus de la résistance du témoin. L'auteur de cette étude a attribué cette augmentation à l'élasticité du matériau céramique, qui se déforme avec l'augmentation de la contrainte [18].

En ce qui concerne le comportement à la flexion des échantillons renfermant les déchets de béton, la résistance diminue à fur et à mesure que la quantité de déchets augmente, mais les valeurs restent toujours supérieures à la valeur de référence. Cela peut s'expliquer par le fait que les déchets de béton sont plus rigides que ceux de céramique et que, par conséquent, le mélange de gypse contenant les déchets de béton devient beaucoup plus rigide à mesure que le pourcentage de déchets augmente, ce qui entraîne le développement plus précoce de fissures.

L'introduction des déchets de polystyrène expansé dans le mélange de gypse

renfermant les déchets de céramique et/ou de béton entraîne une diminution de la densité, de la dureté de surface et les résistances mécaniques. Cependant, les valeurs obtenues restent toujours meilleures que ceux des résultats obtenus avec l'échantillon de référence. Par conséquent, un effet synergique se produit lors de l'incorporation de déchets de céramique et/ou de béton (qui améliorent la résistance mécanique et la dureté superficielle) et de déchets de polystyrène expansé (qui réduisent la densité des mélanges), ce qui engendre un mélange aux propriétés équilibrées et au comportement similaire à celui du gypse de référence sans agrégats recyclés. L'ajout de déchets de polystyrène expansé dans les mélanges contenant des déchets de céramique et de béton diminue la densité des échantillons.

L'incorporation de déchets de céramique, de béton et de PSE dans le gypse crée un effet synergique entre les matériaux, car les mélanges obtenus présentent des propriétés similaires ou améliorées par rapport au gypse traditionnel sans ajouts.

Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il est pratique d'incorporer les déchets de béton, de céramique et les déchets de polystyrène expansé dans les mélanges de gypse pour être utilisé dans les revêtements intérieurs des bâtiments ou les éléments préfabriqués.

8. Conclusion

La confection de matériaux à base du plâtre présente de nombreux avantages, tels que la rapidité du durcissement et l'excellente qualité de moulage, qui permettent d'accélérer la fabrication des éléments préfabriqués et la cadence d'utilisation des moules. Mais en parallèle ces éléments ont un inconvénient essentiel qui est la faible résistance à l'eau. Afin d'améliorer les performances de ce matériau, il est conseillé d'utiliser des ajouts minéraux ou des fibres.

D'après la littérature, on peut constater qu'il existe peu de recherches sur l'effet des déchets de construction et de démolition sur les propriétés et le comportement du mortier de gypse. Il est donc intéressant d'étudier l'impact de l'introduction de la brique usagée sous forme de sable dans le mortier de gypse. L'objectif de notre recherche est d'étudier un nouveau matériau basé sur une matrice de gypse à appliquer dans la réhabilitation des ornements architecturaux.

L'influence du contenu de la brique usagée sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier est examinée. Ces propriétés comprennent la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance à l'adhésion, l'absorption d'eau et la microstructure. Les résultats de cette étude peuvent fournir une alternative pour la réutilisation des briques usagées dans le mortier de gypse utilisé pour la réhabilitation des ornements.

Chapitre IV :

Caractérisations des matériaux et méthodes d'essais.

IV. I. Caractérisation des matériaux

1. Introduction

Les granulats utilisés dans notre recherche représentent le facteur essentiel qui fournit les propriétés du mortier fourni. Certaines propriétés des granulats sont directement liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales, C'est le cas de la masse volumique réelle et l'absorption d'eau.

D'autres caractéristiques dérivent du mode d'élaboration des granulats, que ce soit après extraction alluvionnaire, ou par concassage, il s'agit principalement des paramètres liés à la distribution dimensionnelle des grains, et leurs formes, A ces paramètres s'ajoute leur réactivité chimique. Il en résulte une dispersion sur les caractéristiques finales du matériau élaboré, ce qui nous a obligé à une grande rigueur dans la spécification des matériaux.

Dans le présent chapitre, nous présentons en premier lieu les matériaux utilisés dans la présente recherche, en donnant leurs caractéristiques élémentaires. Ensuite, nous déterminerons la composition du mortier du plâtre et après nous détaillerons les étapes de confection des éprouvettes et le mode de conservation suivi du protocole expérimental.

2. Matériaux utilisés

Les essais de caractérisation des matériaux ont été effectués au laboratoire des matériaux de construction de l'Université de Minho du département de génie civil au Portugal. Les matériaux utilisés dans cette recherche pour confectionner le mortier composite sont : le g plâtre(G), le superplastifiant réducteur d'eau (S), le sable naturel (SN) et les déchets de brique (DB).

1-Le plâtre utilisé est un produit commercial utilisé dans la construction, fabriqué par la société SIVAL, il possède une grande finesse et une masse volumique de 2960 kg/m^3 .

2-Le sable naturel est un sable normalisé avec une granulométrie moyenne de $440 \mu\text{m}$ et une masse volumique de 2600 kg/m^3 (qui est le même sable utilisé dans les travaux de Cunha [34]).

3- Le sable artificiel à base de déchets de brique utilisé dans ces essais a été obtenu après un broyage mécanique au laboratoire à l'aide d'un broyeur à mâchoires de type

PE250x400 pour un concassage primaire et secondaire. Le produit final est tamisé de telle sorte à obtenir un matériau similaire au sable naturel (**voir Figure IV.1**).

4- Le superplastifiant réducteur d'eau utilisé est un GLENIUM SKY 617 avec une densité de 1050 kg/m^3 [35].



Figure IV.1: Equipements et méthode utilisés pour la préparation du sable à base de déchet de brique

3. Caractérisation des matériaux

Dans cette étude, les caractéristiques employées sont définies par le schéma illustré sur la **Figure IV.2**.

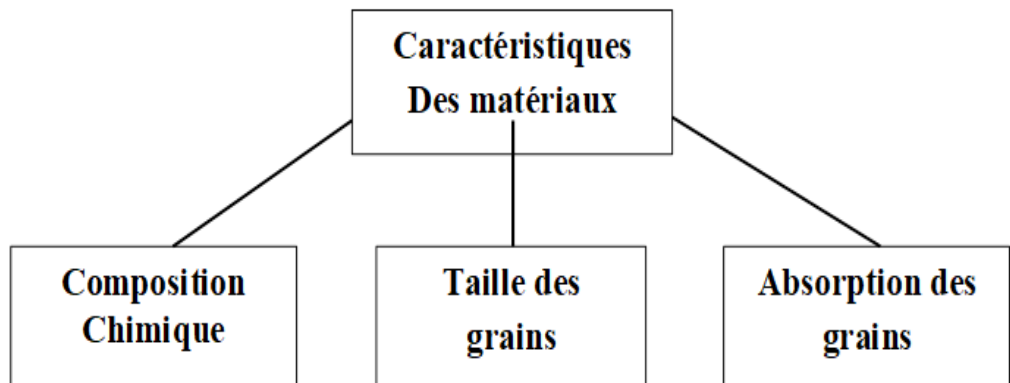


Figure IV.2: Organigramme de caractérisation employé

3.1. Composition chimique

La composition chimique des matériaux a été effectuée au niveau du laboratoire des analyses chimiques CMAT (Université de Minho, Portugal). Cette composition est présentée dans le Tableau IV.1. Le principal composant chimique du sable de quartz est le SiO_2 , sa teneur massique est supérieure à 83,6%. Le sable pur est presque entièrement constitué des grains de quartz cristallin.

Les résultats de l'analyse chimique montrent aussi que le sable issu des déchets de brique est une matière à base d'argile, essentiellement constituée de silice (39.55 %) et d'alumine (15.71 %). Cette grande différence entre les deux sables peut avoir une influence sur le mélange du plâtre incorporant ces granulats.

Tableau IV.1: Composition chimique (%) et caractéristiques des matériaux utilisés

Composition	Le plâtre	Sable naturel	Déchet de brique
SiO_2	10.5	83,6	39.55
Al_2O_3	2.99	10.9	15.71
F_2O_3	1.55	0,433	14.05
CaO	26.90	0,058	12.88
MgO	3.09		3.29
K_2O	0.41	3,56	1.98
Na_2O	0.05	0,238	0.00
SO_3	30.33	/	0.48
Cl	0.01	/	/
TiO_2	/	0,82	/
P_2O_5		0.06	/
Densité (kg/m^3)	2960	2600	2622

3.2. Analyse granulométrique

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (voir **Figure IV.3**), emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis dont les ouvertures carrées, de dimensions normalisées, sont à partir d'un maillage métallique et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis [36].



Figure IV.3: Essai de tamisage

La forme de la courbe granulométrique du matériau permet d'apprécier son degré d'étalement. Comme le montre la figure IV.4, les particules des deux matériaux passent à travers le tamis de 4,74 mm et plus de 50% d'entre elles sont inférieures à 74 mm, ce qui conduit à considérer les matériaux comme du sable fin. Les coefficients (coefficient d'uniformité) et (coefficient de courbure) permettent de dire si la granulométrie est uniforme ou serrée, la granulométrie est étalée ou variée, et s'il est compris entre 1 et 3, le sable est bien gradué.

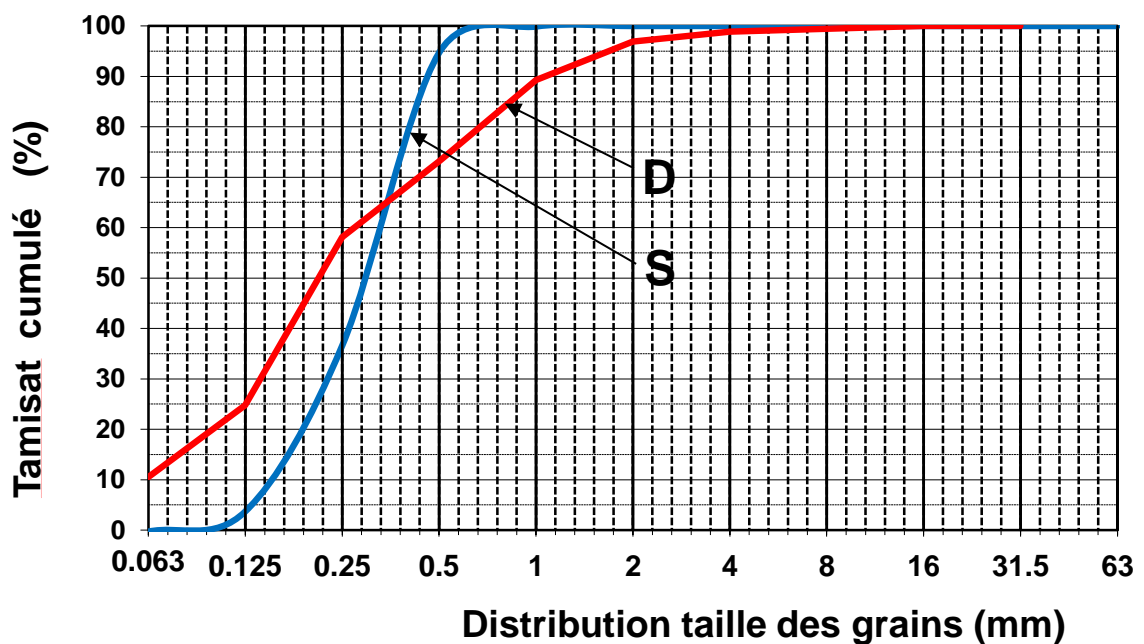


Figure IV.4: Distribution granulométrique des grains des deux sables.

La classification de type de sable est mentionnée dans le Tableau IV.2, les relations permettant le calcul du coefficient d'uniformité et le coefficient de la courbure sont comme suit :

$$Cu = D_{60} / D_{10}$$

$$Cc = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$$

D60 = diamètre correspondant à 60% plus fin en la distribution granulométrique.

D30 = diamètre correspondant à 30% plus fin en la distribution granulométrique.

D10 = diamètre correspondant à 10% plus fin la distribution granulométrique. Également connu comme taille efficace.

Tableau IV.2: Classification des différents types de sable selon lesUSCS

Sable	Plus de 50 % des éléments ≥ 0.074 mm et ont un diamètre ≤ 2.00 m	Moins de 5% d'éléments ≤ 0.074 mm	SB	Cu = $D_{60} / D_{10} \geq 6$ Et Cc = $(D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$ Entre 1 et 3	Sable propre bien gradué
			SM	Une condition de SB nom satisfaite	Sable propre mal gradué
		Moins de 12 % d'éléments ≤ 0.074 mm	SL	Limite d'atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux
			SA	Limite d'atterberg au-dessus de la ligne A	Sable Argileux

En utilisant le système de classification des sols (USCS) pour catégoriser les deux matériaux selon le test de distribution des particules, nous avons pu tirer les informations suivantes:

1-Les deux matériaux passent par le tamis de diamètre inférieur à $\varnothing 4,74$ mm et aussi plus de 50% des deux matériaux passent par le tamis de $\varnothing 0,074$ mm, cela montre qu'il est possible de les considérer comme un sable.

2-Le pourcentage des fines pour le sable naturel (SN) et le sable de déchet de brique (DB) de diamètre $\varnothing 0,074 \leq 50\%$, cela signifie que les deux matériaux sont considérés comme un sable grossier.

-Pour le sable SN : Cu = 2,33 et Cc = 0,96 (sable mal gradué)

-Pour le sable DB : Cu = 4,76 et Cc = 1,19. (sable bien gradué)

Nous pouvons conclure que le SN avait une courbe plus uniforme mais mal gradué, par contre le DB avait une courbe moins uniforme mais bien gradué. Selon les valeurs des coefficients d'uniformité et de courbure (C_u , C_c), le sable issu de DB, se présente comme un matériau bien calibré au regard du SN. Cela entraîne une bonne répartition des particules dans le mélange de mortier et résulte moins de pores (vides). On peut s'attendre à un comportement mécanique approprié pour le mortier à base de DB.

3.3. Absorption des grains des deux matériaux

L'absorption d'eau des granulats de sable naturel et sable de déchet de brique est effectuée selon la norme de la référence [36]. La densité de poudre de déchets de brique et du sable naturel a été déterminée en utilisant un ballon et du liquide de kérosène.

Dans cette étude, nous avons déterminé l'absorption d'eau à 24h pour chaque type de sables par l'essai normalisé qui consiste à immerger les granulats dans un pycnomètre rempli d'eau et à compléter la baisse du niveau de l'eau au cours de l'essai.

La difficulté de cet essai pour les sables provient de l'élimination des bulles qui peuvent rester piégées entre les grains. Les granulats sont séchés en surface à l'aide d'un sécheur et l'état dit « saturé surface sèche » est déterminé par l'essai du cône, il faut après le remplissage du cône que la forme reste plus au moins intact (**voir Figure IV.5**).

La densité du sable à base de déchet de brique et du sable naturel a été déterminée en utilisant un ballon et du liquide de kérosène selon la norme ASTM [36](**Figure.IV.6**), le kérosène est utilisé au lieu de l'eau afin d'éviter aucune réaction chimique.



Figure IV.5: Absorption d'eau des granulats de sable

L'absorption test des matériaux a également été effectuée pour déterminer l'absorption d'eau des deux matériaux par l'équation suivante :

$$P = \frac{(M_1 - M_3)}{(M_1 - M_2)} \times 100 = \frac{(M_1 - M_3)}{(M_1 - M_2)} \times 100$$

Avec P le taux d'absorption de l'échantillon

M1 : masse du pycnomètre rempli de kérosène+prise d'essai

M2 : masse de la prise d'essai séchée à l'étuve et du pycnomètre

M3 : masse du pycnomètre rempli de kérosène



Figure IV.6: Absorption des grains par liquide de kérosène

Tableau IV.3: Détail de calcul du taux absorption des grains.

Matériau	Masse des éprouvettes (g)			Pourcentage d'absorption de l'eau
	M1	M2	M3	
Sable naturel	508,3	306,35	498	5,10
Déchets de brique	500,78	273,86	454,9	20,22

On constate que le déchet de brique DB absorbe quatre fois la quantité d'eau que le sable naturel (voir **Tableau.IV.3** et **Figure.IV.7**). Selon cette observation, on s'attend à une différence dans le comportement rhéologique et mécanique du mélange avec et sans déchets de briques.

Ce taux élevé de l'absorption d'eau des granulats recyclés peut se traduire par une perte d'ouvrabilité du mortier à l'état frais.

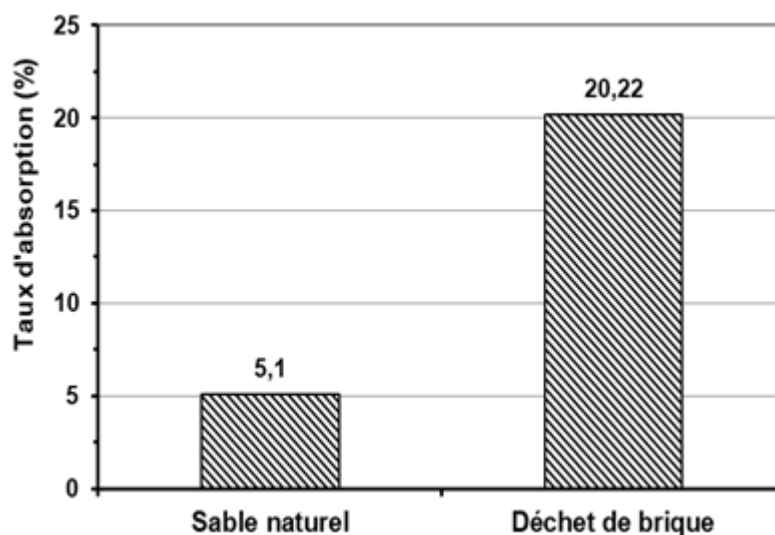


Figure IV.7: Taux absorption des grains.

4. Préparation du mortier

Cinq mortiers ont été réalisés avec du plâtre (G), du sable naturel (SN) et du déchet de brique (DB). Pour la formulation des mortiers, les taux utilisés par rapport au poids du sable naturel sont 25%, 50%, 75% et 100%. Le détail de la composition des mélanges est donné dans le Tableau IV.4.

Le dosage du superplastifiant (SP) incorporé dans le mélange du mortier est pris égal à 5% en se basant sur les travaux antérieurs de la littérature[37].

Tableau IV.4: Constitution des cinq mélanges de mortier pour 1 m³.

	SN% : DB%	E/G	G (g)	SN (g)	DB (g)	SP (g)	E (g)
M 1	100:0	0.40	800	976,20	0.00	40	270,67
M 2	75:25	0.45	800	650,14	216,71	40	283,02
M 3	50:50	0.50	800	381,21	381,21	40	297,52
M 4	25:75	0.52	800	180,16	540,48	40	303,48
M 5	0:100	0.55	800	0.00	660,74	40	306,40

La préparation du mortier a été effectuée par un malaxeur automatique (**voir Figure IV.8**) décrit dans la norme EN 196. Le malaxeur est muni d'une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses lentes et rapides (140 et 285 tr/min) de mortier pour la préparation de mortier selon les normes, ISO 679, DIN 1164, ASTM C 305.

**Figure IV.8: Malaxeur automatique utilisé dans cette étude**

Le rapport E/G du mortier est pris variable dans le but de maintenir un niveau d'ouvrabilité identique compris entre 17 et 18 cm (**voir Figure IV.9**), cela permet de développer un mortier qui être appliqué dans les applications de restauration. L'ouvrabilité a

été déterminée selon les normes. Lorsque le mortier est posé sur la table d'écoulement et après avoir été vibré pendant 25 s, le diamètre a été mesuré dans deux directions différentes [38].



Figure IV.9: Essai de mesure de l'ouvrabilité.

4.1 Confection des éprouvettes de mortier du plâtre

Les moules métalliques de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été bien nettoyé avant utilisation. Ensuite, le moule est huilé légèrement à l'intérieur afin de permettre un bon démoulage.

La norme de la référence[39] stipule de gâcher en une seule fois la quantité « m » du mortier nécessaire au remplissage du moule. La mise en œuvre se déroule comme suit ;

- 1) Peser les différents ingrédients qui font le mélange voulu.
- 2) Mettre ce mélange dans le malaxeur.
- 3) Verser la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage et la quantité de l'adjuvant
- 4) Malaxer pendant 90 secondes (mode automatique)
- 5) Verser la pâte dans le moule déjà préparé.
- 6) Pour éliminer les bulles d'air, à l'aide d'un vibreur on applique 8 fois la vibration.
- 7) Araser la surface du mortier à l'aide d'une plaque plane, dès que nous remarquons le début de la prise, afin qu'il n'y ait plus de pate débordante
- 8) Démoulage après la fin de la prise
- 9) L'éprouvette est numérotée sur la face à l'aide d'un crayon feutre.

Les éprouvettes sont confectionnées à base d'un mortier élaboré conformément à la norme européenne E1015-11 :1999[40]qui révèle de gâcher en une seule fois la quantité « m » du mortier nécessaire au remplissage du moule. La mise en œuvre se déroule comme suit. Après la pesée des différents ingrédients, le tout est mis dans le malaxeur de 5 l. On verse la

quantité d'eau de gâchage et la quantité d'adjuvant nécessaire et on mélange pendant 90 secondes. Le mélange est coulé dans des moules métalliques de $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ (voir **Figure IV.10**). On applique plusieurs fois la vibration pour éliminer les bulles d'air. On arase la surface du mortier à l'aide d'une plaque plane dès que le mortier atteint le début de prise.



Figure IV.10: Mode de préparation des éprouvettes de mortier

Pour les cinq mélanges, soixante éprouvettes sont préparées au total (12 pour chaque mélange). Le démoulage se fait après la fin de la prise selon les normes européennes [39]. Les éprouvettes sont alors numérotées et seront conservées à l'air libre et subiront les mêmes tests à différents âges (voir **Figure.IV.11**).



Figure IV.11: Eprouvettes de mortier après le démoulage.

IV. II. Méthode d'essais

1. Introduction

Ce travail de recherche vise à apporter une contribution à la valorisation des déchets de brique (DB) en tant qu'agrégats dans la composition des mortiers du plâtre. Il s'agit de comparer son influence sur les caractéristiques physiques et mécaniques de ces mortiers. Donc, le but est d'évaluer l'influence des agrégats artificiels (DB) à différents taux de substitution 0%, 25%, 50% et 75% par rapport à l'agrégat conventionnel (sable naturel) sur le comportement physique et mécanique du mortier du plâtre.

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés. Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitables, il a été nécessaire d'abord de réaliser des essais d'identification microstructurale. Dans ce but, on a fait appel à des observations à l'aide du MEB et la diffraction aux rayons X.

Après l'identification du mortier, nous avons établi une série de tests destructifs (rupture par traction, compression et adhésion) et un test non destructif (absorption). (**Voir Figure.IV.12**).

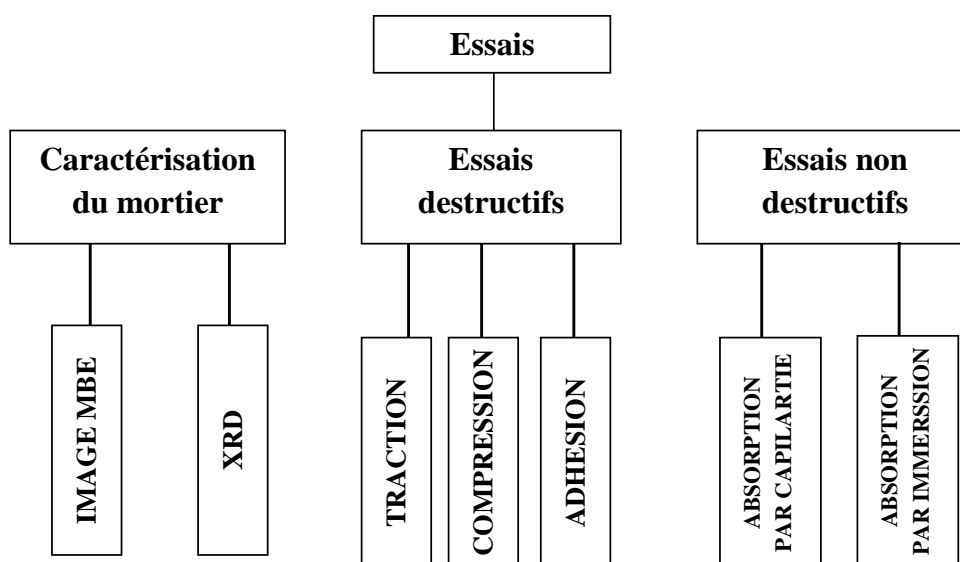


Figure IV.12: Organigramme des essais réalisés

Dans le présent chapitre, nous présenterons en premier lieu la caractérisation du mortier utilisé dans cette recherche, suivi par la description des essais réalisés.

Les essais ont été effectués au laboratoire des matériaux de construction dans le Centre pour le Territoire, l'Environnement et la Construction (CTAC), qui est une unité de recherche

de l'École d'Ingénierie de l'Université de Minho, reconnue par la «FST - (Fondation pour la Science et la Technologie), associée au Département de génie civil de l'Université de Minho au Portugal (DEC), avec lequel il partage des équipements et notamment des ressources humaines.

2. Caractérisation du mortier du plâtre

L'objectif principal de ce travail est de réaliser une approche chimique, microstructurale et caractérisation cristallographique de cinq types de mortiers, en utilisant la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB) et spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS), en tant que techniques analytiques.

Ces essais de caractérisation du mortier étaient effectués au niveau des services de caractérisation des matériaux à l'Université de Minho.

- **Microstructure**

Des analyses morphologiques ont été réalisées dans un pistolet à émission de champ à ultra-haute résolution Microscopie électronique à balayage (FEG-MEB), NOVA 200 Nano MEB, FEI Company à une tension d'accélération entre 10 et 15 kV (voir **Figure IV.13**).

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique d'observation de la matière en utilisant un faisceau d'électrons après avoir mis l'échantillon sous vide. Les micrographies de la figure 26 obtenues à partir de cette technique montrent la microstructure du matériau obtenu après traitement thermique.



Figure IV.13: Microscopie électronique à balayage (FEG-MEB), NOVA 200 Nano

- **Diffraction des rayons X**

La cristallographie aux rayons X ou diffractométrie de rayons X (souvent l'abréviation anglaise XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Elle est utilisée pour déterminer la structure cristalline des composants du mortier.

Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui rencontre le cristal provoquant la dispersion du faisceau lumineux dans des directions spécifiques. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons réfractés, il est possible d'obtenir une image tridimensionnelle de la densité électronique dans le cristal.

À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal peut être déterminée, ainsi que leurs liaisons chimiques, leur entropie et d'autres informations.

La diffraction des rayons X sur poudre (DRX) a été réalisée sur un Bruker D8 Discover (**Figure IV.14**) avec un rayonnement Cu-K α ($\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$) à 40 kV et 40 mA, en mode $\theta / 2\theta$. Chaque échantillon a été scanné de 5° à 90° à une vitesse de $0,04^\circ \text{ s}^{-1}$. L'analyse pour l'identification de phase a été réalisée à l'aide d'un logiciel d'analyse EVA. Les phases cristallines ont été indexées selon la base de données ICDD (International Center for Diffraction Data).

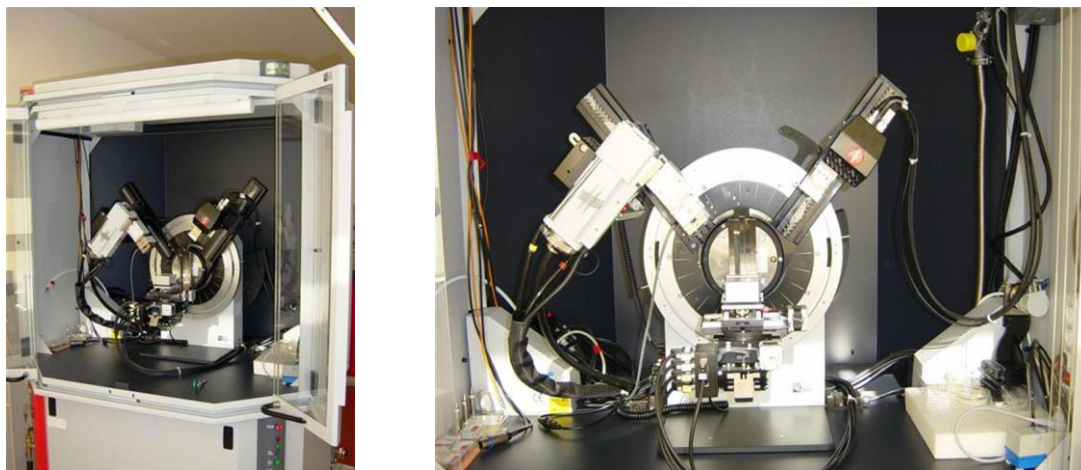


Figure IV.14: Analyse DRX Bruker D8 Discover

3. Essais d'absorption

La porosité est définie à la fois comme une propriété caractéristique d'un milieu poreux et comme un paramètre qui l'exprime quantitativement (rapport de volumes, sans dimension). La porosité est mesurée par le rapport du volume des pores au volume apparent total.

L'absorption d'eau est le pouvoir que possède un matériau pour absorber et retenir l'eau. On la détermine par la différence existante entre les poids d'un échantillon du matériau saturé d'eau et à l'état absolument sec.

Ces essais ont été effectués afin d'avoir une idée sur la porosité interne du mortier. Le débit d'eau est provoqué par l'action de la gravité et par des pressions externes. Le transfert de l'eau capillaire est provoqué par une différence de pression capillaire dans la microstructure poreuse. Les morceaux de prisme cassés susmentionnés (6 pour 5 mélanges) ont été placés dans l'étuve à une température de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ afin d'éliminer l'eau jusqu'à obtenir un poids constant, nous avons établi deux types des essais : absorption par capillarité et absorption par immersion.

3.1. Absorption par capillarité

Trois échantillons pour chaque mélange ont été scellés avec de l'époxy résine, pour être immergés après dans l'eau à une profondeur de 5 mm selon la norme EN 1015-18: 2002 [41] établie pour l'essai d'absorption par capillarité (Voir Figure IV.15).



Figure IV.15 : Essai d'absorption par capillarité

3.2 Absorption par immersion

Les trois autres morceaux réservés pour le test d'absorption par immersion ont été immergés en totalité dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24h jusqu'à la saturation du matériau (**Voir Figure IV.16**). La quantification de l'eau absorbée a été réalisée en effectuant des pondérations consécutives dans les échantillons à 5, 10, 20, 30, 60 et 1440 min, conformément à la norme EN 13279-2: 2014.



Figure IV.16: Essai d'absorption par immersion

4. Essais destructifs

Les essais destructifs sont réalisés dans le but de mesurer les résistances mécaniques. Cette dernière est exprimée par le pouvoir du mortier à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à différentes charges de compression ou de traction par flexion ou à l'adhésion.

Durant le programme expérimental, Nous avons pris en considération deux paramètres :

En premier lieu, le pourcentage de remplacement du déchet de brique dans le mortier de gypse du plâtre. L'effet du taux de substitution du déchet de brique dans le mortier de gypse du plâtre sur le comportement physique et mécanique du mortier est évalué à travers les essais effectués.

Le deuxième paramètre pris en considération est le type de support vis-à-vis des essais d'adhésion. Deux types de supports ont été sélectionnés ; à savoir la pierre de calcaire et la brique de maçonnerie. Le choix de ces deux types des substrat est basé sur la nature de la

majorité des cloisons des façades coloniales en Algérie décorés par les ornements architecturaux qui sont exécutés en brick ou en pierre de calcaire [42].

4.1. Essai de traction par flexion

On a mesuré la résistance à la traction des cinq types du mortier par l'essai de flexion à trois points. C'est l'essai qui fournit des informations sur la résistance à la rupture d'un matériau. Le principe de cet essai est montré dans la figure IV.17, où une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis (couleur bleu) et l'on applique au centre de la barrette une force croissante (couleur rouge) jusqu'à rupture.

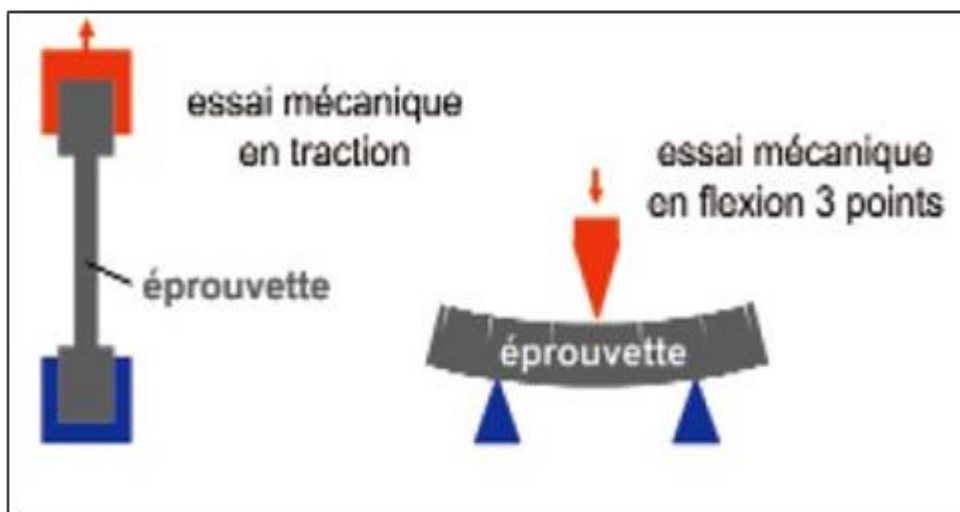


Figure IV.17: Principe de traction par flexion

L'essai de flexion à trois points est réalisé sur l'éprouvette 4cm x 4 cm x 16cm à l'aide de la machine LR50K illustré sur la Figure IV.18. Avant la mise en marche de la machine d'essai, nous veillons à ce que les arrêtes de l'éprouvettes soient bien perpendiculaires aux appuis et à ce que le palmer de charge soit bien équidistant des rouleaux inférieurs.

Les trois plans verticaux passant par l'axe des rouleaux doivent être parallèles et doivent le rester pendant l'essai pour permettre une distribution uniforme de la charge sur la largeur de l'éprouvette prismatique, en évitant tout effort de torsion. La charge P croit jusqu'à ce que l'écrasement de l'éprouvette se produise.

La valeur de la charge P qui a provoqué la rupture, donnée par l'afficheur est enregistrée automatiquement.

La valeur de la résistance à la flexion de l'éprouvette est donnée par l'équation 5.2. Les éprouvettes seront testées aux âges 7, 14 et 28 jours. La valeur prise en considération est la valeur moyenne de trois écrasements.

$$R_f = \frac{M}{I}y$$

Avec M le moment de flexion appliqué sur la poutre de mortier de plâtre, I l'inertie de la section de l'éprouvette et Y la distance de la fibre la plus éloignée de l'axe neutre de la section de l'éprouvette.

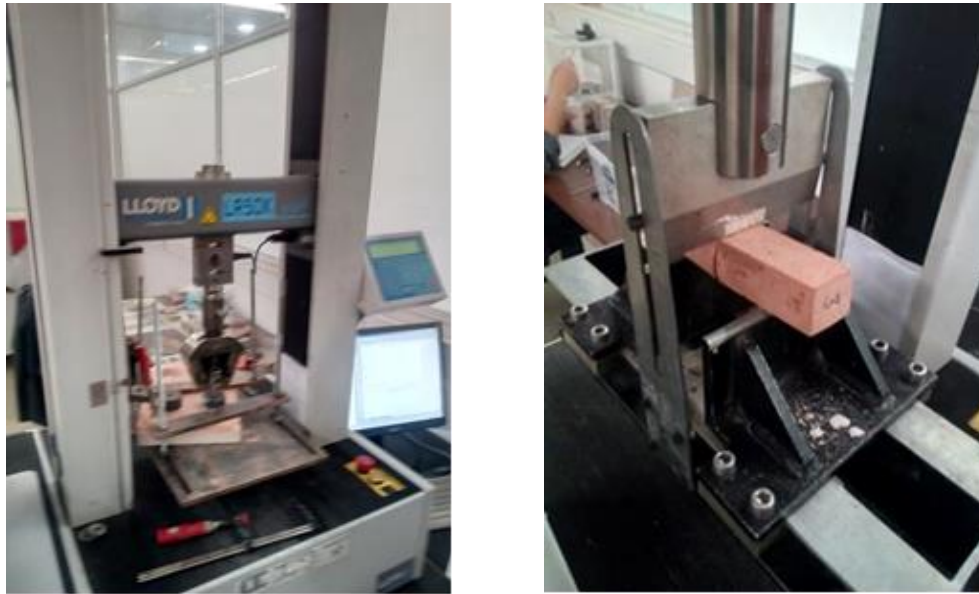


Figure IV.18: Dispositif d'essai de traction par flexion

4.2 Essai de compression

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées.

L'essai est effectué par la même machine utilisée pour l'essai de flexion en changeant les accessoires, La contrainte de rupture par compression R_c est déterminée sur les deux demi-éprouvettes récupérées lors de l'essai de flexion. Chaque demi-éprouvette est soumise à la compression sur ses faces latérales de moulage(voir **Figure IV.19**) , sous une section de 4cm x 4cm, entre deux plaques de métal conforme à la norme européen [39].

L'ensemble des deux demi-éprouvettes sont placés dans l'accessoire correspondant de façon que l'axe des sections de compression soit centré sur le plateau supporté et le vérin. La charge P croit jusqu'à ce que l'écrasement de l'éprouvette se produise.

On note alors la valeur de la charge P , qui a provoqué la rupture, donnée par l'afficheur. La résistance à la compression R_c est le rapport de la charge P à la section, exprimée en MPa.

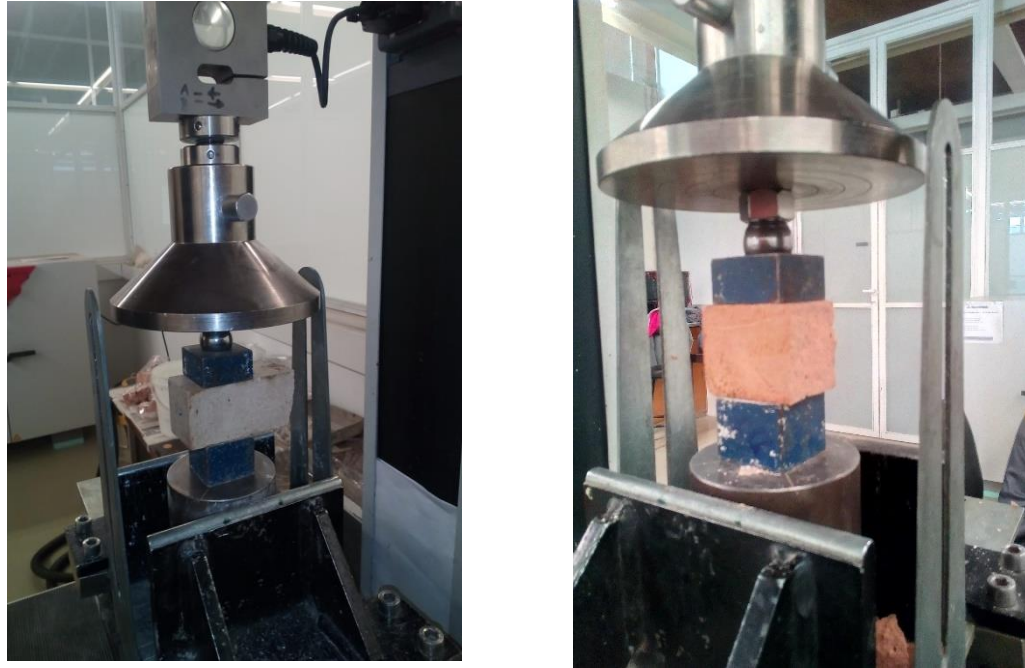


Figure IV.19. Dispositif d'essai de compression

4.3. Essai d'adhésion

La méthode utilisée pour déterminer la force d'adhérence est le test d'arrachement, il est basé sur le concept de la contrainte de traction nécessaire pour extraire un disque métallique avec une couche du mortier à partir de son support.

Pour faire cela, il faut effectuer une couche partielle dans le support d'une épaisseur de 15 cm et coller un disque métallique à la surface d'essai, La découpe permet aux tensions produites de résulter exclusivement de la traction et la zone sur laquelle la force est exercée pour être effectivement la zone où le disque métallique est collé (**Figure IV.20**).

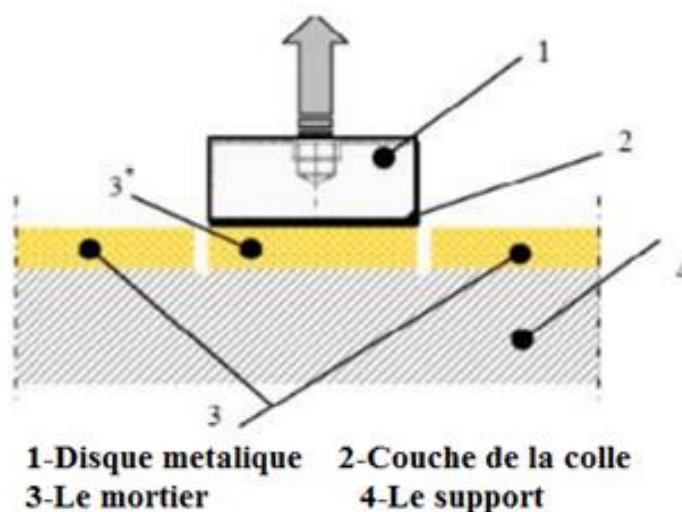


Figure IV.20: Schéma de principe de l'essai d'adhésion

Les tests d'adhérence seront effectués sur les cinq mélanges de mortier préparés M1, M2, M3, M4 et M5 qui auront deux types de supports, à savoir la pierre de calcaire et la brique de maçonnerie. Le choix du type de support est lié à la majorité des murs décorés d'ornements dans les anciens bâtiments qui sont réalisés soit en brique de maçonnerie ou de pierre calcaire dans les pays de la rive sud et nord de la Méditerranée [42].

Le processus de test a été effectué conformément à la norme EN 1015-12 [43]. Le mortier d'environ 15 mm est appliqué sur la surface des deux supports (5 briques et 5 pierres de calcaire) à l'aide de deux plaques de bois et conservé pendant 28 jours (Figure IV.21).



Figure IV.21: Pose du mortier sur les supports

Après 28 jours de la prise du mortier, on enlève les deux planches et on trace six (06) cercles avec une distance de 2.5 cm entre les cercles, après on coupe ces échantillons en six

(06) trous circulaires de dimensions 50 x 50 mm² à l'aide d'un équipement composé d'un tube cylindrique mis en contact avec la surface du mortier. Lorsque le tube atteint l'extrémité du support et on aperçoit un changement de couleur de la poussière dégagée, alors on arrête le percement. On procède au nettoyage des trous de la poussière à l'aide d'un nettoyeur à air à haute pression afin d'obtenir des surface lisses. Un disque métallique de diamètre Ø50 mm est collé avec une résine époxy dans ces trous et on laisse l'adhésif sécher pendant 24 heures. La procédure de préparation des échantillons est illustrée sur la figure IV.22.



Confection des trous circulaires dans le mortier

Nettoyage de la surface des trous dans le mortier

Collage du disque métallique Ø50 mm sur le trou

Figure IV.22 : Mise en œuvre des échantillons pour le test d'adhérence

Au cours du test d'adhérence, une inspection optique a été effectuée sur la surface où le mortier a été appliqué dans le but d'évaluer le mode de rupture entre le mortier et le support. La force d'adhérence a été mesurée par la même machine utilisée pour mesurer la résistance à la compression (machine LR50K).

On applique la charge de traction perpendiculairement à la zone d'essai à travers les plaques de tête de traction au moyen de cette machine. La charge doit être appliquée sans choc et à une vitesse uniforme de sorte que la contrainte augmente jusqu'à ce que la rupture se produise (**voir Figure IV.23**). On enregistre la charge de rupture. Le test n'est pas accepté lorsque le mode de rupture est une rupture au niveau ou à proximité de la couche adhésive entre la plaque à tête de traction et le mortier. La valeur moyenne de la résistance d'adhérence a été calculée en utilisant l'équation $A = F / S$, où A est la résistance d'adhérence; F est la force maximale; et S est l'aire de la surface des trous de mortiers.



Figure IV.23: Dispositif d'essai d'adhésion

5. Conclusion

Notre objectif principal est la restauration durable des ornements architecturaux en utilisant un mortier du plâtre à base de déchets de brique recyclés comme une substance alternative. Afin d'élaborer l'étude expérimentale, nous avons présenté dans ce chapitre un protocole expérimental composé de deux parties :

a)-Caractérisation des matériaux : cela à travers l'analyse chimique, granulométrique et microscopique des matériaux utilisés.

b)-Préparation des éprouvettes et essais réalisés : d'abord nous avons commencé par les essais physiques et on terminera par les essais mécaniques (traction et compression, et d'adhésion).

Pour formuler un mortier à partir des granulats naturels (sable naturel) ou recyclés (déchet de brique) nécessite une bonne connaissance de leur propriété pour respecter les critères de résistance mécanique minimale et les valeurs limites de composition telle que le rapport Eau/Gypse. Donc il faut savoir quantifier la quantité d'eau pour adopter une bonne formulation de mortier à base de ces granulats recyclés pour améliorer les performances des mortiers à base de granulats recyclés en fixant le rapport E/G à une valeur optimale.

Nous avons remarqué que les granulats du déchet de brique forment une courbe plus élargie que le sable naturel, alors il contient plus de différents diamètres si on le compare par le sable naturel, par contre il a un taux d'absorption d'eau plus élevé, qui consomme plus d'eau pour avoir la même ouvrabilité que le mortier à base de sable naturel.

Chapitre V :

Résultats et discussion.

1. Comportement du mortier de plâtre à l'état frais

1.1. Influence du rapport E/G

L'objectif est l'obtention d'un mortier ayant une ouvrabilité constante dont l'affaissement varie entre 17 et 18 cm, ce qui permet et facilite l'application des différents travaux de réhabilitation des ornements architecturaux. Le rapport eau/gypse (E/G) de différents mortiers est montré sur la Figure V.1.

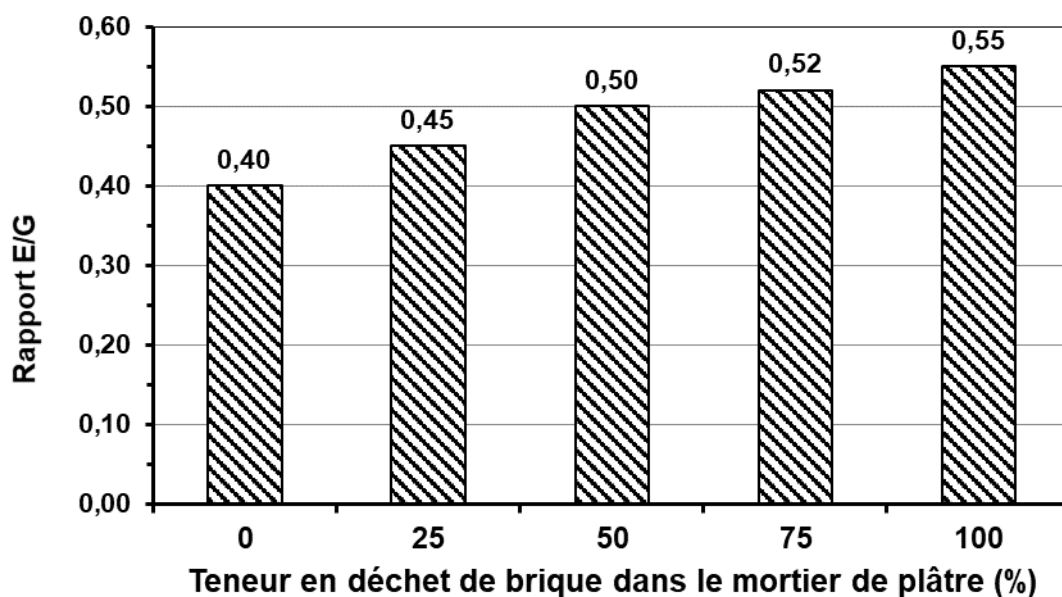


Figure V.1: Rapport Eau/Gypse (E/G) de différents mortiers.

Comme on peut l'observer sur la figure ci-dessus, le rapport E/G augmente en fonction de la teneur de déchet de brique.

On remarque que le mortier composé de 100 % de sable naturel (0% DB) a le plus faible rapport E/G, par contre le mortier de 75% et 100% déchet de brique (75% DB et 100% DB) ont le plus grand rapport E/G. Cela peut être attribué à la grande valeur d'absorption d'eau par le déchet de brique. Alors, pour maintenir une ouvrabilité identique pour tous les mélanges de mortier et semblable au mortier de 100% SN (0% DB), une petite quantité d'eau est ajoutée au mélange.

Il est clair que l'introduction de déchet de brique diminue l'ouvrabilité du mélange.

En général, le sable mortier du SN a une ouvrabilité meilleure que celle du sable de DB, cela est associé aux grains de DB qui absorbent plus d'eau et ont besoin de quatre fois la

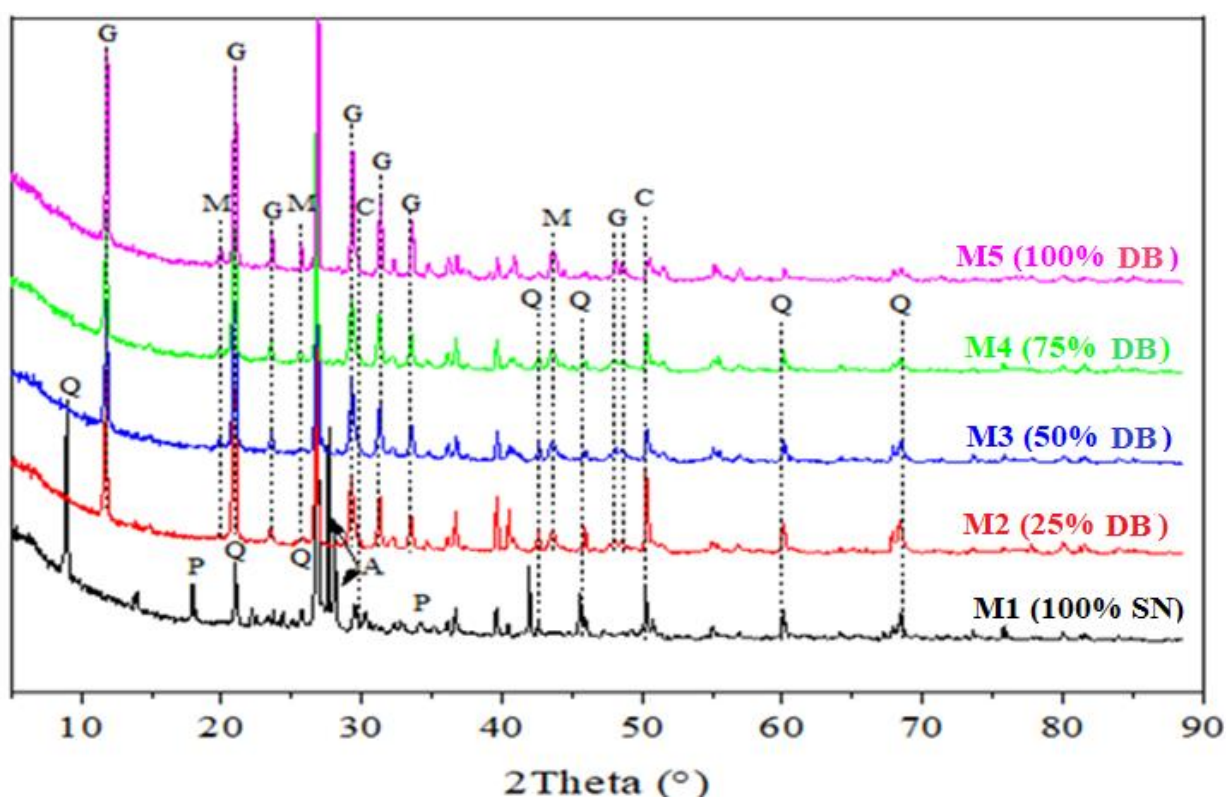
quantité d'eau par rapport au sable SN pour avoir la même ouvrabilité. Cela signifie qu'à chaque fois qu'on remplace la quantité de SN par le déchet de brique, on constate une augmentation du taux d'absorption du mélange. Cette augmentation de la quantité d'eau par rapport à la quantité du plâtre est d'environ 10%.

2. Comportement du mortier de plâtre à l'état durci

2.1. Caractérisation du mortier

2.1.1. Résultats de la diffraction des rayons X (DRX)

Les résultats de la diffraction des rayons X des 5 échantillons après 28 jours de durcissement sont présentés sur la Figure V.2.



Q: Quartz, P: Portlandite, A: Albite, C: Calcite, G: Gypse, M: Museovite

Figure V.2: Analyse de diffraction des rayons X des échantillons de mortier

Les profils de diffraction de M1 (100% SN) présentent certaines phases minérales telles que le Quartz, Albite, Portlandite et Calcite comme principales phases cristallines. Les quatre autres mélanges présentent la disparition de la phase principale du quartz avec la diminution de la teneur en sable naturel dans les échantillons. La trace de la phase du plâtre de gypse était présente dans les échantillons renfermant le DB, alors qu'elle n'était pas présente dans l'échantillon de mortier incorporant le sable naturel. Cela peut s'expliquer par la présence de sable qui cache la phase du gypse. Les échantillons présentent également le reflet de la phase

calcite et la phase moscovite, qui sont probablement les phases majeures du déchet de la brique. L'augmentation de leur reflet avec l'augmentation de la teneur en déchet de brique dans le mélange peut éventuellement expliquer mieux les résultats d'adhérence retrouvés plus tard.

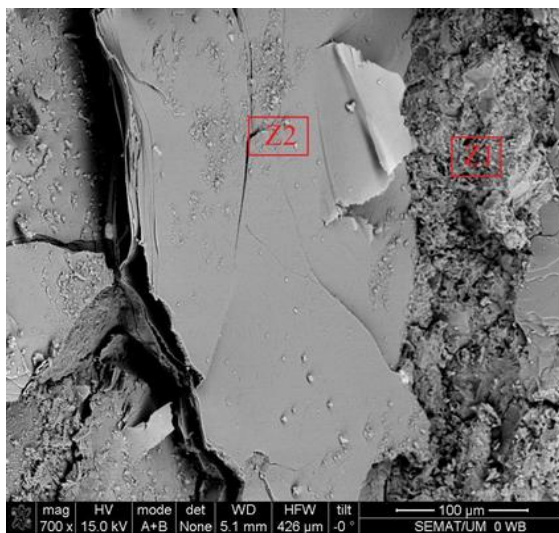
L'apparition de la phase portlandite dans le mortier contenant uniquement du sable et sa disparition dans le mortier renfermant le DB peut signifier que cette phase a été probablement consommée par le déchet de brique donnant des phases de C-S-H supplémentaires.

Cette observation peut probablement indiquer le comportement pouzzolanique du déchet de brique. Cependant, la phase C-S-H n'a pas été détectée dans les profils DRX, ce qui peut conduire à deux hypothèses ; soit les C-S-H formés sont amorphes, soit la quantité de CSH est si faible pour être détectée par l'analyse DRX.

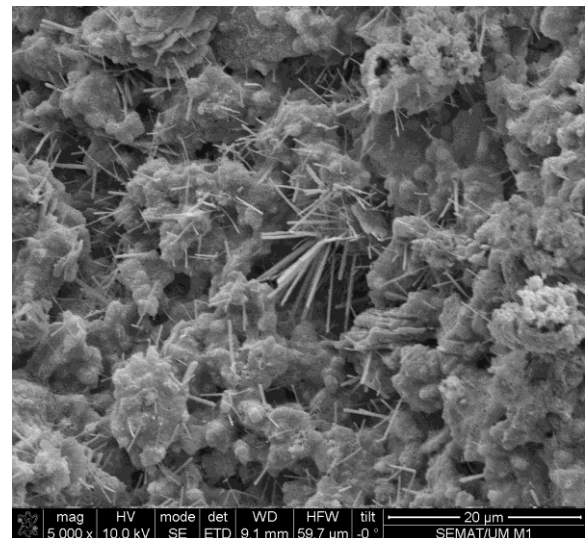
En revanche, la diffraction des rayons X des échantillons réalisés avec le DB n'a montré aucune trace d'autres nouvelles phases cristallines ; par conséquent, il est raisonnable de dire que le déchet de brique n'a pas eu de réaction chimique avec le gypse après le malaxage.

2.1.2. Résultats de la microscopie à balayage électronique(MEB)

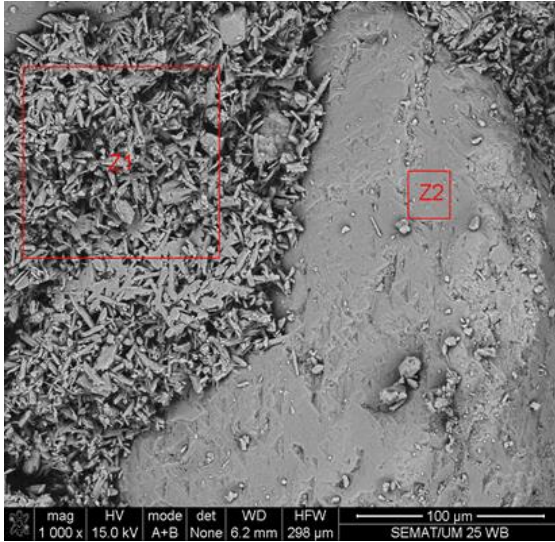
Des images microscopiques à balayage électronique des mortiers hydratés à 28 jours confectionnés avec différentes quantités de DB sont présentées sur la Figure V.3.



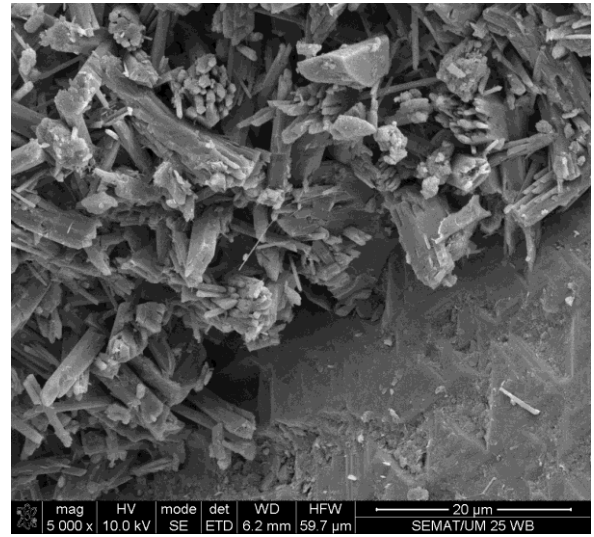
A
M1 (100% SN) Ech : 100μm



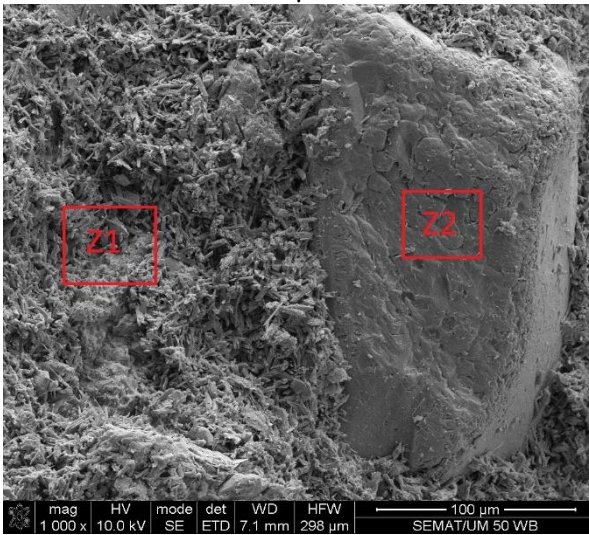
M1 (100% SN) Ech : 20 μm



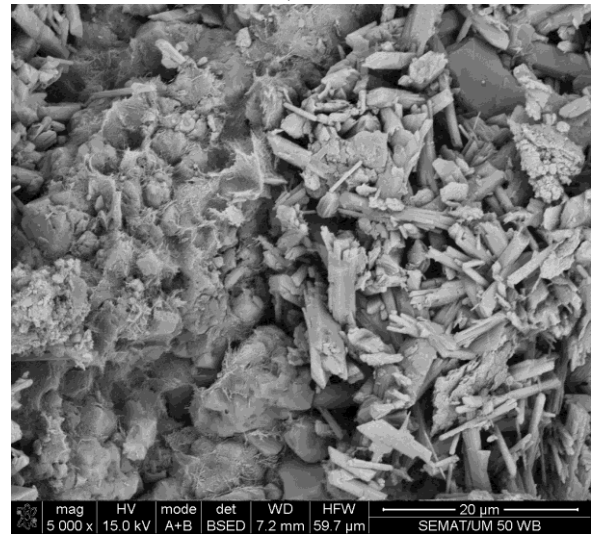
B
M2 25% DB Ech : 100µm



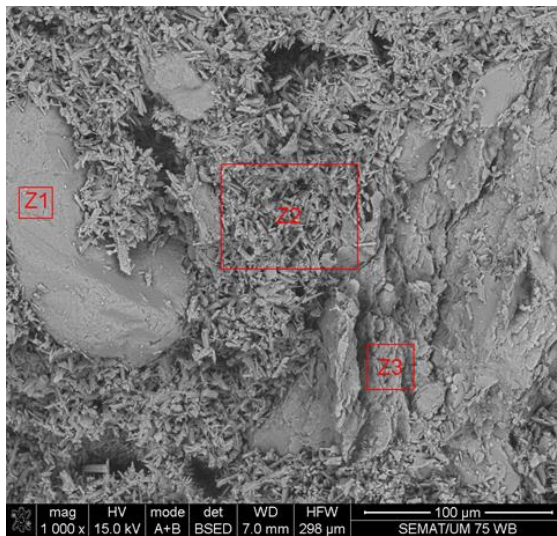
M2 25% DB Ech : 20µm



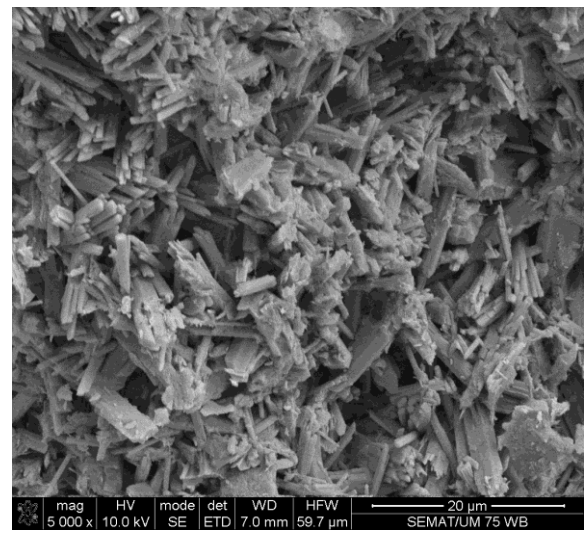
C
M3 50% DB Ech : 100µm



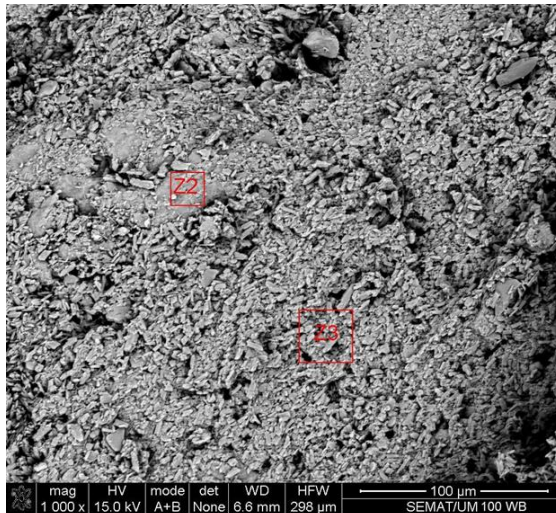
M3 50%DB Ech : 20µm



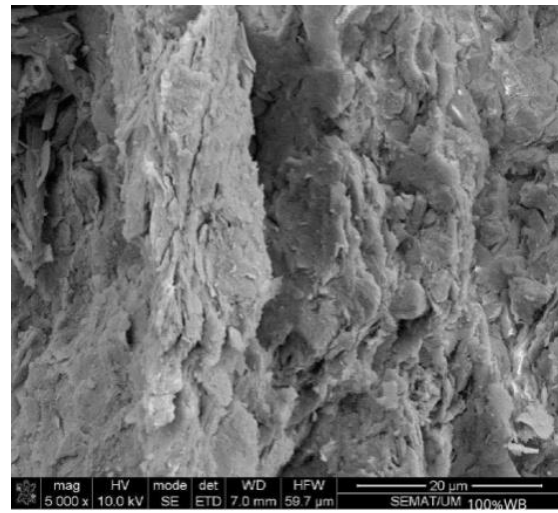
D
M4 75%DB Ech : 100µm



M4 75%DB Ech : 20µm



E
M5 100% DB Ech : 100µm



M5 100% DB Ech : 20µm

Figure V.3: Images MEB des cinq échantillons contenant différentes quantités de DB

Les échantillons présentent différentes zones avec différents aspects. On peut observer que la structure de la zone Z1 est différente de celle de la zone Z2. Lors de l'augmentation de la teneur de DB, la surface de la zone Z2 augmente et la surface Z1 diminue simultanément (voir figure 6-A & B). L'image C affiche une nouvelle zone nommée Z3 en plus des zones Z1 et Z2, la zone Z1 est toujours en diminution. L'échantillon incorporant 75% de DB n'affiche que la zone Z3 et une petite surface de Z2 (voir figure D).

Il est à penser que lorsque le mortier renferme plus de quantités de DB, la microstructure devient plus dense, probablement à cause des différentes distributions granulométriques du DB. Les particules de DB remplissent probablement les vides et les pores et rendent les mortiers de gypse plus compacts. Une microstructure compacte et dense peut être le résultat de la formation des zones Z2 et Z3, ce qui peut avoir un impact sur la résistance mécanique des mortiers à base de DB.

La composition chimique des différentes zones observées par le MEB dans les cinq échantillons est présentée dans le Tableau V.1. On constate une forte concentration de l'oxygène O au niveau de la zone 1 et une forte concentration de Si au niveau de la zone 2.

Tableau V.1: Compositions chimiques des zones dans les différents mélanges

	M1		M2		M4		M5		
	Z1	Z2	Z1	Z2	Z1	Z2	Z3	Z2	Z3
C	8.46	14.47	6.74	/				10.38	9.44
O	31.42	39.12	53.84	51.17	55.12	42.26	42.85	27.01	41.18
Mg	2.48	0.56	1.91	/			0.71		
Al	5.25	16.07	1.06	/		0.92	13.92	2.22	5.92
Si	8.80	21.42	2.41	47.07	43.34	3.23	26.02	49.37	12.71
S	/	/	14.13	0.83	0.61	21.00	1.56	3.43	12.39
K	1.55	7.09	/	/			4.33		
Ca	37.37	1.01	19.89	0.96	0.93	32.58	2.17	4.54	15.65
Fe	4.29	/	/	/			7.18	3.05	2.72

2. 2. Absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau par immersion des mortiers de plâtre est représentée sur la figure V.4 en fonction de la teneur en déchet de brique. La quantité d'eau absorbée par immersion dans les mortiers de plâtre augmente avec l'introduction de la teneur en déchets de brique. Le taux d'augmentation est d'environ 20% pour le premier et deuxième taux de remplacement et 6% pour le troisième et quatrième taux de remplacement. Cette progression est initialement excessive entre M1/M2 et M2/M3; de plus il devient faible entre M3/M4 et M4/M5.

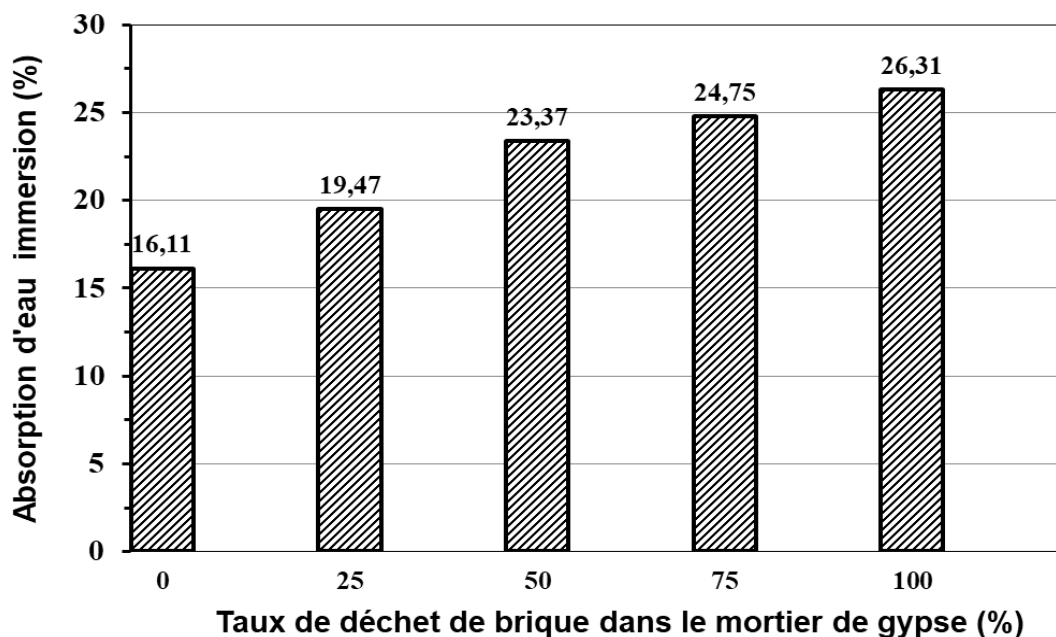


Figure V.4 Absorption d'eau par immersion en % des mortiers

Bien que la densité des déchets de brique soit similaire à celle du sable, le mortier de gypse réalisé avec uniquement le sable naturel (M1) et le mortier de gypse réalisé avec les déchets de brique n'ont pas la même valeur d'absorption. Cette absorption est associée à la structure poreuse du matériau DB par rapport à celle du SN.

2.3. Absorption d'eau par capillarité

La variation de l'absorption d'eau par capillarité des différents mortiers de plâtre en fonction du temps (exprimée ici en racine carrée du temps) est représentée sur la Figure V.5. L'échantillon M1 (mortier témoin) indique le temps de saturation rapide à 120 min. Ce temps augmente avec l'introduction de 25% de DB et devient 240 min pour le mortier M2, tandis que M3, M4 et M5 affichent approximativement le même taux d'absorption avec environ 360 min. Il est à noter que le mortier témoin a besoin de 120 min pour atteindre la saturation ; cependant, le mortier avec 100% DB a besoin de 360 min pour atteindre ce niveau de saturation malgré la différence de niveau de saturation .

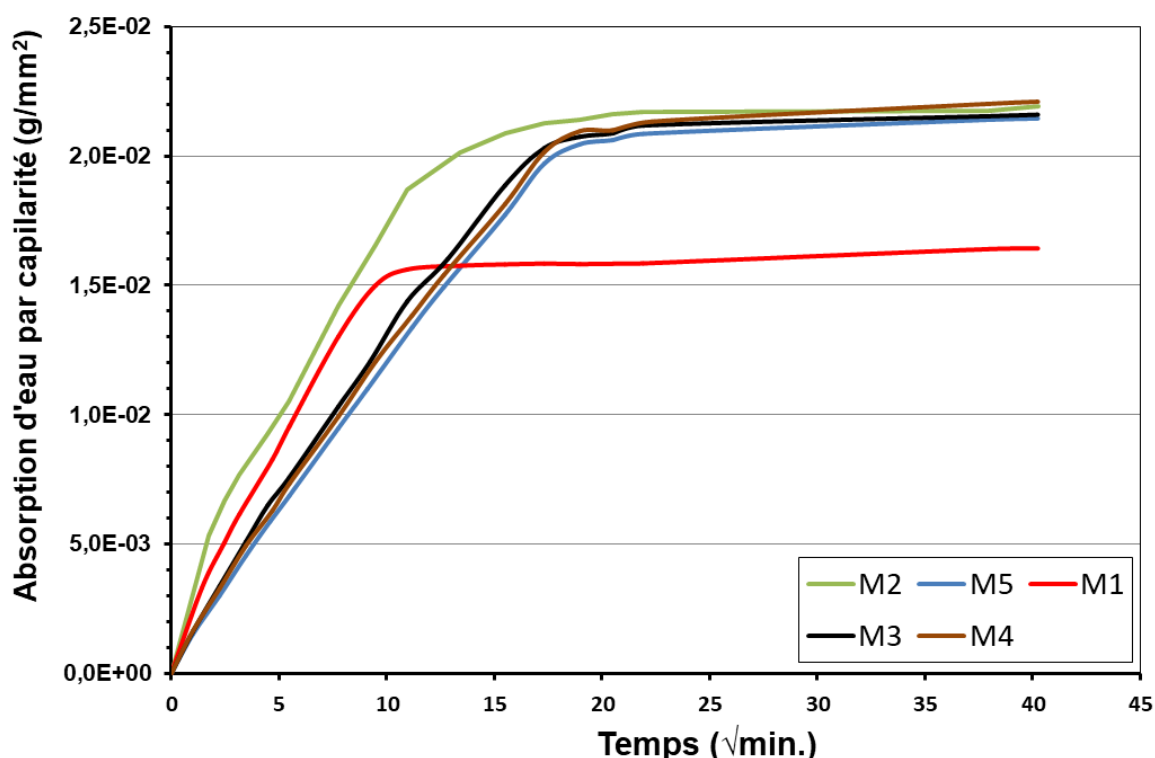


Figure :V.5 Absorption d'eau par capillarité des mortiers en fonction du temps.

La différence d'absorption d'eau par capillarité entre le mortier avec et sans DB est d'environ 37%. Bien que cela affecte le comportement mécanique des mortiers de plâtre, les mortiers incorporant du DB présentent une résistance à l'eau tout à fait acceptable pour être utilisée pour les éléments décoratifs selon certains auteurs [29]. Le taux d'absorption exprimé par la pente de l'absorption d'eau est plus prononcé pour l'échantillon M1 et M2 que pour les autres, ce qui peut refléter la résistance à l'eau des mortiers fabriqués avec une quantité élevée de DB

2.4. Résistances mécaniques

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux. Les résultats moyens de toutes les résistances de 7, 14 et 28 jours (compression, flexion) des mortiers de plâtre ainsi que de l'adhésion de l'échantillon pour les deux types de supports (brique et pierre en calcaire) à l'âge de 28 jours sont discutés dans ce qui suit.

2.4.1. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été mesurée sur des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm³ jusqu'à l'échéance de 28 jours. La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance moyenne à la traction par flexion. (Voir Figure.V.6).



Figure V.6: Eprouvette soumise à l'essai de flexion.

Le tableau V.2 présente les valeurs des résistances à la traction par flexion (MPa) des différents mortiers en fonction de l'âge.

Tableau V.2: Résultat des résistances à la traction par flexion des mortiers du plâtre.

Mélanges		M1 (0%DB)	M2 (25%DB)	M3 (50%DB)	M4 (75%DB)	M5 (100%DB)
Résistance à la traction par flexion (MPa)	7j	1.76	1.89	1.83	1.80	2.37
	14j	1.90	1.98	2.12	2.11	2.58
	28j	2.10	2.11	2.17	3.17	3.66

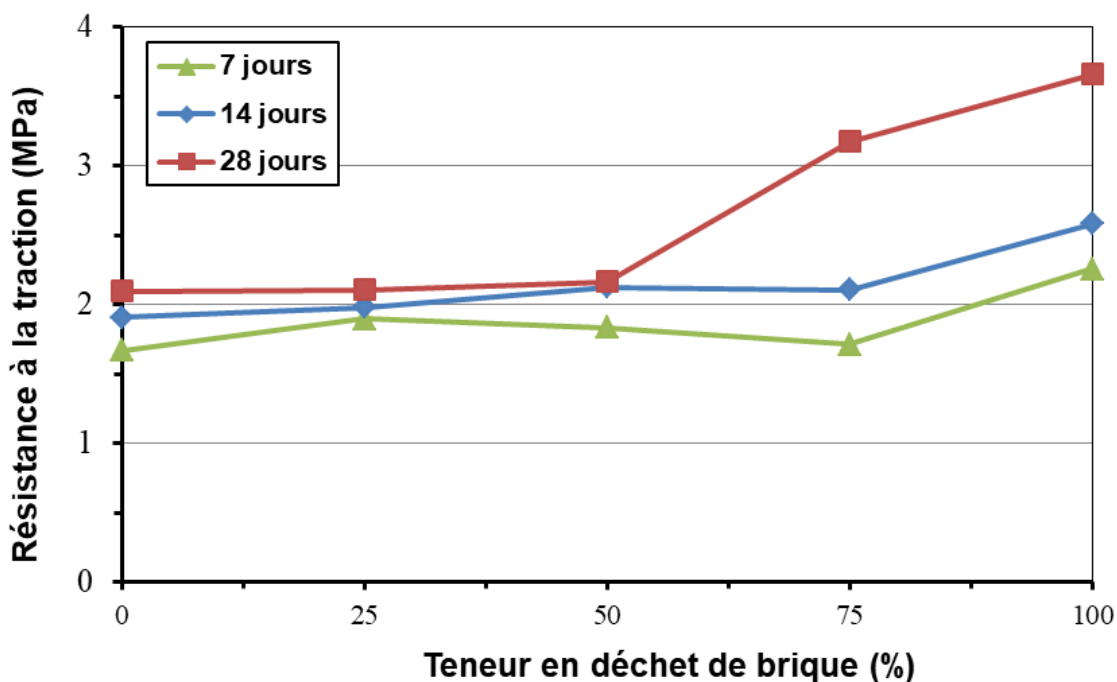


Figure V.7: Résultats des résistances à la traction par flexion des mortiers de plâtre en fonction de l'âge.

De la Figure V.7, on constate que la meilleure résistance à 7 jours est enregistrée par M5 avec 2.37 MPa, après M2 et M3 avec des résultats très proches (1.89 et 1.83 MPa), la faible résistance était enregistrée par M1 avec 1.76 MPa. Cela prouve que l'introduction des déchets de brique dans le mélange de plâtre a une influence positive sur la résistance à la traction au jeune âge. A 14 jours, nous remarquons aussi que les résultats de la résistance à la traction de M1/M2/M3/M4 sont aussi presque similaires, à l'exception du M5 qui représente la meilleure résistance. Le mortier M5 contient seulement des déchets de brique, comme si la présence de sable empêche le développement des résistances. A 28 jours, on constate que les résultats varient entre 2.10 et 2.17 MPa pour M1/M2/M3, mais on remarque que M4 enregistre des bons résultats de traction avec 3.17 MPa. La meilleure résistance est toujours fournie par l'échantillon M5 mentionné avec 3.66MPa.

L'évolution de la résistance à la traction des mortiers de gypse avec la teneur en DB en fonction de l'âge est illustrée dans la Figure V.7. On enregistre une très légère augmentation de la résistance de traction entre 7, 14 et 28 jours d'une moyenne de 5% pour les mortiers M1, M2 et M3, mais en revanche, le mortier M4 et M5 fournissent des meilleurs résultats à l'âge de 28 jours avec un remplacement de plus de 50% du DB.

Il semble que lorsque le taux de remplacement de la brique usagée est égal ou inférieur à 50%, aucun effet significatif de la présence de la brique usagée n'est pas observé sur le comportement en flexion des mortiers. Au-delà de cette teneur, les mortiers commencent à montrer une claire corrélation entre le taux de DB et la résistance à la traction en particulier à 28 jours. Probablement le taux élevé de déchet de brique engendre une activation au niveau des réactions d'hydratation du mélange de plâtre.

2.4.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression des échantillons de mortiers a été mesurée sur des demi-éprouvettes obtenues après l'essai de traction par flexion (si celles-ci ne sont pas endommagées). Ces mesures ont donc été effectuées sur six (06) demi-éprouvettes. La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance à la compression.



Figure V.8: Essai de compression sur le mortier du plâtre

Le tableau V.3 présente les valeurs des résistances à la compression (en MPa) des différents mortiers en fonction de l'âge.

Tableau V.3: Résultats des résistances à la compression des mortiers du plâtre en fonction de l'âge.

Mélanges		M1 (0%DB)	M2 (25%DB)	M3 (50%DB)	M4 (75%DB)	M5 (100%DB)
Résistance à la compression (MPa)	7j	3.46	4.48	4.05	4.82	6.78
	14j	4.70	6.48	6.46	6.77	6.96
	28j	5.34	6.89	6.93	7.35	8.05

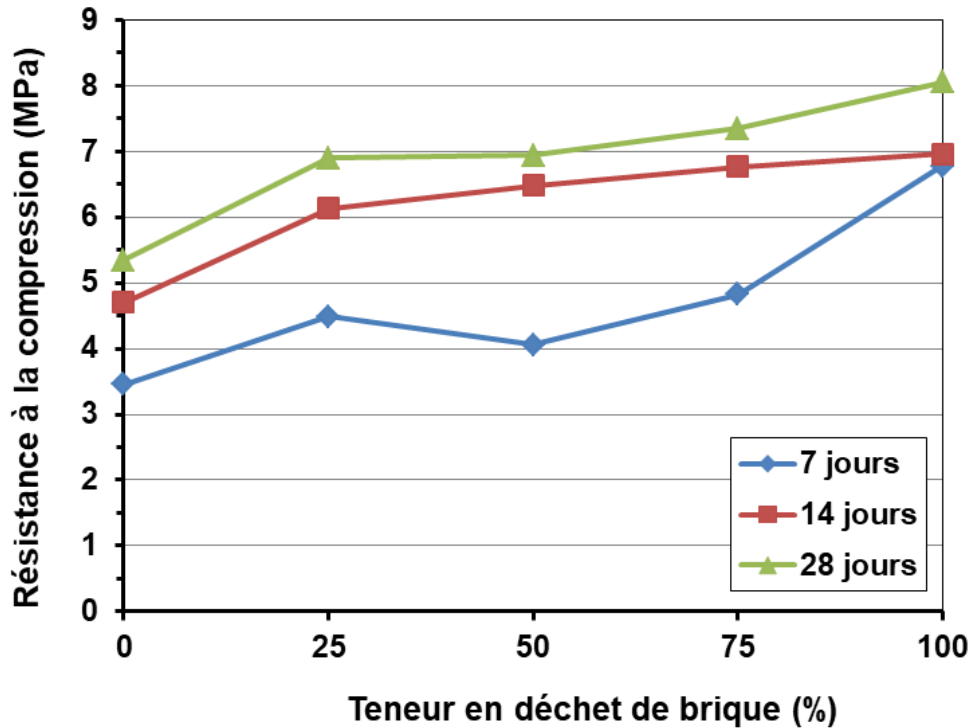


Figure V.9: Résultats des résistances à la compression des mortiers en fonction de l'âge.

Selon la Figure V.9, on constate que la faible résistance à 7 jours est enregistrée par le mortier M1 avec 3.46 MPa et la meilleure résistance est enregistrée par M5 avec 6.78MPa.Cette dernière est supérieure de 50% par rapport au mortier de référence M1 et 40% par rapport au mortier M4.En général, on remarque que plus l'augmentation du dosage de DB dans le mélange est élevée, plus les mortiers donnent une résistance importante à l'exception du mortier M2 (de valeur 4.48MPa).La corrélation entre l'évolution de la résistance à la compression et le pourcentage d'incorporation du DB est remarquable à 14 jours, la différence de cette augmentation la plus élevée est enregistrée entre M1 et M5 avec un taux de plus de 50%. Ceci prouve que l'introduction du déchet de brique dans le mélange pour la première fois engendre une modification de la résistance du mortier. Plus le dosage du DB est important, plus la résistance est grande. Ceci peut être attribué à la distribution en taille des

grains de déchets de brique. Le pic d'augmentation est important entre M1 et M2 avec plus de 29%, les valeurs de M2/M3/M4 sont respectivement 6.89, 6.93 et 7.35MPa avec un accroissement très léger, la meilleure résistance à la compression est enregistrée par le mortier M5 avec 8.05MPa.

Le remplacement de 25% de SN par 25% de DB dans les mortiers de gypse améliore la résistance à la compression d'environ 30%. Cette contribution positive peut être attribuée à la microstructure des différentes phases de DB (comme mentionné dans les résultats de l'analyse XRD) et probablement à la distribution granulométrique. Selon les résultats trouvés sur la résistance à la compression, il est possible de remplacer entièrement le SN par le DB sans aucun effet nuisible. Il faut signaler qu'une résistance à la compression d'environ 8 MPa à 28 jours est suffisante pour résister à la charge de l'ornement[29].

2.5. Résistance à l'adhésion

Le plâtre est connu avoir une résistance à la compression et la traction faible. C'est pour cette raison que son utilisation est limitée seulement aux travaux de revêtement et de décoration. Cependant, la résistance d'adhérence est connue pour être l'une des propriétés les plus importantes des performances mécaniques du mortier à base de plâtre utilisé comme matériau décoratif.

Nous avons évalué la résistance d'adhésion sur les cinq différents mortiers sur deux types de supports, à savoir le support en brique et le support en pierre de calcaire. Nous avons éliminé quelques résultats à cause de quelques fautes de manipulation avec la machine. Les résultats sont mentionnés sur le Tableau V.4.

Tableau V.4: Résistances à l'adhésion des mortiers de plâtre à 28 jours sur support en brick et pierre de calcaire

Mélanges		M1 (0%DB)	M2 (25%DB)	M3 (50%DB)	M4 (75%DB)	M5 (100%DB)
Adhésion à 28 jours en (MPa)	Brique	0.52	0.45	0.63	0.82	0.67
Adhésion à 28 jours en (MPa)	Pierre calcaire	0.73	0.83	0.88	1.16	0.84

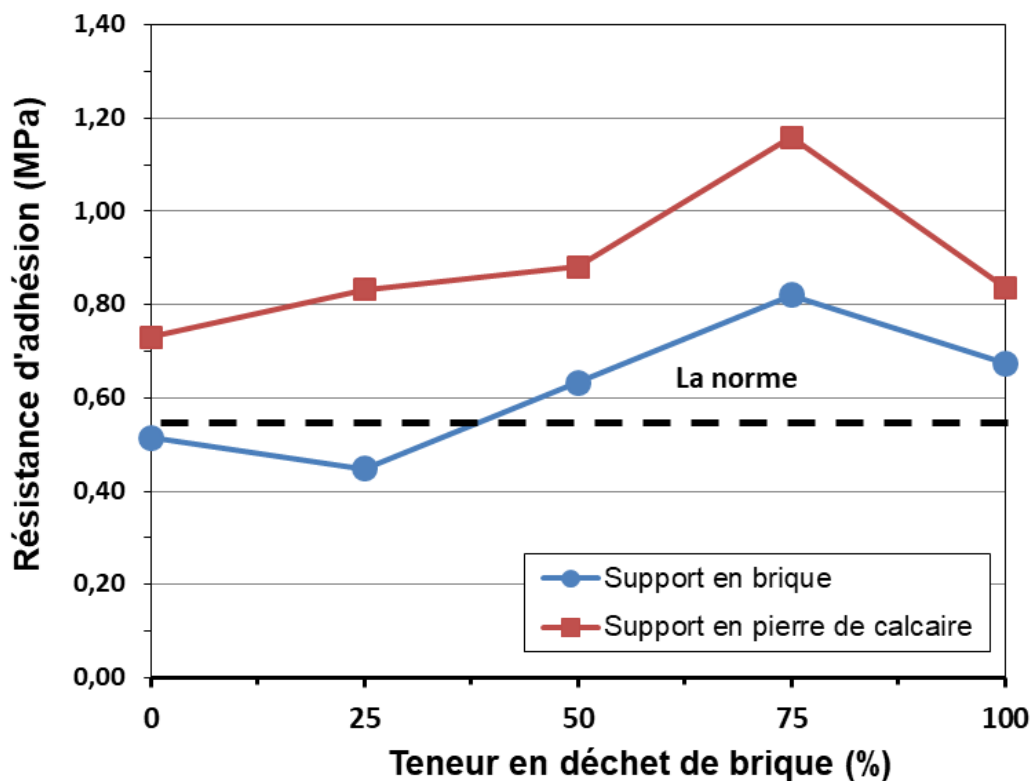


Figure V.10 : Résistances à l'adhésion des mortiers à 28 jours sur support en brick et pierre de calcaire.

Sur la Figure V.10, il est tracé la résistance à l'adhésion en fonction de la teneur en déchet de briques. La force adhésive des mortiers de plâtre augmente avec l'augmentation du taux de remplacement de déchet de brique pour les deux supports. La valeur maximale de la force adhésive est atteinte au taux de 75% pour les deux supports.

La résistance d'adhésion dans les mortiers est plus importante lorsque le support est en calcaire par rapport au support en brique. Cependant, un pourcentage excessif de déchet de brique dans le mortier peut entraîner des effets indésirables et réduire la force d'adhésion (100% DB). (Voir Figure V.10).

On remarque que, la faible résistance à l'adhésion est fournie par le mortier M1 avec 0.73MPa, tandis que la meilleure résistance d'adhérence est enregistrée par le mortier M4 avec 1.16 MPa, soit un taux d'augmentation de 59% par rapport au mortier de référence.

En général, tous les résultats d'adhérence obtenus sont tout à fait satisfaisants, puisqu'ils dépassent la valeur correspondante requise pour le plâtre décoratif (0,57 MPa) [29] à l'exception des mortiers M1 et M2 lorsque le support est en brique. La présence du déchet de brique a amélioré la résistance d'adhésion du mortier de gypse, ce qui a entraîné une

amélioration de la résistance aux fissures dans le mortier de gypse. Nous avons conclu que 75% de DB est la valeur optimale pour le taux de remplacement du déchet de brique pour l'obtention d'un mortier qui peut être appliqué à la réhabilitation des ornements architecturaux.

2.5.1. Observations physiques

Afin d'évaluer la rupture qui se produit entre les mortiers de gypse (âgés de 28 jours) et le support lors du test d'adhérence, on doit estimer la quantité de support qui s'est détachée du support. La couleur de la zone d'interface entre les deux éléments (laissée après le test d'adhérence) peut donner une idée sur le type de rupture. Un graphique de couleur est tracé sur la Figure V.11, Pour évaluer la couleur de la trace correspondante à la rupture. La couleur de l'interface (mortier/support) dépend de la force d'adhérence du mortier, qui est influencée par les déchets de brique incorporés dans le mortier de plâtre.

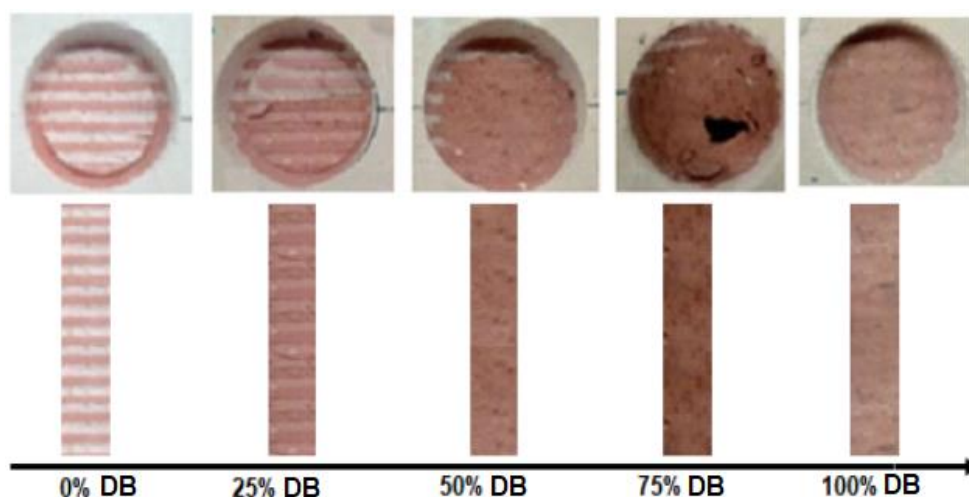
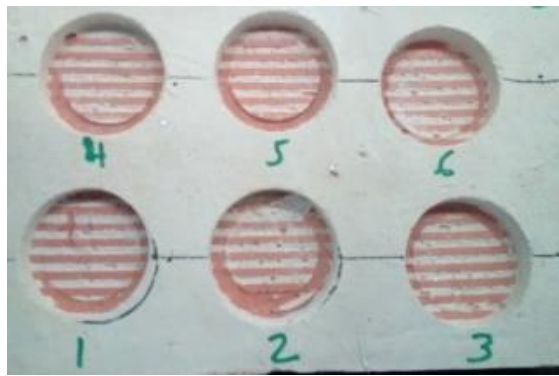
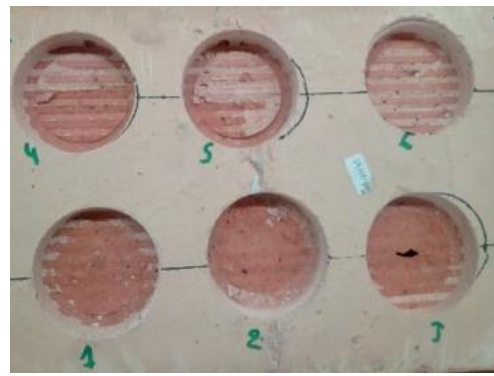


Figure V.11: Diagramme d'évaluation des couleurs pour le mortier

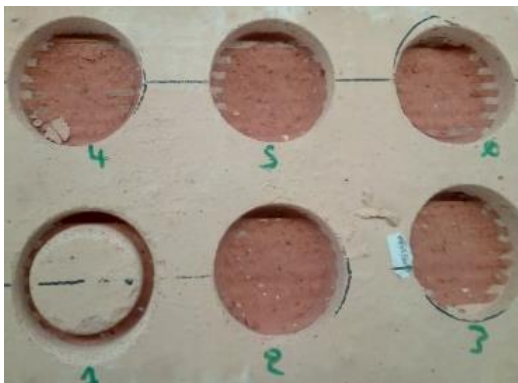
Dans la Figure V.12, il est représenté une vue de l'interface mortier/support de brique après le test d'adhérence pour les mortiers de gypse avec différents taux de déchets de brique. On constate que plus le taux de remplacement des déchets de brique est élevé, plus la couleur de la trace laissée après le test d'adhérence est foncé.



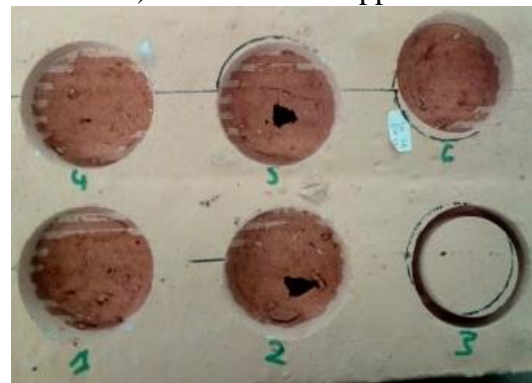
a) Interface M1/support



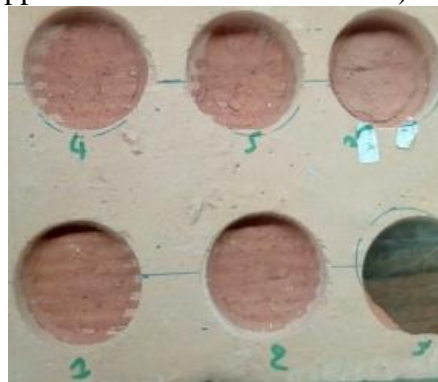
b) Interface M2/support



c) Interface M3/support



d) Interface M4/support



e) Interface M5/support

Ici le support est en brique

Figure V.12: Vue du support de brique de mortier d'interface après le test d'adhérence

Il semble que la couleur de l'interface M1/support soit principalement celle du mortier de plâtre, ce qui peut indiquer que la force d'adhérence entre les deux éléments est faible (voir Fig. V.12 (a)). Cependant, avec l'introduction du déchet de brique dans le mortier de gypse (avec 25% DB), un petit morceau est détaché du support et scellé avec le mortier (comme le montre la Figure 70 (b)), ce qui peut indiquer l'augmentation de la résistance d'adhérence dans le mortier M2.

Au-delà de 50% du taux de remplacement du déchet de brique, la couleur de l'interface devient très sombre, ce qui ressemble à la couleur du support de brique comme le montre la

Figure 70 (d). Cette interface présente également un trou noir dans certains échantillons, ce qui révèle l'amélioration de la résistance d'adhésion.

On peut penser que la résistance d'adhésion est si grande que le décollement est plus profond, ce qui a probablement conduit à l'apparition d'un trou noir dans le support et à une couleur très sombre. A 100% de taux de remplacement, la couleur de l'interface (M5/support) est sombre mais pas assez comme l'interface précédente (M4/support), ce qui peut indiquer que la force d'adhésion dans le mortier (M5) est moins prononcée que celle du mortier (M4). Les résultats de l'observation visuelle concordent assez bien avec ceux de la résistance d'adhésion trouvée ci-dessus.

L'observation visuelle des tests d'adhésion effectués sur les mortiers du plâtre (âgés de 28 jours) après la rupture entre le mortier et le support est résumée dans le Tableau V.5. On présente dans la Figure V.13 un schéma descriptif de la rupture adhésive et la rupture cohésive.

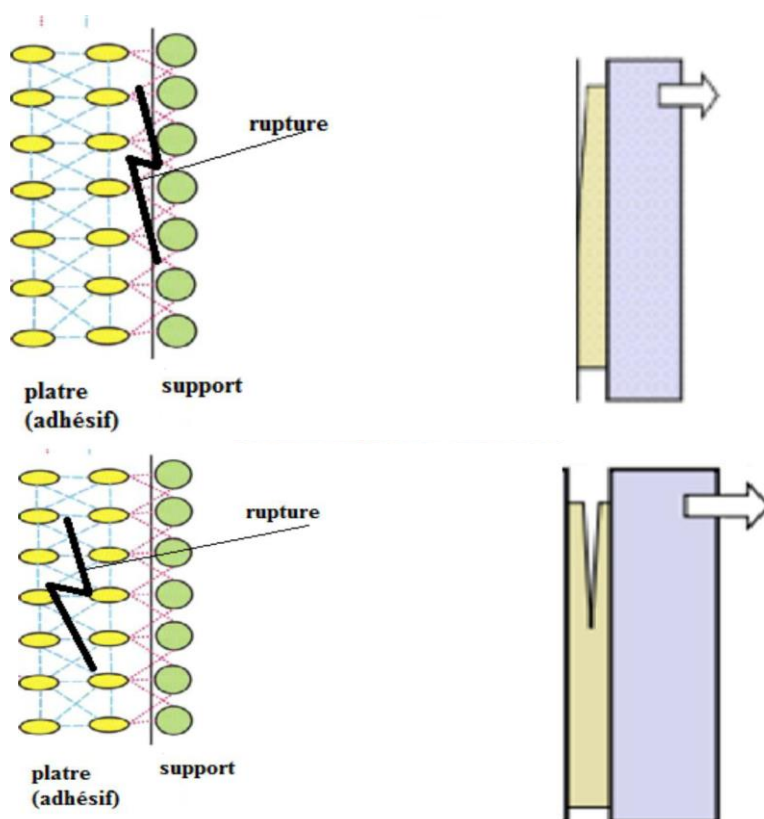


Figure V.13 : Schéma descriptif de la rupture adhésive et la rupture cohésive

On constate que toutes les ruptures se produisent entre le support et le mortier (nommé rupture adhésive) et aucune rupture ne se produit dans le mortier (appelée rupture cohésive). Par exemple, une rupture de l'interface à 90% signifie que seulement 10% du support est détaché et scellé avec du mortier (Figure V.12).

Tableau V.5: Mode de rupture sur les deux supports

Identification	Mortier	Mode de rupture	(%) de rupture
Support En Brick	M1 (0%DB)	Rupture adhésive	100% interface
	M2(25%DB)	Rupture adhésive	90% interface
	M3(50%DB)	Rupture adhésive	80% interface
	M4(75%DB)	Rupture adhésive	80% interface
	M5(100%DB)	Rupture adhésive	90% interface
Support En pierre De calcaire	M1 (0%DB)	Rupture adhésive	100% interface
	M2(25%DB)	Rupture adhésive	90% interface
	M3(50%DB)	Rupture adhésive	80% interface
	M4(75%DB)	Rupture adhésive	80% interface
	M5(100%DB)	Rupture adhésive	90% interface

Pour les deux supports, il n'y a pas de rupture cohésive, toutes les ruptures se situent entre le support et la couche de mortier. Ceci confirme que l'incorporation de DB dans le gypse a un effet positif sur la force d'adhésion du mortier. Ceci constitue l'une des solutions à utiliser pour lutter contre le détachement des ornements architecturaux.

3. Conclusion

L'utilisation des déchets de brique(DB) dans la production d'un mortier de gypse destiné à la réhabilitation d'ornements décoratifs, a été évaluée dans cette étude. Les conclusions les plus importantes sont résumées comme suit:

1-Concernant l'ouvrabilité, il a été vérifié que l'incorporation de DB provoquait une augmentation de la quantité d'eau ajoutée au mortier afin d'accorder une ouvrabilité convenable en raison de son coefficient d'absorption élevé.

2-Les échantillons réalisés avec DB n'ont montré aucune trace d'autres nouvelles phases cristallines. On pense que le DB n'a pas eu de réaction chimique avec le gypse après le malaxage et son effet n'est que physique.

3-L'analyse microscopique à balayage électronique prouve que la microstructure de l'échantillon renfermant les déchets de brique est dense et compacte autant que la quantité de déchets de briques est importante dans l'échantillon, ce qui peut expliquer l'amélioration des propriétés mécaniques du mortier de gypse avec les déchets de brique.

4-Les résultats de l'absorption par capillarité montrent que les mortiers de plâtre incorporant du DB présentent une résistance à l'eau tout à fait acceptable pour être utilisés dans les ornements architecturaux.

5-Lorsque le taux de remplacement de déchet de brique est égal ou inférieur à 50%, aucun effet significatif de la présence de DB n'est observé sur le comportement en flexion des mortiers. Au-delà de cette teneur, les mortiers commencent à montrer une claire corrélation entre le taux de DB et la résistance à la traction en particulier à 28 jours.

6-Plus le dosage de déchet de brique (DB) dans le mélange est élevée, plus les mortiers donnent une résistance à la compression importante à l'exception du mortier M2. Le remplacement de 25% de SN par 25% de DB dans les mortiers de gypse améliore la résistance à la compression d'environ 30%. Cette contribution peut être attribuée à la microstructure des différentes phases de DB à la distribution granulométrique.

7-La présence de DB dans le mortier de gypse a amélioré la force d'adhésion de l'échantillon, ce qui peut entraîner une amélioration de la résistance à l'apparition de fissures.

Le taux de 75% de déchet de brique constitue la valeur optimale pour le remplacement de SN par DB pour obtenir un mortier qui peut être appliqué à la réhabilitation des ornements architecturaux. La force d'adhésion du mortier est meilleure avec le support de la pierre de calcaire qu'avec celui du support en brique.

Conclusion générale.

Conclusion générale

L'Algérie a vécu au cours de son histoire une succession de passage des civilisations, qui ont marqué un héritage immatériel comme les traditions et matériel comme les bâtis. Durant la période du 19^{ème} et 20^{ème} siècle, l'Algérie a subi une urbanisation intense imposée par le colonisateur avec sa politique de rendre le pays une partie intégrante de son pays. Cette politique a résulté des villes coloniales avec une architecture similaire à celle des villes de l'occupant. La ville de Mostaganem dispose d'un tissu colonial, présentant une architecture spécifique connue par des façades décorées avec des ornements architecturaux. Ces derniers sont des éléments décoratifs présentés souvent dans les styles arts déco et art nouveau, ils ont connu une disparition et un refus avec l'architecture moderne. Ce patrimoine colonial a été toujours menacé d'un niveau de dégradation alarmant qui le rend vulnérable par excellence.

Afin de remédier l'avenir de ce patrimoine vulnérable, des opérations de réhabilitation officielles ont été lancés pour traiter les aspects visibles des bâtiments coloniales à travers le renouvellement des revêtements de façades. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, qui a pour objectif la recherche d'un matériau écologique, utilisé dans le traitement des pathologies détectées dans les ornements architecturaux.

L'étude pathologique réalisée fait constater deux types de rupture, une première appelée cohésive résultant d'un détachement partiel d'une petite partie de l'ornement et une deuxième rupture, appelée adhésive résultant d'un décollement total entre l'ornement et le support. Afin de réparer ces pathologies, le choix du matériau écologique est porté sur le mortier de plâtre renforcé par les déchets de brique.

Les résultats des essais physiques et mécaniques effectués sur les échantillons de mortier de plâtre à base de déchets de briques ont abouti aux conclusions suivantes :

- La diffraction des rayons X des échantillons de mortiers formulés avec le déchet de brique n'a montré aucune trace d'autres nouvelles phases cristallines; par conséquent, il est raisonnable de dire que la brique usagée n'a pas eu de réaction chimique avec le gypse après le malaxage et son effet est uniquement physique. La répartition granulométrique étalés du déchet de brique dispose d'un effet de remplissage des vides et par conséquent améliore les propriétés mécaniques.

- La demande en eau du mortier de plâtre augmente au fur à mesure que le taux de déchet de brique augmente dans le mélange, justifiée par le taux d'absorption qui est élevée dans le cas des déchets de brique par rapport au sable naturel.

- Bien que la densité des déchets de brique soit similaire à celle du sable naturel, le mortier de plâtre formulé avec le sable naturel et le mortier de plâtre incorporant les déchets de brique n'ont pas la même valeur d'absorption par immersion. Ce comportement est associé à la structure poreuse du déchet de brique par rapport à celle du sable naturel. Le mortier composé de sable naturel a besoin de 120 min pour atteindre la saturation; cependant, le mortier avec 100% de déchet de brique a besoin de 360 min pour atteindre le niveau de saturation malgré la différence de niveau de saturation. Bien que cela affecte le comportement mécanique des mortiers de plâtre, les mortiers incorporant les déchets de brique présentent une résistance à l'eau tout à fait acceptable pour être utilisée pour les éléments décoratifs selon la littérature.

- Selon les résultats de résistance à la compression, il est possible de remplacer entièrement le sable naturel par les déchets de brique dans le mortier de plâtre sans qu'il soit des effets nuisibles. On pense qu'une résistance à la compression d'environ 8 MPa à 28 jours est suffisante pour résister aux contraintes de compression de l'ornement.

- Les contraintes d'adhésion des mortiers de plâtre augmentent avec l'augmentation du taux de remplacement des déchets de brique dans le mortier pour les deux supports (calcaire et brique). Les forces d'adhésion dans les mortiers sont plus importantes lorsque le support est réalisé en calcaire par rapport au support fait de brique. Cependant, un pourcentage excessif de déchet de brique dans le mortier peut entraîner des effets indésirables et réduire la force d'adhésion (100% déchet de brique).

- Tous les résultats d'adhésion obtenus sont tout à fait satisfaisants, du moment que les valeurs excèdent la valeur correspondante requise pour le plâtre décoratif de gypse (0,57 MPa) selon certains auteurs [8] sauf pour les mortiers ayant un taux de remplacement 0% et 25% lorsque le support est en brique.

- La présence de déchet de brique a amélioré les contraintes d'adhésion dans le mortier de gypse, ce qui a entraîné une amélioration de la résistance à l'apparition de fissures dans le mortier de gypse. Le taux de remplacement de 75% de déchet de brique est la valeur optimale pour l'obtention d'un mortier convenable à la réhabilitation des ornements architecturaux.

Perspectives

La grande fragilité préoccupante du plâtre est à l'origine de tous les travaux de recherches dans le monde entier en vue de renforcer sa matrice. Dans ce sens, d'autres points peuvent être envisagés dans les futures recherches :

- Etude des propriétés de durabilité du mortier de plâtre renforcé avec les déchets de brique.
- Amélioration du comportement fragile de la matrice du plâtre en utilisant les fibres végétales.
- Etude du comportement rhéologique du mortier de plâtre en présence des adjuvants.

- [1] M. Milwright, *Arts of Allusion: Object, Ornament, and Architecture in Medieval Islam* By Margaret S. Graves, in: 2020: pp. 268–269.
- [2] Said Beldjilali, *Elaboration d'un guide de récupération des ornements architecturaux des façades coloniales -cas du centre ville de MOSTAGANEM*, 2014. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/123456789/1182>.
- [3] Jeong-hee LEE-KALISCH, *The Transmission of Ornaments in Buddhist Art: On the Meander or Huiwen*, *Hualin Int. J. Buddh. Stud.* 1 (2018) 111–130. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.15239/hijbs.01.02.04>.
- [4] F. Moussavi, *The function of ornament*, Barcelona:, Barcelona: Actar, 2006.
- [5] S. Temple, *Evolution of Hindu – Buddhist Architectural Ornaments Into Javanese Traditional Architecture : Case Study of*, 4th Int. Conf. Arts Lang. Cult. (ICALC 2019). 421 (2020) 119–129. <https://doi.org/https://doi.org/10.2991/assehr.k.200323.017>.
- [6] and L.S.-P. Adam, Jean-Pierre, Simone Deyts, *La façade des thermes de Sens*, in: ARTEHIS Éditions, 2020.
- [7] S. Beldjilali, *Architectural Ornaments of Colonial Towns in Algeria : The Case of Mostaganem*, *Int. Soc. Study Vernac. Settlements.* 7 (2020) 1–11.
- [8] Said Beldjilali, *recovery of the architectural ornaments of the façades colonial town of mostaganem through a proposed GUIDE*, *Int. J. Hum. Settlements.* 1 (2017).
- [9] S.M.T. Yamani, Lakhdar, *Contournement des instruments d'urbanisme dans l'urbanisation de l'agglomération mostaganémoise (Algérie)*, *Cybergeo Eur. J. Geogr.* (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/cybergeo.34731>.
- [10] A. Picard, *Architecture et urbanisme en Algérie. D'une rive à l'autre (1830-1962)*, in: *Rev. Des Mondes Musulmans La Méditerranée*, 1994: pp. 121–136.
- [11] A. Pundir, M. Garg, R. Singh, *Evaluation of properties of gypsum plaster-superplasticizer blends of improved performance*, *J. Build. Eng.* 4 (2015) 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.job.2015.09.012>.
- [12] H.B. Hartley, *lavoisier-antoine-laurent-embodiment-lavoisiers-quantitative-analyse-du-gypse-1765*, 1974.
- [13] R.H. Geraldo, S.M.M. Pinheiro, J.S. Silva, H.M.C. Andrade, J. Dweck, J.P. Gonçalves, G. Camarini, *Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution*, *J. Clean. Prod.* 164 (2017) 288–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>.
- [14] J. Karni, E. Karni, *Gypsum in construction: origin and properties*, *Mater. Struct.* 28 (1995) 92–100. <https://doi.org/10.1007/BF02473176>.

- [15] P. Boustingorry, *Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté. Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse*, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2007.
- [16] M. OUAMER-ALI KARIM, *CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SOLS GYPSEUX D'ALGERIE valorisation d'une banque de données et détermination des profils références*, INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE EL-HARRACH (ALGER) (I.N.A), 2001.
- [17] F.B. Ebanda, *Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales*, Université de DOUALA (UD) École Doctorale des Sciences Fondamentales et Appliquées, 2015. <https://doi.org/tel.archives-ouvertes.fr/tel-01153478>.
- [18] V.vorobiev, *Matériaux de construction*, MIR MOSCOU, 1967.
- [19] M.T. Freire, A. Santos Silva, M. do R. Veiga, J. de Brito, *Studies in ancient gypsum based plasters towards their repair: Mineralogy and microstructure*, *Constr. Build. Mater.* 196 (2019) 512–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.037>.
- [20] Z. Chen, S. Sucech, K.T. Faber, *A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum*, *J. Mater. Sci.* 45 (2010) 4444–4453. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4527-z>.
- [21] J. Cognard, *Science et Technologie Du Collage.*, Press poly, Press polytiquenique et universitaires romandes, italie, 2000. <https://doi.org/2-88074-410-5>.
- [22] sebastien chauffaille, *durabilite des assemblages colles : aspects mecaniques et physico-chimiques*, université bordeaux i, 2011.
- [23] A.N. Dancygier, H. Baum, H. Turgeman, *Adhesion of plaster coatings to RC walls subjected to bending*, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1815–1827. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.028>.
- [24] K.K. Chawla, *Composite Materials*, Springer New York, New York, NY, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>.
- [25] A. Vimmrová, M. Keppert, L. Svoboda, R. Černý, *Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality*, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.011>.
- [26] K.C. Vrancken, B. Laethem, *Recycling options for gypsum from construction and demolition waste*, *Waste Manag. Ser. 1* (2000) 325–331. [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(00\)80045-8](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(00)80045-8).
- [27] C.L. Hwang, M. Dantie Yehualaw, D.H. Vo, T.P. Huynh, *Development of high-*

- strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders, *Constr. Build. Mater.* 218 (2019) 519–529.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.143>.
- [28] P.O. Akadiri, E.A. Chinyio, P.O. Olomolaiye, Design of A Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector, *Buildings*. 2 (2012) 126–152. <https://doi.org/10.3390/buildings2020126>.
- [29] H. Li, L. Dong, Z. Jiang, X. Yang, Z. Yang, Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls, *J. Clean. Prod.* 133 (2016) 1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.149>.
- [30] H. Cristina, F. Cordon, F. Carvalho, F. Furlan, Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo , Brazil, *J. Build. Eng.* 22 (2019) 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.010>.
- [31] M.T. Marvila, A.R.G. Azevedo, L.S. Barroso, M.Z. Barbosa, J. de Brito, Gypsum plaster using rock waste: A proposal to repair the renderings of historical buildings in Brazil, *Constr. Build. Mater.* 250 (2020) 118786.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118786>.
- [32] European Norm, EN 13279-2 Gypsum binders and gypsum plasters: Test methods, *Eur. Comm. Stand.* (2014) 23.
- [33] A. San-Antonio-Gonzalez, R. Santos Jimenez, M. del Rio Merino, M. Gonzalez Cortina, C. Vinas Arrebola, Feasibility of Recycling CDW as Raw Material in Gypsum Composites, *Athens J. Technology Eng.* 2 (2019) 149–160.
<https://doi.org/10.30958/ajte.2-3-1>.
- [34] S. Cunha, J. Aguiar, F. Pacheco-Torgal, Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 89–101.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077>.
- [35] *glenium_sky_617_ficha técnica.pdf*, (n.d.).
- [36] ASTM C188-17, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, 95 (2017) 1–3. <https://doi.org/10.1520/C0188-17>.
- [37] N. Flores Medina, M.M. Barbero-Barrera, Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic graphite filler, *Constr. Build. Mater.* 131 (2017) 165–177.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.073>.
- [38] E.C. for S.E. 1015-3:2004 (CEN), Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table), 200, 2004.

- [39] E. 1015-11:1999 European Committee for Standardization (CEN), Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar, (1999).
- [40] B.S. En, Methods of test for screed materials, 2002.
- [41] EN 1015-18, Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, 3 (2002).
- [42] J. Cassar, A. Torpiano, T. Zammit, A. Micallef, Proposal for the nomination of Lower Globigerina Limestone of the Maltese Islands as a “Global Heritage Stone Resource,” *Episodes*. 40 (2017) 221–231. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2017/v40i3/017025>.
- [43] European Committee for Standardization (CEN), Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 12: Determination of Adhesive Strength of Hardened Rendering and Plastering Mortars on Substrates, 2000.