

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

Université 20Aout 1955-Skikda
Faculté de technologie
Département : de Génie Civil.
Ref : D012125031D



جامعة 20 اوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع : D012125031D

Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de
Doctorat en sciences
En Génie Civil
Option : Techniques de réhabilitation des vieux bâtis

**AMELIORATION D'UN ECO-MATERIAU POUR LA
REHABILITATION DU VIEUX PATRIMOINE BATI DE STYLE
COLONIAL EN ALGERIE**

Présentée par : **KAUCHE Ahlem**

Soutenue publiquement le : **12/07/ 2025**

Devant le jury composé de :

PRESIDENT	KHALED BOUDJELLAL	MCA	Université 20 aout 1955 Skikda
RAPPORTEUR	KOULOUGHLI SALIM	PR	Université Constantine 1
EXAMINATEUR	BENSEBTI SALAHEDDINE	PR	Université Constantine 1
EXAMINATEUR	BELACHIA MOULOUD	PR	Université 08 mai 1945 Guelma
INVITÉ	DERABLA RIAD	MCA	Université 20 aout 1955 Skikda

«Un matériau n'est pas intéressant pour ce qu'il est mais pour ce qu'il peut faire pour la société»

John F.C. TURNER

« Pour la performance énergétique mais aussi pour les phases de construction, de transport, jusqu'à la déconstruction et la valorisation, les éco-matériaux ont une vraie carte à jouer, par rapport aux exigences de la future réglementation »

Philippe Cardon

REMERCIEMENTS

Je suis ravie d'adresser ma sincère gratitude à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de cette thèse de doctorat. Je dois reconnaître que ces moments ont eu un énorme impact sur ma vie, de diverses manières. Il s'agit d'un parcours plus ou moins ardu, plein d'obstacles mais extrêmement gratifiant. Grâce à dieu, j'ai pu les surmonter et les vaincre.

Pour mener à bien mes recherches, une contribution scientifique et un encouragement particulier m'ont été offerts par mon directeur de thèse, le Pr Kouloughli Salim, qui a daigné m'accompagner tout au long des années de ma thèse. Son attention a toujours été constante et il s'est toujours soucié de l'avancement de mes travaux. Je tiens particulièrement à remercier l'engagement et la persévérance qu'il m'a accordés.

En signe de respect et de reconnaissance, je souhaite exprimer ma gratitude envers Monsieur Fabio Fratini de l'institut des Sciences du Patrimoine Culturel (CNR-ISPC), Florence, Italie. L'expérience acquise dans son laboratoire et son engagement scientifique et humain m'ont été d'une grande aide, et je lui suis extrêmement reconnaissante pour le temps et les enseignements qui il m'a dispensés. J'aimerais également remercier la Pr Danila Pittaluga, « Département d'Architecture et de Design » (DAD), Université de Gênes, École de Spécialisation en Patrimoine Architectural et Paysage (SSBAP), Gênes (Italie) », qui m'a apporté son soutien, son aide et sa sympathie tout au long de mon stage. Je lui souhaite plein de bonheur de santé et de succès.

Je tiens particulièrement à exprimer mes remerciements envers l'équipe de l'Unité de Recherche sur les Matériaux Emergents, à l'Université Ferhat Abbas, à Sétif 1, pour avoir facilité la caractérisation des briques anciennes et la fabrication des matériaux de base. Il convient de faire part également de ma gratitude envers Monsieur le Directeur du Centre de Recherche en Technologie Industrielle du CRTI, l'Unité de Développement des Couches Minces et d'Applications UDCMA, ainsi que la Société Nationale des Produits du Génie Électrique ENPEC, située dans la Zone Industrielle à Sétif. Le Directeur du Laboratoire de Physique, Faculté des Sciences Exactes, de l'Université des Frères Mentouri Constantine I, le Directeur du Laboratoire des Travaux Publics, LTP de Constantine Est, le Laboratoire de la Cimenterie Hadjar Soud, Skikda, et la briqueterie SAF CER, Didouche Mourad, Constantine, qui nous ont gracieusement offert les outils nécessaires pour procéder aux tests des briques dans leurs laboratoires.

Je souhaite également exprimer mon respect et ma gratitude envers les rapporteurs qui ont consenti à réviser cette thèse. Les lectures approfondies et les précieux commentaires qu'ils ont fournis ont joué un rôle prépondérant dans la production finale de cette thèse. Je formule aussi ma sincère reconnaissance pour avoir accepté d'assister à la soutenance de cette thèse et d'évaluer mon travail.

Remerciements

Mes remerciements ne finissent sans une pensée agréable envers chaque membre du Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et Technologies, Laboratoire de Mécanique des Sols et des Structures – LMSS. L'université Constantine 1, Algérie, pour l'atmosphère de travail exceptionnelle qui a régné tout au long des moments passés ensemble.

Par ailleurs, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers tous ceux qui m'ont soutenu sans faille dans l'élaboration de mon travail, en l'occurrence mon père, à qui je dois ma personnalité actuelle, à mes sœurs et mon frère, qui n'ont eu de tout temps cesse de m'encouragé et soutenir.

Enfin, à vous mes chères amies Khalissa Laouar, Nassima Lebid, Nabila Ben Sahih et Sarah Halag, vous avez toute ma gratitude, pour votre soutien et encouragement.

*Cette thèse est en hommage à
l'âme de ma défunte chère mère et à Tonton Chérif Benhacine.*

RÉSUMÉ

AUTEUR : KAUCHE AHLEM, Département de Génie Civil, Faculté de Technologie, Université du 20 août 1955, B.P 26. Route El-Hadaiek, Skikda, 21000. Algérie.

TITRE : Amélioration d'un éco-matériau pour la réhabilitation du vieux patrimoine bâti de style colonial en Algérie.

DIRECTEUR DE THESE : KOULOUGHLI SALIM, Laboratoire de Mécanique des Sols et des Structures -LMSS- Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et Technologies. Université Constantine1, Algérie. Campus A. Hamani, Route Ain El Bey, Constantine, 25000, Algérie.

Cette thèse examine le recyclage des déchets industriels en briques cuites pour la réhabilitation des bâtiments, inspirée par des recherches qui font état d'avantages pour la qualité de la maçonnerie et l'environnement. À cette fin, des briques cuites historiques prélevées des constructions de la rue Didouche Mourad, dans le centre-ville de Skikda (Algérie) ont été analysées d'un point de vue minéralogique, physique et mécanique et comparées à des briques neuves réalisées avec de l'argile de Mila (Algérie) mélangée à différents déchets industriels. La méthode consiste à mélanger la terre, avec 10 % de sable de carrière et des proportions optimales de WS, FMP, VFMP, SF, avec des taux de substitution de 5 %, 20 %, 20 %, 20 %, 20 % respectivement, pour une température de cuisson optimale de 900° C. Les résultats se sont avérés adéquats. Plus précisément, à l'exception des briques additionnées avec de la sciure de bois (WS), qui ont montré une résistance réduite (-46,95 %), les briques FMP, SF et VFMP ont montré des performances mécaniques satisfaisantes avec des résistances à la compression de 9,7, 9,8 et 11,1 MPa respectivement, hormis les problèmes posés par la présence de grosses particules de calcite et la limaille d'acier lourde. Quant aux métaux lourds, considérés comme nocifs pour la santé humaine et souvent difficiles à éliminer, l'expérience de lixiviation a montré que l'emploi de ces déchets n'est pas offensif pour l'environnement, ce qui fait de nos briques des matériaux écologiques.

Mots-Clés : Eco-Réhabilitation. L'ancien bâti de Skikda, Eco-matériau, Brique en terre cuite, Recyclage, Déchets.

ABSTRACT

AUTEUR: *KAUCHE AHLEM, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, University of 20 August 1955, B.P 26. Road El-Hadaiek, Skikda, 21000. Algeria.*

TITLE: *Improvement of an eco-material for the rehabilitation of old buildings in the colonial-style heritage in Algeria.*

DIRECTOR OF THESIS: *KOULOUGHLI SALIM, Soil and Structure Mechanics Laboratory -LMSS- Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology. University Constantine1, Algeria. Campus A. Hamani, Road Ain El Bey, Constantine, 25000, Algeria.*

This thesis examines the recycling of industrial waste into fired bricks for use in building rehabilitation, inspired by research that reports benefits to masonry quality and the environment. To this end, historic ceramic bricks taken from buildings on Didouche Mourad street, in the centre of Skikda (Algeria), were analysed from a mineralogical, physical and mechanical point of view and compared with new bricks realized with clay from Mila (Algeria) mixed with different industrial wastes. The method involves mixing earth, with 10% quarry sand and optimum proportions of WS, FMP, VFMP, SF, with substitution rates of 5%, 20%, 20%, 20%, 20% respectively, for an optimum firing temperature of 900°C. The results proved adequate. More specifically, with the exception of bricks with added sawdust (WS), which showed reduced resistance (-46.95%), the FMP, SF and VFMP bricks showed satisfactory mechanical performance with compressive strengths of 9.7, 9.8 and 11.1 MPa respectively, apart from the problems posed by the presence of large particles of calcite and heavy steel filings. As for heavy metals, considered harmful to human health and often difficult to eliminate, the leaching experiment showed that the use of this waste is not harmless to the environment, which makes our bricks environmentally friendly materials.

KEY WORDS: Eco-Rehabilitation. The old building of Skikda, Eco-material, Fired brick, Recycling, Waste.

ملخص

المؤلف كعوش أحلام، قسم الهندسة المدنية، الكلية التكنولوجية، جامعة 20 أوت 1955، ص ب 26. طريق الحدائق، سكيكدة، 21000. الجزائر.

عنوان تحسين مادة بناء بيئية لإعادة تأهيل التراث المعماري القديم ذوا الطراز الاستعماري في الجزائر.

المشرف كولوغلي سليم، مختبر ميكانيكا التربة والتركييب، قسم الهندسة المدنية، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة قسنطينة 1، الجزائر. الحرم الجامعي أ. حماني، طريق عين الباي، قسنطينة، 25000.

تتناول هذه الأطروحة إعادة تدوير النفايات الصناعية في شكل طوب المحروق لإعادة تأهيل المباني، مستوحاة من أبحاث تشير إلى فوائد معتبرة لصالح جودة البناء والبيئة. لهذا الغرض، تم تحليل الطوب المحروق المأخوذ من المنشآت القديمة لشارع ديدوش مراد، لوسط مدينة سكيكدة (الجزائر)، من الناحية المعدنية والفيزيائية والميكانيكية ومقارنته بالطوب الجديد المصنوع من طين ميلة (الجزائر) الممزوج بمختلف النفايات الصناعية. تتضمن الطريقة دمج التربة مع 10% من رمل المحاجر والنسب المثالية من WS، SF، FMP، VFMP، مع معدلات استبدال تبلغ 5%، 20%، 20%، 20% على التوالي، للحصول على حرق مثالي، ل 900 درجة مئوية وقد تبين أن النتائج جد مرضية. إذ وباستثناء الطوب المنجز بإضافة نشارة الخشب (WS). الذي أظهر مقاومة منخفضة (-46.95%)، أظهرت الطوب FMP و SF و VFMP أداءً ميكانيكياً مرضياً بمقاومات ضغط تبلغ 9.7 و 9.8 و 11.1 ميغاباسكال على التوالي، باستثناء المشاكل التي تسببت بها وجود جزيئات الكلسيت الكبيرة وبرادة الفولاذ ذات الوزن الثقيل. أما بالنسبة للمعادن الثقيلة، التي تُعتبر ضارة بالصحة البشرية وغالباً ما يكون من الصعب التخلص منها، فقد أثبتت تجربة الترشيح أن استخدام هذه النفايات لا يشكل أي خطر على البيئة، مما يعني أن الطوب الذي تم الحصول عليه يعد طوباً صديقاً للبيئة.

الكلمات الرئيسية: المباني القديمة لسكيكدة، الترميم البيئي، مواد صديقة للبيئة، طوب الطيني المحروق، إعادة التدوير. النفايات

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
ملخص	v
Table des matières	vi
Table des figures	xiv
Liste des tableaux	xviii
Liste des abréviations, sigles et acronymes	xix
INTRODUCTION GENERALE	1
PROBLEMATIQUE	5
HYPOTHESES DE LA RECHERCHE	4
OBJECTIF DE LA RECHERCHE	5
ASPECTS METHODOLOGIQUES	6

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE

1. PRÉAMBULE	7
2. PROBLEMATIQUE DES DECHETS INDUSTRIELS ET POLITIQUE ENVIRONNEMENTALE A L'ECHELLE MONDIALE ET NATIONAL	7
2.1. L'environnementale associée à l'industrie, résorbée par le secteur de la construction.....	10
2.2. Le concept de développement durable et l'économie circulaire dans le domaine des matériaux de construction.....	12
2.2.1. Le système d'économie circulaire.....	12
2.2.2. La production durable des matériaux de construction.....	13
2.2.3. L'approche analyse de cycle de vie « ACV » et l'amélioration des méthodes de construction.....	13

2.3. Le choix de matériaux et les certifications environnementales.....	14
2.4. Mobilisation à l'échelle nationale.....	15
3. DES GENERALITES SUR LES BRIQUE CUITES.....	16
3.1. Le développement de l'industrie des briques cuites à travers l'histoire.....	16
3.2. Les éléments constitutifs des briques cuites.....	18
3.2.1. Les terres argileuses.....	18
3.2.2. Les argiles.....	19
3.3. Caractéristiques des principales argiles de terre cuite.....	20
3.3.1. Composition chimique des argiles.....	20
3.3.2. Classification des argiles « abaque triangulaire de Taylor ».....	21
3.3.3. Classification des minéraux argileux.....	22
3.3.4. Charge des surfaces argileuses et capacité d'adsorption d'eau et de gonflement.....	24
3.4. Procédé de fabrication de briques cuites.....	25
3.4.1. Techniques de façonnage artisanal.....	25
3.4.2. Gisements.....	26
3.4.2.1. Etape de murissement ou de fermentation.....	26
3.4.2.2. Mélange, filtration et dégazage.....	26
3.4.2.3. Moulage et façonnage.....	26
3.4.2.4. Séchage à air ambiant.....	27
3.4.2.5. Brique crue.....	27
3.4.2.6. Cuisson.....	27
3.4.2.7. Technique Raku.....	28
3.4.3. Procédé de fabrication de briques moderne.....	28
3.4.3.1. Extraction et préparation des matières premières.....	28
3.4.3.2. Préparation de Mélange.....	28
3.4.3.3. Façonnage.....	29
3.4.3.4. Séchage.....	29
3.4.3.5. Cuisson.....	29
3.4.3.6. Fours.....	29
3.4.4. Des réactions chimiques destructives.....	31
3.4.5. Réaction chimique reconstructive.....	32
3.5. Les briques cuites dans la littérature.....	32
3.6. Éléments dégraissants et recyclage de déchets.....	35
3.6.1. Aperçu bibliographique sur des déchets recyclés en terre cuite.....	36
3.6.1.1. Cendres volantes.....	37
3.6.1.2. Boues.....	37
3.6.1.3. Déchets organiques et inorganiques.....	40
4. CONCLUSION	45

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

1. PRÉAMBULE	46
2. REHABILITATION DES STRUCTURES HISTORIQUES EN MACONNERIE	46
2.1. Le concept de la réhabilitation écologique des structures historiques.....	46
2.2. Le concept de l'éco-réhabilitation et le développement durable.....	47
2.3. Le processus de la réhabilitation des structures historiques en briques cuites.....	48
2.4. Le concept de stabilisation des briques cuites, dans le domaine de la réhabilitation.....	49
2.5. La stratégie de réhabilitation durable des briques cuites historiques dans la littérature...	50
3. FACTEURS DE RISQUE ET DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX	54
3.1. Causes des dépôts, des souillures et de la désintégration.....	55
3.1.1. L'humidité.....	55
3.1.1.1. Type d'introduction et migration de l'humidité dans un matériau poreux.....	55
3.1.1.1.1. Absorption.....	56
3.1.1.1.2. Adsorption.....	56
3.1.1.1.3. Sels solubles.....	57
3.1.2. Pollution de l'air.....	58
3.1.2.1. Pollution par les gaz et la vapeur.....	59
3.1.2.2. Pollution particulaire.....	59
3.1.2.3. Poussière naturelle.....	60
3.1.2.4. Suie.....	60
3.1.2.5. Aérosols.....	60
3.1.3. Agents biologiques.....	60
3.1.3.1. Arbres et plantes.....	60
3.1.3.2. Algues et lichens.....	60
3.1.3.3. Champignons et micro-organismes.....	61
3.1.4. Animaux et oiseaux.....	61
3.1.4.1. Pholades.....	61
3.1.4.2. Oiseaux.....	62
3.1.5. Rouille et corrosion.....	62
3.1.5.1. Naturelle sur la pierre.....	62
3.1.5.2. Corrosion des éléments métalliques.....	62
3.1.6. Patine.....	62
3.1.7. Enduits.....	63
3.1.8. Modification minéralogiques de cœur de céramique.....	63
3.1.9. Orientation et emplacement des maçonneries.....	64
3.1.9.1. Orientation.....	64
3.1.9.1.1. Le vent.....	64
3.1.9.1.2. Contrainte thermique.....	64
3.1.10. Dégâts causés par l'homme.....	65
3.1.11. Dégâts structurels.....	65
4. SOLUTIONS POUR DES PATHOLOGIES, AFFECTANT LA MACONNERIE	66
4.1. Elimination de l'humidité.....	66
4.2. Nettoyage.....	67
4.3. Consolidation.....	68

4.4. Collage.....	68
4.5. Le renforcement avec des éléments en acier inoxydable.....	68
4.6. Intégration ou restauration formelle.....	69
5. LA METHODOLOGIE D'UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE, DES BRIQUES CUITES HISTORIQUES	70
5.1. Limites à respecter dans le choix de matériaux.....	70
5.2. L'aspect historique de processus de réhabilitation de la brique.....	70
5.2.1. Analyse du cadre méthodologique.....	71
5.3. Planification d'une intervention de réhabilitation.....	72
5.4. Diagnostic visuel in-situ.....	72
5.4.1. Relevés géométriques et graphiques.....	72
5.4.2. Relevés pathologique et constructif.....	72
5.4.2.1. Tôle simple et double.....	73
5.4.2.2. Radar / Tomographie.....	73
5.4.2.3. Thermographie.....	73
5.4.2.4. Endoscopie.....	73
5.4.2.5. La pipette de Karsten.....	73
5.4.2.6. L'humidimètre.....	73
5.4.2.7. Le scléromètre à rebond (ou marteau de Schmidt).....	74
5.4.2.8. Le vérin plat.....	74
5.4.2.9. Des bandelettes indicatrices de sel.....	74
6. REPARATION ET REMPLACEMENT DES PIECES MANQUANTES	74
6.1. Le remplacement par des briques anciennes récupérées.....	75
6.2. La substitution par l'élaboration d'une nouvelle brique appropriée.....	75
6.3. Caractérisation des briques cuites anciennes.....	76
6.3.1. Caractérisation Géo-structurale.....	77
6.3.1.1. Essai de densité apparente.....	77
6.3.1.2. La porosité ouverte.....	77
6.3.1.3. Absorption d'eau par capillarité.....	77
6.3.2. Caractérisation mécanique.....	78
6.3.2.1. Résistance à la compression.....	78
6.3.2.2. Résistance à la traction.....	78
6.3.3. Caractérisations minéralogiques et physicochimiques.....	78
6.3.3.1. Diffraction des rayons X (DRX).....	78
6.3.3.2. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	78
6.3.3.3. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	79
6.4. Caractérisation des matières premières « terre et ajouts ».....	80
6.4.1. Caractérisations minéralogiques et chimiques.....	80
6.4.1.1. Teneur en matières organiques.....	80
6.4.1.2. Teneur en chaux.....	80
6.4.1.3. Teneur en sel.....	80
6.4.1.4. L'analyse au spectromètre fluorescence.....	80
6.4.1.5. Diffraction des rayons X (DRX).....	81
6.4.1.6. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	81

6.4.1.7. Le bleu de Méthylène.....	81
6.4.2. Caractéristiques hydro-géotechniques.....	82
6.4.2.1. La densité apparente au pycnomètre.....	82
6.4.2.2. La teneur en eau.....	82
6.4.2.3. L'essai de retrait simplifié (procédure essai de l'Ifsttar).....	82
6.4.2.4. Caractéristiques de compactage « Essai Proctor ».....	82
6.4.2.5. Analyse granulométrique.....	82
6.4.2.6. Les limites d'Atterberg.....	83
6.4.2.6.1. Diagramme de plasticité.....	83
6.4.2.7. L'équivalent de sable.....	84
6.5. Caractérisation des nouvelles briques de substitution.....	85
6.5.1. Caractérisation structurale.....	85
6.5.1.1. La densité apparente.....	85
6.5.1.2. La porosité ouverte.....	85
6.5.1.3. Retrait au séchage et à la cuisson.....	85
6.5.2. Caractérisation hydrique.....	86
6.5.2.1. Absorption d'eau par capillarité.....	86
6.5.3. Caractérisation mécanique.....	86
6.5.3.1. La résistance à la compression.....	86
6.5.3.2. La résistance à la traction.....	86
6.5.4. Caractérisation physicochimique.....	87
6.5.4.1. Taux de carbonate de calcium.....	87
6.5.4.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	87
6.5.5. Caractérisation environnementale.....	87
6.5.5.1. Test de lixiviation.....	87
7. CONCLUSION	88

CHAPITRE III

ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA »

1. PRÉAMBULE	89
2. PRESENTATION DE SITE	89
2.1. La Ville de Skikda.....	89
2.2. La Rue Didouche Mourad.....	90
2.2.1. Genèse historique.....	90
2.2.2. Description de l'état de lieu, usage et aspects fonctionnel.....	92
2.2.3. La composition architecturale et l'analyse physico-constructive des bâtiments.....	93
2.2.4. La structure verticale, horizontale et escalier.....	93
2.2.5. La description de l'enveloppe.....	93
2.2.5.1. Façades.....	93
2.2.5.2. Toiture.....	93
2.2.5.3. Planchers et clôtures en contacts avec le sol.....	93

2.2.5.4. Menuiseries et serrurerie.....	94
2.2.5.5. Description de cloisonnement intérieur.....	94
3. L'ETAT DE CONSERVATION DES IMMEUBLES	94
3.1. Désordres.....	94
3.1.1. Structure de la couverture.....	94
3.1.2. Structure verticales.....	95
3.1.3. Structure horizontale.....	95
3.1.4. Fondations et caves.....	96
3.1.5. Escaliers.....	96
3.1.6. Façade.....	97
4. CARACTERISATION ET EVALUATION, DES MATERIAUX ET ANALYSE CHROMATIQUE	98
4.1. La caractérisation de différents matériaux.....	98
4.1.1. Caractérisation des mortiers.....	98
4.1.2. Caractéristiques des briques cuites.....	98
4.1.2.1. Caractéristique des briques type A.....	98
4.1.2.2. Caractéristique des briques type B.....	98
4.1.2.3. Caractéristique des briques type C.....	99
4.1.2.4. Caractéristique des briques type D.....	99
4.1.2.5. Caractéristique des briques type E.....	99
4.1.3. Type et épaisseur de joint.....	99
4.2. L'étude géotechnique.....	100
4.3. La synthèse.....	101
5. L'ETUDE DE BRIQUES CUITES PRELEVEES DES IMMEUBLES DE LA RUE DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA	102
5.1. La provenance des briques.....	102
5.2. Investigation.....	102
5.3. Résultat de l'investigation.....	103
5.4. La brique de Skikda, brique témoin.....	104
5.4.1. Réparation des pièces manquantes.....	104
5.4.2. Caractérisation des briques cuites anciennes de Skikda.....	104
5.4.2.1. Caractérisation Géo-structurale.....	104
5.4.2.1.1. Essai de densité apparente.....	104
5.4.2.1.2. La porosité ouverte, Absorption d'eau par capillarité.....	104
5.4.2.2. Caractérisation mécanique.....	105
5.4.2.2.1. Résistance à la compression et à la traction.....	105
5.4.2.3. Caractérisations minéralogiques et physicochimiques.....	106
5.4.2.3.1. Diffraction des rayons X (DRX).....	106
5.4.2.3.2. Taux de carbonate de calcium.....	107
5.4.2.3.3. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	107
5.4.2.3.4. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	108
6. CONCLUSION	109

CHAPITRE IV
CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION
DES NOUVELLES BRIQUES

1. PRÉAMBULE	110
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	110
2.1. Matière première « l'argile de Mila ».....	110
2.2. Additifs des déchets.....	111
2.2.1. Méthodologie d'échantillonnage.....	111
2.2.2. La poudre de marbre.....	111
2.2.3. Le sable.....	112
2.2.4. La sciure de bois.....	112
2.2.5. La limaille d'acier.....	112
3. FABRICATION D'ECHANTILLONS DES BRIQUES	113
4. COMBINAISON DE DIVERSES BRIQUES CUITES	115
5. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES « TERRE ET DECHETS »	115
5.1. Caractérisations minéralogiques et chimiques.....	115
5.1.1. Teneur en matières organiques.....	115
5.1.2. Détermination de la chaux.....	116
5.1.3. Teneur en sel et de Gypse.....	117
5.1.4. L'analyse au spectromètre florescence.....	117
5.1.5. Diffraction des rayons X (DRX).....	118
5.1.6. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	119
5.1.7. Le bleu de Méthylène.....	119
5.2. Caractéristiques hydro-géotechniques.....	120
5.2.1. La densité apparente au pycnomètre.....	120
5.2.2. La teneur en eau.....	120
5.2.3. L'essai de retrait simplifié (procédure essai de l'Ifsttar).....	120
5.2.4. Caractéristiques de compactage « Essai Proctor ».....	121
5.2.5. Analyse granulométrique.....	122
5.2.6. Les limites d'Atterberg.....	123
5.2.7. L'équivalent de sable.....	124
6. CARACTERISATION DES NOUVELLES BRIQUES DE SUBSTITUTION	125
6.1. Caractérisation structurale.....	125
6.1.1. La densité apparente.....	125
6.1.2. La porosité ouverte.....	125
6.1.3. Retrait au séchage et à la cuisson.....	126
6.2. Caractérisation hydrique.....	126
6.2.1. Absorption d'eau par capillarité.....	126
6.3. Caractérisation mécanique.....	127
6.3.1. La résistance à la compression.....	127
6.3.2. La résistance à la traction.....	127
6.4. Caractérisation physicochimique.....	128
6.4.1. Taux de carbonate de calcium.....	128
6.4.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	128

6.5. Caractérisation environnementale.....	129
6.5.1. Test de lixiviation.....	129
7. CONCLUSION	129

CHAPITRE V
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES
DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS

1. PRÉAMBULE	130
2. RÉSULTATS DES MATIERES PREMIERES ET DECHETS	130
2.1. La terre de Mila.....	130
2.1.1. Caractéristiques chimiques.....	130
2.1.2. Caractéristiques minéralogiques.....	131
2.1.3. Caractéristiques physico-chimique de la terre de Mila.....	132
2.1.4. L'Analyse thermogravimétrique de la terre argile de Mila.....	134
2.2. Les déchets.....	134
2.2.1. Caractéristiques chimiques des additifs.....	134
2.2.2. Caractéristiques physiques, sels solubles et analyse thermogravimétrique des additifs.....	135
2.2.3. L'Analyse thermogravimétrique du sable de Sigues.....	136
3. RESULTATS ET DISCUSSION	137
3.1. Couleur des briques cuites.....	137
3.2. Caractéristiques physiques.....	138
3.2.1. Masse volumique apparente.....	138
3.2.2 Retrait à la cuisson, et perte de poids.....	138
3.2.3. Porosité accessible à l'eau et absorption d'eau capillaire.....	139
3.3. Résistance à la compression.....	140
3.3.1. Résistance à la compression.....	140
3.3.2. Résistance à la traction.....	141
3.4. Menaces pesant sur l'état de conservation.....	143
3.4.1. Quantité de calcite dans les briques cuites de Mila et toutes les briques cuites.....	143
3.4.2. Comparaison des micrographies MEB des briques cuites au grossissement de 20 µm :.....	143
4.5. Aspect environnemental.....	145
4.5.1. Test de lixiviation.....	145
5. CONCLUSION	146
CONCLUSION GENERALE	148
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	153
ANNEXE	185

Table des figures

Figure 1 1: Production de déchets par grands secteurs d'activité industrielle en Algérie (Djemaci, 2012).....	9
Figure 1 2: Mode d'élimination des déchets en Algérie (MAT, 2004) (Djemaci, 2012).....	10
Figure 1 3: Production mondiale de briques publiée par la Banque mondiale rapport (Akhtar & al, 2022).....	18
Figure 1 4: Constituants d'un sol, (Blanck, 2013).....	19
Figure 1 5: La classification de terre selon la quantité de composantes, (Delot, 2015).....	19
Figure 1 6: Abaque de Taylor (Minke, 2006).....	21
Figure 1 7: Organisation d'une couche tétraédrique, (Shimatu Mbuyi, 2012).....	22
Figure 1 8: Organisation d'une couche octaédrique, (Shimatu Mbuyi, 2012).....	22
Figure 1 9: Structure d'un feuillet T-O de type kaolinite et T-O-T de type montmorillonite, (Shimatu Mbuyi, 2012).....	23
Figure 1 10: Moulage dans le processus de fabrication de briques (Chanda, 2016).....	26
Figure 1 11: a) Chambre de cuisson pour la fabrication de briques, b) Four de la cuisson des briques cuites (Chanda, 2016; Akhtar & al, 2022).....	28
Figure 1 12: Procédé de fabrication de briques cuites, (Alviset, 1987).....	30
Figure 1 13: Principe de fonctionnement d'un four-tunnel, (Alviset, 1987).....	30
Figure 2 1: Cycle de production des matériaux durables pour le domaine de construction et la réhabilitation.....	54
Figure 2 2: Une détérioration des briques, au contact avec l'eau en raison d'un problème d'étanchéité (Florence & al, 2021).....	56
Figure 2 3: Les attaques des sels dans les bâtiments (Ahmad & al, 2010).....	57
Figure 2 4: Schémas de la polarisation spontanée provoquée dans un mur par l'humidité ascendante (a) ; et effet des auto-inducteurs électrostatiques (b) (Sandrolini & al, 2007).....	58
Figure 2 5: Des taches Subflorescence ou d'efflorescence en couleur blanche sur le mur (López-Arce & al, 2009).....	58
Figure 2 6: L'apparition des micro-organismes, sur les briques (Toolkit, 2021).....	61
Figure 2 7: Détachement des couches de la peinture sur piliers en briques cuites (Sandrolini & al, 2007).....	63
Figure 2 8: L'effritement des couches supérieures des briques cuites (Toolkit, 2021).....	64
Figure 2 9: Des céramiques fissurées suite à des mouvements structurels provenant de l'intérieur de l'artefact (Fabbri, 2012).....	66
Figure 2 10: Traitement d'un cycle d'imperméabilisation par injection chimique (Ahmad & al, 2010).....	67
Figure 2 11: Le dessalement du sel sur les surfaces murales par le procédé de cataplasme (Ahmad & al, 2010).....	68
Figure 2 12: a) Cerclage avec câbles d'acier précontraints (Borri & al, 2013), b) Renforcement des murs de refend : méthode CAM, c) détail du joint renforcé de barres torsadées en acier inoxydable (Corradi & al, 2018).....	69
Figure 2 13: Quelques outils de teste non destructifs : a) La pipette de Karsten, b) D'un humidimètre, c) Des bandelettes indicatrices de sels, d) Le scléromètre, d) un vérin plat (Toolkit, 2021).....	74
Figure 2 14: Stratégie de réhabilitation écologique des briques cuites historiques.....	76

Figure 2 15: Caractérisation des anciennes briques, adoptée dans l'étude.....	79
Figure 2 16: Diagramme de plasticité (Fgaier, 2013).....	84
Figure 2 17: Caractérisation des matières premières, adoptée dans l'étude.....	84
Figure 2 18: Caractérisation des briques nouvelles, adoptée dans l'étude.....	88
Figure 3 1: Situation de la ville de Skikda (Kaouche, 2015).....	91
Figure 3 2: Carte de Philippe ville et sa région 1837-1870 (Solal, 1900).....	91
Figure 3 3: L'avenue Didouche Mourad datant à l'époque coloniale (https://www.facebook.com/Skikda.une.ville.une.histoire.).....	91
Figure 3 4: Façade de l'artère de la Rue Didouche Mourad (CTC Est, 2012).....	91
Figure 3 5: Les limites de l'avenue Didouche Mourad. Par rapport aux communes et la position de l'ilot 17 sur la carte (CTC-EST/AQUIDOS).....	92
Figure 3 6: L'ilot 17 a l'ancienne époque (CTC-EST/AQUIDOS).....	92
Figure 3 7: L'ilot 17 a l'ancienne, actuellement, cliché auteur, 2017.....	92
Figure 3 8: Façade urbaine de l'ilot 17, (OPGI Skikda, 2016).....	92
Figure 3 9: La charpente en tuile est entièrement démolie.....	94
Figure 3 10: La charpente en tuile est entièrement démolie.....	94
Figure 3 11: La structure en tuile en bois est entièrement détruite.....	94
Figure 3 12: Des pannes, et les liteaux en bois, entièrement cassés.....	95
Figure 3 13: Une flamande de type verrière en très mauvais état.....	95
Figure 3 14: Une cheminée en briques endommagées.....	95
Figure 3 15 : Le mur de séparation en briques est fissuré.....	95
Figure 3 16: Une arcade était fissurée et comblait de ciment.....	95
Figure 3 17: Utilisation de briques perforées pour remplir un mur de séparation.....	95
Figure 3 18: Le mur de la façade est fissuré par l'intérieur.....	95
Figure 3 19: Le détachement de la peinture, par l'humidité.....	96
Figure 3 20: Détérioration de l'enduit et formation de salissures à la suite de l'humidité.....	96
Figure 3 21: Destruction total de la partie inférieure du plancher en bois.....	96
Figure 3 22: L'effondrement partiel du planché et l'apparition de la partie a voûtain.....	96
Figure 3 23: L'accès aux caves est encombré de déchets.....	96
Figure 3 24: Des caves qui servent de débarrât.....	96
Figure 3 25: Des caves encombrées de débris.....	96
Figure 3 26: Une caves inondé par les eaux d'assainissement et les eaux sous terraines.....	96
Figure 3 27: Une marche en partie endommagée.....	97
Figure 3 28: Déconstruction de la partie inférieure de la cage d'escalier.....	97
Figure 3 29: Palier de la cage d'escalier entièrement détruit.....	97
Figure 3 30: La partie inférieure de la cage d'escalier et complètement arraché.....	97
Figure 3 31: Une console endommagée.....	97
Figure 3 32: Corniche endommagée.....	97
Figure 3 33: Les barreaudages en armatures sont corrodés.....	97
Figure 3 34: Un mur porteur, latéral, présente de profondes fissures.....	97
Figure 3 35: L'arcade est entièrement décapée.....	97
Figure 3 36: La façade est entièrement vieillie.....	97
Figure 3 37: L'altération de la peinture et l'apparition de moisissures.....	97
Figure 3 38: Décollement des couches d'enduits de la façade.....	97
Figure 3 39: Les efflorescences et la poussée de la végétation sur la façade.....	98
Figure 3 40: Des fissures et détérioration des murs porteurs.....	98
Figure 3 41: Utilisation de briques perforées pour remplir une partie de la paroi.....	98

Figure 3 42: La porte fenêtre a complètement disparu.....	98
Figure 3 43: Le groupe AQUIDOS, lors d'une inspection sur site.....	100
Figure 3 44: Des outils d'inspection.....	100
Figure 3 45: Échantillonnage sur planché.....	100
Figure 3 46: Prélèvement sur les colonnes des arcades.....	100
Figure 3 47: Des échantillons de matériaux déferents.....	100
Figure 3 48: Préparation des échantillons en vue de l'analyse.....	100
Figure 3 49: Les points de sondage.....	100
Figure 3 50: La réalisation des carottes.....	100
Figure 3 51: Les carottes.....	100
Figure 3 52: Les étapes de réhabilitation d'une terrasse.....	101
Figure 3 53: Chemisage des piliers et renforcement des fondations a tria-soudés.....	101
Figure 3 54: Reconstruction des murs en briques cuites perforées.....	101
Figure 3 55: Façade avant la réhabilitation.....	101
Figure 3 56: Façade au cours des travaux de réhabilitation.....	101
Figure 3 57: Façade après la réhabilitation.....	101
Figure 3 58: Les briques prélevées d'un mur de la terrasse de l'immeuble n.4, ilots 17, prise d'auteur, cliché auteur.....	102
Figure 3 59: L'ancien gisement, sis au Sissel, cliché hauteur.....	103
Figure 3 60: Un ancien Plan de l'ancienne briqueterie, sis au Sissel, (archives de la mairie de la Wilaya de Skikda).....	103
Figure 3 61: Essai de compression uni-axiale sur une brique ancienne de Skikda.....	106
Figure 3 62: X-ray Diagrammes de diffraction des rayons X des anciennes briques cuites de Skikda.....	107
Figure 3 63: Analyse thermogravimétrique des anciennes briques cuites de Skikda.....	108
Figure 3 64: Micrographie obtenue par MEB des chutes des briques anciennes de Skikda à 900 °C, au grossissement de 20 µm.....	108
Figure 4 1: L'extraction de l'argile à l'aide d'une coupelle. Figure 4 2: Texture naturelle de l'argile de Mila.....	111
Figure 4 3 : Poudre de marbre très fine.....	113
Figure 4 4 : Poudre de marbre fine.....	113
Figure 4 5 : Le sable de Sigus.....	113
Figure 4 6: La sciure de bois.....	113
Figure 4 7: La limaille d'acier.....	113
Figure 4 8: Tamisage.....	114
Figure 4 9: Humidification.....	114
Figure 4 10: Malaxage.....	114
Figure 4 11: Moulage.....	114
Figure 4 12: Séchage.....	114
Figure 4 13: Cuisson.....	114
Figure 4 14: Malaxage mécanique.....	114
Figure 4 15: Moulage par compactage à l'aide d'un marteau en caoutchouc.....	114
Figure 4 16: Démoulage effectué sur papier abrasif.....	114
Figure 4 17: Séchage électrique.....	114
Figure 4 18: Cuisson.....	114
Figure 4 19: Des briques stabilisées après cuisson.....	114
Figure 4 20: Schéma courbe de cuisson, la briqueterie de la rue Didouche Mourad.....	115

Figure 4 21:Essai de la teneur en matières organiques, cliché auteur.....	116
Figure 4 22: Détermination de la chaux.....	116
Figure 4 23: Teneur en sel et de Gypse.....	117
Figure 4 24: Le spectromètre à fluorescence X (S2PUMA-BRUKER) (EDXRF) (XRF).....	118
Figure 4 25: Diffraction des rayons X (DRX).....	118
Figure 4 26: L'appareillage de l'essai DSC-TGA.....	119
Figure 4 27: L'essai de bleu de Méthylène.....	120
Figure 4 28:La mesure de la densité apparente au pycnomètre.....	120
Figure 4 29: La mesure des teneurs en eau.....	121
Figure 4 30: Le principe de l'essai de retrait simplifié.....	121
Figure 4 31: Le Protocol de « l'Essai Proctor ».....	122
Figure 4 32: L'essai de la granulométrie par tamisage et par sédimentométrie.....	123
Figure 4 33: Le protocole des limites d'Atterberg.....	124
Figure 4 34: L'essai de l'équivalent de sable.....	124
Figure 4 35: La porosité ouverte par Hydrostatique balance méthode.....	126
Figure 4 36:Une compresse hydraulique universelle Tinius Olsen, Super, et étuve.....	127
Figure 4 37: L'appareillage de l'analyse Microscopie électronique à balayage (MEB).....	128
Figure 4 38: Atomic absorption spectrometer PinAAcle 900 H / PerkinElmer.....	129
Figure 5 1: Diagrammes de diffraction des rayons X de l'argile de Mila.....	132
Figure 5 2: Distribution granulométrique.....	133
Figure 5 3: Graph de plasticité.....	133
Figure 5 4: La courbe Proctor.....	133
Figure 5 5: Analyse thermogravimétrique de la terre de Mila.....	134
Figure 5 6: Répartition granulométrique du sable, FMP et VFMP.....	136
Figure 5 7: Analyse thermogravimétrique du sable de Sigues.....	137
Figure 5 8:de droite à gauche, a) briques cuites sans ajouts (CMC) ; b) briques cuites avec ajouts.....	137
Figure 5 9: Essai de compression uni-axiale sur des échantillons représentatifs : (a) SOFB; (b) CMB; (c) WSB; (d) SFB; (e) VFMPB; (f) FMPB.....	141
Figure 5 10: Essai de traction indirecte sur un échantillon représentatif : a) a) SOFB; b) CMB; c) WSB; d) SFB; e) VFMPB; f) FMPB.....	142
Figure 5 11: Micrographie obtenue par MEB des briques frittées à 900 °C : a) SOFB; b) MCB; c) VFMPB; d) FMPB; e) WSB; f) SFB; at magnification of 20 µm.....	145

Liste des tableaux

Tableau 1 1: Composition chimique des argiles italiennes pour les briques (Fabbri, 2012).....	21
Tableau 1 2: Principaux minéraux constituant les argiles céramiques (Fabbri, 2012).....	24
Tableau 1 3: Caractéristiques des différentes familles d'argiles (Truche, 2010).....	24
Tableau 1 4: Classification des argiles selon leurs propriétés de gonflement, (Shimatu Mbuyi, 2012).....	25
Tableau 2 1: Principaux agents ambiants de dégradation, (Environnement Canada, 1994).....	55
Tableau 2 2: Plasticité en fonction de I_p (Jacques & al, 2002).....	83
Tableau 3 1: Les valeurs des tensions et porosités de briques, effectuées au laboratoire UPC...99	
Tableau 3 2: Les formats les plus courants en France au XIX siècle (Thibaut, 1991).....	103
Tableau 3 3: Caractéristiques physiques et mécaniques des briques cuites anciennes de Skikda.....	106
Tableau 4 1: Proportion de mélange des différents mélanges de terre (%).....	115
Tableau 5 1: Résultats de l'analyse chimique de l'argile de Mila.....	131
Tableau 5 2: Composition minéralogique principale de l'argile de Mila (données semi-quantitatives).....	131
Tableau 5 3: Composition minéralogique de la partie argileuse (données semi-quantitatives).....	132
Tableau 5 4 : Caractéristiques physiques, distribution granulométrique, sels solubles.....	133
Tableau 5 5: Caractéristiques chimiques des additifs.....	135
Tableau 5 6: Analyse physico-chimique des additifs.....	136
Tableau 5 7: Propriétés physiques et mécaniques des briques cuites.....	139
Tableau 5 8: Essai de compression uni-axiale (MPa).....	141
Tableau 5 9: Essai de traction indirecte (MPa).....	142
Tableau 5 10: Teneur en CaCO_3 des briques cuites.....	143
Tableau 5 11: Les résultats de la caractérisation de la toxicité des lixiviats (TCLP) (US-EPA 1311).....	146

Liste des abréviations, sigles et acronymes

<u>Abréviations :</u>		<u>Indices / Ratios :</u>	
<i>SOFB :</i>	Briques cuites anciennes de Skikda ;	<i>PL:</i>	Limite de plasticité (%) ;
<i>CMB :</i>	Briques cuites de contrôle « terre de Mila » ;	<i>LL:</i>	Limite de liquidité (%) ;
<i>FMPB :</i>	Briques cuites avec poudre de marbre fine ;	<i>PI:</i>	Indice de plasticité ;
<i>VFMPB :</i>	Briques cuites avec poudre de marbre très fine ;	<i>SE:</i>	Équivalent de sable (%) ;
<i>SFB :</i>	Briques cuites avec limaille d'acier ;	<i>Indissoluble % : Résistant aux attaques et particules non solubles.</i>	
<i>WSB:</i>	Briques cuites avec sciure de bois ;	<u>Symbol :</u>	
<i>MC:</i>	Argile de Mila ;	<i>M :</i>	Poids de l'échantillon (g) ;
<i>FMP:</i>	Poudre de marbre fine ;	<i>V :</i>	Volume de l'échantillon (cm ³) ;
<i>VFMP:</i>	Poudre de marbre très fine ;	<i>R:</i>	Retrait (%) ;
<i>SF:</i>	L'limaille d'acier ;	<i>HCl :</i>	Acide chlorhydrique ;
<i>WS:</i>	La sciure de bois ;	<i>PH:</i>	Potentiel hydrogène valeur pH ;
<i>Sable:</i>	Sable de Sigues ;	<i>D:</i>	Diamètre maximal des particules (mm)
<u>Abréviations des tests :</u>		<i>B:</i>	;
<i>(XRF):</i>	Fluorescence X ;	<i>m0:</i>	Volume de solution bleue injectée
<i>(XRD)</i>	Diffraction des rayons X ;	<i>AW:</i>	(cm ³) ;
<i>(MBV):</i>	Valeurs du bleu de méthylène (g/kg) ;	<i>F:</i>	Masse de la matière organique (g, kg) ;
<i>(DTA-TG):</i>	Analyse thermique différentielle par thermogravimétrie ;	<i>D:</i>	Absorption d'eau (kg.m ² .min) ;
<i>(SEM) :</i>	Microscopie électronique à balayage ;	<i>R:</i>	Retrait à la cuisson (%) ;
<i>(TCLP):</i>	Caractérisation toxique des lixiviats ;	<i>WL:</i>	Retrait à sec (%) ;
<u>Greek Letters</u>		<i>DM:</i>	Retrait linéaire total (%) ;
<i>γ_s :</i>	Masse volumique apparente (g/cm ³) ;	<i>P:</i>	Perte de poids (%) ;
<i>Y_d:</i>	Conditions de compactage maximales, essai normal Proctor (t /m ³) ;	Absorption par capillarité (%) ;	
		Porosité ouverte totale (%) ;	
		<i>C Résistance : Résistance à la compression (MPa) ;</i>	
		<i>T Résistance : Résistance à la traction (MPa) ;</i>	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Étant donné l'importance de préserver notre histoire et notre culture pour les générations futures, la préservation de l'héritage immobilier, qui constitue l'un des fondements fondamentaux de l'identité humaine, a suscité une inquiétude mondiale. La réhabilitation du vieux bâti est devenue une priorité des États, des autorités et de tous les pouvoirs qui se mobilisent. De ce fait, tout ce qui est technique, historique et ancestral devrait être valorisé en préservant et en appréciant ces bâtiments. A l'instar des villes historiques, l'Algérie est notoire pour sa diversité en quartiers historiques dotés d'une architecture en briques cuites datant de plusieurs siècles. Étant donné la présence concomitante de multiples cultures à différentes périodes. En particulier, l'architecture coloniale faisait également largement appel aux briques cuites, qu'il s'agit d'un vestige précieux qui est impitoyablement traité et mal protégé et qui se trouve aujourd'hui dans un état de conservation médiocre. Il semble donc nettement impératif de mettre en œuvre une stratégie de réhabilitation d'envergure afin de le préserver et ne pas risquer la perte de son authenticité. Or, les quelques tentatives menées pour remédier à cette situation ont été vaines. L'absence d'expérience et de compétence nécessitant l'intervention des professionnels et l'application d'une procédure scientifique rigoureuse n'a fait qu'aggraver sa dégradation. A priori, tout semble indiquer que les difficultés sérieuses rencontrées entraînant cet échec, sont principalement dues à l'absence de matériaux de substitution compatibles et appropriés. En réalité, le sujet des matériaux de construction employés dans les travaux de la réhabilitation du vieux bâti est très récent et une pression considérable est exercée sur la nécessité de d'assurer une compatibilité optimale avec le substrat original.

Le principal objectif est d'analyser les briques cuites récupérées des anciens bâtiments afin de concevoir de nouveaux produits adaptés pour résoudre les problèmes liés à l'insuffisance de briques cuites de substitution adéquates. Elle vise d'y parvenir grâce à des interventions correctives, combinant le processus traditionnel avec des techniques novatrices afin de créer des alternatives peu coûteuses au lieu de produits industriels coûteux et prêts à l'emploi qui endommagent nos bâtiments. Pour produire des briques cuites de qualité à prix abordable, la matière première argileuse a été rectifiée en utilisant des déchets industriels comme substitut dans différentes céramiques. Cette réflexion est motivée par des données divulguées par le secteur industriel algérien, qui révèlent qu'il produit chaque année une quantité considérable de déchets (plus de 2 500 000 tonnes par an, selon les statistiques). Le recyclage de ces déchets est considéré par les autorités algériennes comme alternative pratique et efficace pour lutter contre l'épuisement des ressources naturelles et la saturation des décharges industrielles, qui représentent une véritable menace pour l'environnement et la santé publique.

La singularité de cette étude repose à priori sur le choix du cas d'étude, la mise en évidence des effets des stabilisants écologiques, en exposant les inconvénients et les avantages de cette réflexion sur le domaine de la fabrication des constructions. À cet égard, nous avons

choisi la vieille ville de Skikda, située sur la côte nord-est de l'Algérie, comme cas d'étude. Le quartier a été érigé par les Français en 1839, sur le site des ruines romaines de l'ancienne cité de Stora, en suivant le modèle architectural européen en vigueur dans les nouvelles villes du Maghreb. Une oeuvre architecturale exceptionnelle, qui demeure pourtant habitable en dépit des détériorations qu'elle subit et des épreuves du temps. Les études de réhabilitation intégrée menées par le CTC (Contrôle Technique des Constructions) Annaba et l'EPSEB-UPC (Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona- Universitat Politècnica de Catalunya) à Barcelone en 2016 sur les bâtiments anciens de la commune de Skikda, dont 27 bâtiments de la rue Didouche Mourad, ont témoigné que les murs étaient majoritairement en briques cuites, tandis que les plafonds étaient constitués de poutres métalliques et de voûtes et d'arcs en maçonnerie entièrement cuites. Actuellement, les bâtiments souffrent d'un large éventail de phénomènes de détérioration, y compris la perte de masse et des murs profondément fissurés.

Le premier chapitre traitait la question de la sélection des matériaux dans un contexte d'une crise environnementale, en mettant l'accent sur la brique cuite stabilisée, en particulier dans le secteur du bâtiment. Une recherche bibliographique a été effectuée dans le but de présenter de manière hiérarchique tous les concepts scientifiques indispensables pour appréhender la problématique de l'industrie de la céramique et les déchets produits par ce secteur, ainsi que le risque d'épuisement des ressources naturelles et les possibilités d'intégration de systèmes de recyclage et de développement durable dans la fabrication des matériaux en tant que solution. La section synthétique a été spécialement consacrée aux nombreuses recherches ultérieures effectuées sur le recyclage des déchets préalablement utilisés dans la production des briques cuites. Certaines illustrations de ces interventions ont été évoquées à la fin.

Quant au deuxième chapitre, la brique cuite stabilisée était évoquée en particulier dans le domaine de la réhabilitation. Une recherche bibliographique a été effectuée, en exposant de façon exhaustive tous les concepts scientifiques indispensables à la compréhension du matériau ancien les exigences de le remplacer dans un cadre professionnel et dans l'état d'art, ainsi que tous les détails qui permettront d'améliorer la prescription de l'intervention et de choisir les technologies adéquates. Plusieurs exemples de ce genre d'intervention ont été évoqués à la fin.

Dans un troisième chapitre, une étude approfondie des immeubles de la Rue Didouche Mourad, Skikda a été minutieusement réalisée. Les données historiques, architecturales et structurelles, ainsi que les informations et les enquêtes réalisées in-situ ou tirées de différents documents: "archives, entretiens, mesures et rapports techniques" obtenus auprès des autorités et administrations concernées, ont été minutieusement acquis et analysés. Les résultats de cette étude descriptive et analytique offrent une solide base documentaire pour approfondir notre compréhension de la brique pleine de terre cuite en matière de modalités, appareillages, types, dimensions et techniques de construction. Parallèlement, il a été nécessaire de réaliser une analyse expérimentale en laboratoire, en examinant les propriétés minéralogiques, physiques et mécaniques des échantillons. Les résultats servaient principalement à l'évaluation de performances des briques anciennes, mais ils étaient également utiles pour fournir des données sur la production de briques neuves.

Dans le quatrième chapitre, Les quatre déchets, préalablement testés en stabilisation céramique, le sable calcaire, la poudre de marbre (MP), la sciure de bois (WS) et la limaille d'acier (SF), sont ajoutés par la suite à l'argile Mila prélevée d'un gisement situé à l'est algérien pour fabriquer des briques cuites. Différentes formulations ont été suggérées en utilisant la terre

de Mila avec 10 % de sable de carrière et des proportions optimales de WS, FMP, VFMP, SF, avec des taux de substitution de 5 %, 20 %, 20 %, 20 %, 20 %, respectivement. La température de cuisson à une température de 900°C.

Comme dernier et cinquième chapitre, nous avons étudié les résultats des nouveaux spécimens en laboratoire en réalisant des analyses de composition, des essais physique et même mécanique. L'objectif est d'évaluer l'impact des déchets rajoutés sur le comportement de nouveaux spécimens en les comparant à l'échantillon prélevé de Skikda et à celui fabriqué exclusivement avec le sol de Mila, notre matière première. Par la suite, une analyse chimique et microstructurale des MEB et DSC-TCA a été effectuée afin de comprendre les modifications à l'échelle microscopique. Enfin, pour évaluer les possibles conséquences environnementales des additifs de déchets choisis sur les briques cuites, la lixiviation des métaux lourds a été vérifiée à l'aide de la méthode de caractérisation de la toxicité des leachates (TCLP) (US-EPA 1311). Les résultats ont montré leur pertinence. Une amélioration des propriétés étudiées est enregistrée. Particulièrement, à l'exception des briques avec de la sciure de bois (WS), les briques FMP, SF et VFMP ont montré des performances mécaniques satisfaisantes, hormis des problèmes causés par la présence de particules de calcite grossières et de la limaille d'acier lourd. Par ailleurs, l'expérience de lixiviation a démontré que l'utilisation de ces déchets n'a aucun impact sur l'environnement, ce qui fait de nos briques des matériaux écologiques.

En conclusion générale, nous avons tenté de rappeler les principales portées concernant le processus utilisé et les résultats d'analyse de comportement physique et mécanique des briques à base de déchets ainsi que leur compatibilité dans la réhabilitation des immeubles anciens en maçonnerie de Skikda. En mettant en évidence le fait que ces études constituent une ressource précieuse pour les spécialistes de différents domaines qui ont besoin d'un accès rapide à des informations à jour et précises sur les caractéristiques de divers matériaux de construction et de réhabilitation, en proposant également des actions pratiques visant à prévenir la détérioration des briques par les réactions chimiques causées par des conditions externes en présence de certains composants inappropriés. L'importance des laboratoires de recherche dans la production est à souligner. Il est important de mettre en évidence l'importance des laboratoires de recherche dans la création de solutions performantes pour la fabrication d'un matériau stabilisé destiné à être utilisé dans la réhabilitation.

PROBLEMATIQUE

À l'occasion d'une exploration des alternatives pour substituer les briques cuites traditionnelles et historiques dans le cadre d'une crise environnementale. On s'interroge sur sa conformité aux principes du développement durable et sur la nécessité de règles pour articuler les deux notions de « matériaux de réhabilitation » et de « développement durable »?

Est-il envisageable d'utiliser des déchets afin de rendre le matériau terre beaucoup plus résistant qu'auparavant et plus adapté à l'ancien substrat, et existe-t-il des mesures préventives et d'accompagnement pour ce type de projet visant à valoriser l'environnement, notamment en ce qui concerne les méthodes d'évaluation environnementale?

Est-il possible de mettre au point une méthode d'évaluation expérimentale et environnementale spécifique pour les matériaux stabilisés à partir de déchets industriels destinés au secteur de la réhabilitation, de façon à fournir aux décideurs et aux professionnels un véritable outil de contrôle à la production et des règles d'emploi à l'usage?

HYPOTHESES DE LA RECHERCHE

Notre recherche s'appuie sur la formulation de certains complémentaires :

➤ *Hypothèse n° 1 (dimension conceptuelle de la problématique)*

Pour répondre prématurément à notre première question, nous supposons que l'introduction du recyclage des déchets industriels dans le secteur de la construction ne respecte pas pleinement les principes du développement durable. La relation entre les deux concepts de « matériaux de construction écologique » et de « développement durable » est supposée être définie, respectée et mise en œuvre pour mieux appréhender ces deux concepts et les maîtriser par la suite.

➤ *Hypothèse n° 2 (dimension réglementaires et institutionnelle de la problématique)*

Nous considérons que l'accompagnement et le suivi dans ce genre de projet requièrent une base réglementaire et institutionnelle appropriée afin de prendre en compte davantage les questions environnementales dans le domaine des matériaux. Cela implique l'établissement de directives opérationnelles qui favorisent l'utilisation de méthodes d'évaluation, ainsi que la formation de professionnels spécialisés dans la fabrication de matériaux respectueux de l'environnement et l'évaluation environnementale. Nous présumons également que, en raison du manque de réglementations, d'institutions et de techniques qui régissent ce type de projets en Algérie, les

méthodes d'évaluation actuellement disponibles pour les praticiens et les décideurs ne sont pas tout à fait adaptées aux enjeux ou sont quasiment inexistantes!

➤ *Hypothèse n° 3 (dimensions technique et opérationnelle de la problématique)*

En troisième hypothèse, nous estimons qu'il est crucial de saisir et d'analyser les spécificités des projets de reconquête des matériaux écologiques dans le domaine de la réhabilitation, en prenant en compte toutes leurs dimensions : fonctionnelles, techniques, économiques, environnementales, etc., afin de pouvoir développer une méthodologie d'évaluations opérationnelle et adaptée, qui pourrait apporter une véritable assistance aux décideurs et aux professionnels de la production. Par conséquent, une expérience d'un protocole technique élaboré à partir de l'analyse des expériences précédentes serait l'instrument permettant de maîtriser la production des briques cuites écologiques adaptées au secteur de la réhabilitation, tout en respectant l'environnement de manière quasi parfaite.

OBJECTIF DE LA RECHERCHE

En élaborant cette thématique, notre premier objectif est de mettre en avant l'importance de la question de la régénération des déchets dans divers secteurs, notamment dans l'industrie par le secteur de la construction, une stratégie qui a réussi à se positionner dans les pays développés, mais pas encore en Algérie. Toutefois, dans un environnement où il existe un manque significatif de démarches scientifiques et d'approches évaluatives propres à ce genre de projet, ce qui risque de compromettre notre succès. Les questions de valorisation environnementale et leur réelle intégration dans le domaine des matériaux, en particulier les matériaux de rechange écologiques utilisés dans les projets de réhabilitation, sont l'objet de cette étude. On vise à préserver notre héritage immobilier en utilisant de nouvelles technologies, en prenant en compte les ressources locales et en favorisant une économie des ressources naturelles et une préservation de l'environnement. En coopérant avec les spécialistes, les chercheurs et les laboratoires de recherche afin de trouver les méthodes et les matériaux adéquats pour entretenir notre bâti historique.

D'un point de vue technique, il est essentiel de promouvoir le recyclage des matériaux de construction, en les réutilisant lors des processus de réhabilitation et en réduisant au minimum la production de résidus et de déchets. Il est également important de prendre conscience de la nécessité de créer des réserves de matériaux ou d'éléments de construction qui facilitent leur réutilisation au niveau local. Il serait judicieux de favoriser la production et l'utilisation de matériaux locaux, qu'ils soient traditionnels ou innovants, en se référant aux ressources renouvelables de chaque région ou en créant des petites entreprises spécialisées dans le domaine de la construction. En définitive, il est important de souligner que l'intégration du domaine scientifique et technologique à la question de la réhabilitation et la présentation de solutions novatrices pour les différents matériaux à utiliser constitue notre principal intérêt.

ASPECTS METHODOLOGIQUES

Nous avons mis en place un système méthodologique de recherches hybrides, à la fois théoriques et opérationnelles, à chaque étape qui requiert une méthodologie adéquate :

Etape 1 (la phase préliminaire et compréhension de concepts) : D'abord, un travail « exploratoire et analytique » a été réalisé. Le focus a été mis sur l'étude conceptuelle et relationnelle des "secteurs des matériaux de construction et de l'industrie de la céramique", de la "consommation des ressources naturelles et risque environnemental" et du "développement durable". Notre choix s'est porté sur une analyse basée sur le concept/interrelations. Il nous a paru primordial de souligner la notion de protection de l'environnement, et surtout de vérifier si cette notion peut être véritablement assurée par la fabrication de matériaux durables. Des méthodes de recherche qualitatives et d'analyse théorique ou bibliographique ont permis d'éclaircir ces concepts en analysant le contenu de données textuelles issues de divers documents, tels que des entretiens, des comptes rendus, des articles de presse, des documents stratégiques ou encore des documents stratégiques,...etc.

Etape 2 (contextualisation institutionnelle) : Dans ce procédé novateur et expérimental, on ajoute aussi l'aspect historique et culturel du matériau « brique de terre cuite ancienne ou traditionnelle ». On prend en compte l'idée de l'utilisation et de l'exploitation d'un nouveau matériau pour une construction antique. Pour traiter l'ensemble des aspects du projet et enrichir la recherche avec des données fiables et concrètes, nous avons opté pour une approche qualitative en menant des entretiens avec les impliqués.

En qualité d'experts, les personnes concernées par les entretiens sont les professionnels du domaine des matériaux et de la construction locale, techniciens des collectivités locales, ingénieurs de projet, cabinets d'architecture, artisans, chefs d'entreprises de briqueterie, entrepreneurs, ingénieurs et spécialistes de la rénovation. À partir des données collectées, la méthodologie d'évaluation a été développée en tant que système d'indicateurs permettant de suivre opérationnellement le projet de réhabilitation en sélectionnant les matériaux écologiques adéquats.

En réalité, la réhabilitation n'est qu'un processus de négociation entre les divers acteurs impliqués. Une entrevue avec les autorités locales et les responsables de la protection d'un héritage bâti est donc nécessaire afin de comprendre les défis du projet, les raisons de la dégradation, les échecs et les problèmes qui entravent la préservation et la réhabilitation de ce cadre bâti, ainsi que la stratégie à mettre en place pour le préserver.

Etape 3 (aperçu sur le protocole et la méthodologie proposée) : L'expérimentation implique la réalisation d'une série d'essais en laboratoire afin d'analyser la terre et les déchets utilisés comme dégraissants, ainsi que pour évaluer les briques anciennes et celles de substitution. Élaborée à partir de nos recherches et de substitution. Créée à partir de nos travaux de recherche et d'analyse des expériences précédentes, ainsi que de nos expériences empiriques, tout en incluant une phase d'évaluation environnementale. L'analyse historique déjà réalisée contribue à la création d'un catalogue d'identification et d'indicateurs indispensables à l'évaluation des briques anciennes, en s'inspirant des chercheurs et des scientifiques spécialisés dans la préservation du patrimoine bâti en maçonnerie.

CHAPITRE I
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

Dans ce chapitre, la problématique de choix de construction, dans le cadre d'une crise environnementale du point de vu du secteur de bâtiment a été mise en exergue, notamment la maçonnerie en céramique. Nous explorons ensuite le domaine de l'industrie de la céramique en Algérie, où les méthodes de production et le processus de stabilisation ont également été analysés. La synthèse des recherches précédentes sur l'emploi de briques stabilisées dans le secteur de la construction, notamment en maçonnerie, a été effectuée.

1. PRÉAMBULE

Ce travail de thèse, est initié par un chapitre bibliographique en examinant la problématique du choix et l'emploi de matériaux de construction dans un contexte de crise environnementale, en mettant l'accent sur l'influence du secteur de la maçonnerie en céramique sur la pollution terrestre et la consommation des ressources naturelles. Un enjeu majeur qui a suscité de nombreuses études, notamment les mesures prises à l'échelle mondiale et en Algérie, ainsi que la politique environnementale mise en œuvre pour une gestion plus efficace de cette crise. La notion de matériaux écologiques a été mise en avant, en se basant sur des initiatives nationales et internationales visant à intégrer un système de production et de consommation durable. Des mesures qui ont des répercussions cruciales sur le choix des matériaux et la gestion de la consommation. Chose qui favorise un environnement de vie amélioré, qui veille au respect de l'homme et de son environnement. Ensuite, nous étudions le domaine de l'industrie de la céramique en Algérie, dans un cadre d'application des principes du développement durable. Nous avons également étudié les méthodes de production et le processus de stabilisation, en prenant en considération l'impact de la valorisation des déchets industriels, sur les caractéristiques physiques et mécaniques des briques cuites, sur la durabilité et sur l'environnement. Vers la fin, une synthèse des recherches précédentes sur l'emploi de briques stabilisées dans le secteur de la construction, a été effectuée.

**2. PROBLEMATIQUE DES DECHETS INDUSTRIELS ET POLITIQUE
ENVIRONNEMENTALE A L'ECHELLE MONDIALE ET NATIONAL**

La production industrielle est connue pour générer chaque année de grandes quantités de déchets. En posant un problème excessif avec des conséquences environnementales graves à l'échelle mondiale. En créant une crise démesurée qui a des répercussions environnementales graves à l'échelle mondiale. Uniquement la quantité de déchets inorganiques (produits par les activités de construction, de démolition et d'exploitation minière et de carrière) est estimée à plus de 1,5 milliard de tonnes en Europe. Il est bien reconnu que la production de déchets ne peut être arrêtée, mais il est indéniable qu'il est envisageable de les recycler ou de les réutiliser de manière responsable afin de diminuer ces effets néfastes. Que ce soit des débris solides, gazeux ou liquides, le défi réside dans leur capacité à renfermer des substances toxiques,

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

mettant ainsi en péril la sécurité de la santé des individus et de l'environnement (Andreola & al, 2016).

Du point de vue judiciaire, les 17 objectifs de développement durable de l'ONU ont mis en évidence l'importance d'intégrer ces déchets dans différents domaines, notamment dans la construction de routes, de briques, de ponts, de trottoirs, de blocs, de tuiles, de béton, etc.(Kumar & al, 2022). En fait, lors des vingt dernières années, des technologies environnementales ont été mises en place, principalement en raison d'une prise de conscience écologique qui demande une gestion efficace des ressources écologiques de la planète. Ou le WBCSD (World Business Council for Sustainable Development), une organisation internationale dirigée par des responsables de haut niveau de plus de 200 grandes entreprises, collaborent pour accélérer la transition vers un système d'activité durable et respectueux de l'environnement et développer des solutions écologiques efficaces pour les grandes communautés humaines, ce qui impliquera l'utilisation de technologies intégrées dans le domaine de l'éco-industrie. Encore, une approche commune de l'OCDE et d'Eurostat a été utilisée pour définir l'éco-industrie comme étant les secteurs où la production de biens et la fourniture de services sont effectuées dans le but de mesurer, prévenir, limiter, minimiser ou corriger les dommages environnementaux, ainsi que les problèmes liés aux déchets, au bruit et à la préservation des écosystèmes (Kaczmarczyk, 2021). L'équilibre écologique est, dans ce sens, un système de relations entre les besoins de la société et de l'économie et l'environnement, qui permet de réaliser les objectifs fixés, sans entraîner de modifications de l'environnement qui compromettraient la durabilité de la réalisation de ces objectifs (Dobrzański, 1999). Le concept d'économie verte élaboré par l'OCDE, dont l'aspect pratique est l'éco-industrie, est associé à des types de produits et de services liés aux activités environnementales, aux investissements, aux secteurs économiques, aux marchés publics et aux emplois (Szyja, 2015). Selon (Hapazari & al, 2015), la gestion des déchets est devenue une préoccupation majeure dans les pays en développement, et seules des approches innovantes et économiques peuvent apporter une solution durables. Le secteur éco-industrie s'est développé à partir de la catégorie de l'éco-innovation, c'est-à-dire la production d'unités technologiques destinées à la protection ou à l'amélioration de l'environnement, qui deviennent des produits et dépendent des lois du marché. Les principales industries sont chargées de l'activité de préservation de l'environnement, allant des services technologiquement avancés, comme les énergies renouvelables et la lutte contre la pollution de l'air, aux applications matures et bien établies dans le recyclage et le traitement des déchets (Araszkiewicz, 2012). Selon (Kaczmarczyk, 2021) l'éco-industrie devient un élément clé qui permet de délivrer le développement économique de ses conséquences néfastes sur l'environnement.

Quant à l'Algérie, elle est confrontée à des problèmes sérieux de pollution industrielle. Jusqu'à récemment, l'industrialisation s'est déroulée sans tenir compte des mesures environnementales indispensables. Les eaux industrielles non traitées, les émissions de gaz et la production de déchets dangereux, dont la gestion n'a pas encore été résolue, sont des problèmes environnementaux majeurs. Aujourd'hui, la quantité de déchets solides industriels produites en Algérie dépasse les 1 240 000 tonnes par an, dont 40 % sont perçus comme toxiques et dangereux (Figure 1.1) (Bouabdesselam & al, 2005). Le stockage des déchets sur les lieux de

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

production est effectuée sans respecter les normes et les règles environnementales nationales ou internationales (Bouabdesselam & al, 2005).

En réponse à cette situation, les autorités locales ont mis en œuvre des mesures pour encourager l'utilisation du recyclage et de la valorisation des déchets, tout en sensibilisant les entreprises à l'importance de réduire leur empreinte écologique. Les objectifs environnementaux doivent inclure la réduction de la production de déchets et la mise en œuvre d'une gestion intégrée, tant au niveau institutionnel que financier. Les cadres juridiques, institutionnels et de gestion des déchets et de l'environnement doivent être améliorés pour permettre la réutilisation des eaux résiduelles industrielles lors du processus de production. De plus, il est essentiel de faciliter l'utilisation des matières premières dans l'industrie, de réduire la production de déchets toxiques et dangereux en réduisant les flux et de valoriser les déchets en les valorisant en tant que matière première dans d'autres processus de production (Bouabdesselam & al, 2005; Djemaci, 2012).

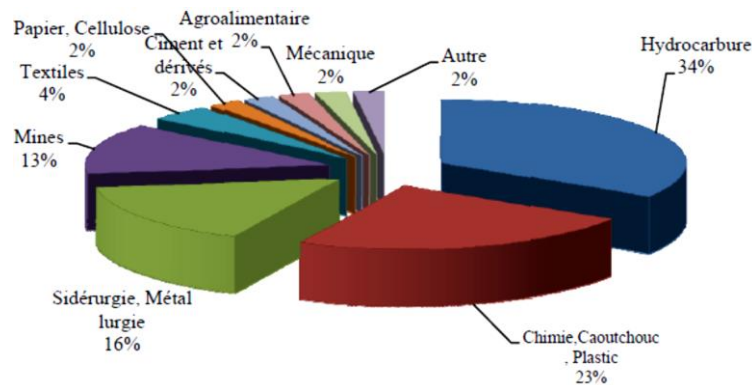


Figure 1 1: Production de déchets par grands secteurs d'activité industrielle en Algérie (Djemaci, 2012).

En point de vue politique, le cadre législatif demeure insuffisant. Bien que l'Algérie ait élaboré une loi cadre pour l'environnement (5 février 1983), son application a été retardée en raison de procédures excessives et d'insuffisances dans sa conception. La création en 2000 du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (MATE) a ouvert de nouvelles opportunités. Le conseil des ministres a adopté un Rapport national sur l'état et l'avenir de l'environnement et du développement durable (RNE 2000). Une stratégie nationale de l'environnement (SNE) et un plan national d'actions pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD) ont été élaborés, mettant en place une approche de dix ans. Un plan d'action prioritaire de trois ans a été élaboré. Dans le contexte du plan triennal de relance économique (2001-2004), le gouvernement a fait des investissements environnementaux considérables. En janvier 2009, le décret exécutif n° 09-19 a été promulgué pour l'organisation de la collecte des déchets spéciaux. Il définit les conditions d'autorisation des personnes souhaitant exercer cette activité, ainsi que leurs droits, obligations et compétence de contrôle (Djemaci, 2012). De plus, des objectifs sont fixés pour le projet 2025, dans le cadre de la gestion environnementale du pays, en promouvant le recyclage des déchets et en luttant contre les décharges sauvages. Malgré tout cela, une enquête réalisée en 2004 met en évidence une faible part des quantités à valoriser, avec seulement 2 % de recyclage et 1 % de compostage (Figure 1,2) Malgré l'ambition de cette approche, l'enquête réalisée en 2004 met en évidence une faible part des quantités à exploiter, avec seulement 2 % de recyclage et 1 % de compostage (Figure

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

1,2) (Djemaci, 2012). Étant donné que les autorités locales manifestent une volonté claire de résoudre le problème de la gestion des déchets solides en construisant la déchetterie industrielle de la ville de Blida. La déchetterie a pour but de mettre en valeur les déchets industriels solides. Il s'agit de matériaux de construction, de mécanique, de construction métallique, d'électricité et d'électronique, d'agroalimentaire, de plastiques, de textile, de verre, de cosmétiques, de papier et de carton, de bois et de menuiserie. Il est prévu que la quantité de déchets industriels de la zone industrielle de Blida double dans les dix prochaines années (actuellement 70 tonnes par jour). Un autre exemple concerne la construction d'un centre d'enfouissement technique pour le groupe de la ville d'Oran, qui a pour objectif de traiter environ 200 000 tonnes de déchets solides par an. Le laboratoire universitaire de recherche en technologie de l'environnement de l'École normale supérieure d'enseignement technique d'Oran a été chargé de l'expertise de cette étude par les autorités d'Oran (Bouabdesselam & al, 2005; Décret n°06-104, 2006).

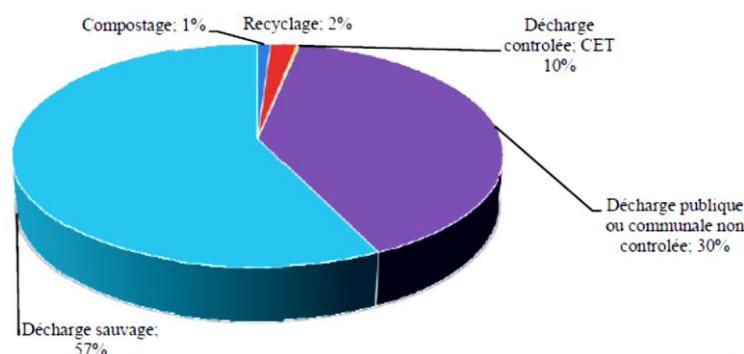


Figure 1 2: Mode d'élimination des déchets en Algérie (MAT, 2004) (Djemaci, 2012).

Plusieurs études de recherche, tant antérieures qu'actuelles, continuent de mettre en évidence la possibilité de transformer les déchets en matières premières pour des produits et des processus bien définis. Ce chapitre préliminaire porte sur l'analyse de la gestion des déchets en Algérie, en mettant l'accent sur les déchets industriels, ainsi que sur les résultats des recherches sur l'intégration des déchets dans la production de briques d'argile cuite (Hapazari & al, 2015).

2.1.L'environnementale associée à l'industrie, résorbée par le secteur de la construction

En premier lieu, comme nous l'avons mentionné préalablement, que même si les progrès technologiques et industriels ont eu un effet très positif sur tous les aspects de la vie humaine. Toutefois, ces progrès ont également des répercussions néfastes comme des niveaux élevés de production de déchets à l'échelle mondiale. Des milliards de tonnes de déchets solides sont générés chaque année, dont la majorité est mal traitée, jetés ou brûlés, ce qui cause des dommages à l'environnement, au climat et aux ressources naturelles, et perturbe l'équilibre écologique (Kumar & al, 2022).

D'autre part, l'emploi de ressources naturelles non durables comme la terre et le sable dans la production de matériaux de construction remet en question l'équilibre écologique. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a évoqué les conséquences néfastes à l'échelle mondiale et la nécessité de restreindre leur utilisation. Les études ont examiné les risques potentiels et les actions à entreprendre pour faire face aux problèmes associés à l'industrie de la brique (Akhtar & al, 2022). D'après (Chanda, 2016), les briques sont considérées comme l'un des principaux facteurs de dégradation de la couche arable et de

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLÉMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

détérioration de l'environnement. Elles font partie des matériaux de construction les plus employés et qui ne sont pas respectueux de l'environnement en raison de leur consommation d'énergie et de l'utilisation de différentes ressources naturelles. L'utilisation de l'argile comme matière première naturelle pour la fabrication de briques d'argile entraîne un épuisement du sol fertile des terres agricoles, une diminution de la biodiversité du sol et une diminution des caractéristiques et des fonctions du sol. En outre, l'exploitation de granulats naturels fins constitue une forte menace pour notre écosystème (Das & al, 2020; Akhtar & al, 2022; Singh & al, 2023). Il est donc essentiel de faire preuve de la plus grande vigilance possible dans l'utilisation des ressources naturelles afin de respecter les exigences du principe de développement durable, un concept qui a récemment été soutenu par le monde entier.

Dans le but de répondre à ces deux problématiques, de nombreux chercheurs ont étudié la possibilité d'exploiter les déchets dans le domaine du bâtiment, où de nombreux types de déchets peuvent être utilisés en grande quantité (Andreola & al, 2016; Das & al, 2020; Sorout & al, 2023). Étant donné, les secteurs industriels et technologiques sont divers, il existe différents types de déchets solides : déchets organique, déchets industriels, déchets miniers, déchets de construction et de démolition (Lu & al, 2017). Il est envisageable de diminuer l'empreinte environnementale en produisant des briques en céramique à partir de déchets industriels biodégradables (Andreola & al, 2016; Das & al, 2020). Une gestion efficace dans ce secteur peut résoudre divers problèmes majeurs tels que l'utilisation des déchets sans impact environnemental, l'amélioration de la qualité et de l'expansion des produits céramiques en utilisant des déchets locaux, et la création de nouvelles entreprises de céramique en prenant en compte les caractéristiques des sources locales de matières premières d'argile et de déchets, ce qui pourrait engendrer des avantages économiques et réduire la pollution de l'environnement. (Boltakova & la, 2017). En termes techniques, les résultats d'une analyse approfondie sur la diversité des déchets utilisés dans les briques et sur leur influence sur le comportement de résistance, l'absorption d'eau, la porosité, la conductivité thermique, etc, laissent entendre que la valorisation des déchets dans le secteur de la construction peut encourager la création de matériaux de construction respectueux de l'environnement. D'autres études et développements sont nécessaires pour la production et l'utilisation à grande échelle de briques à base de déchets. Des mesures de normalisation, de politique gouvernementale et de sensibilisation du public sont nécessaires pour améliorer l'intégration optimale des déchets dans les matériaux de construction, afin d'améliorer l'acceptation du marché de ces produits (Sorout & al, 2023).

Les déchets sont donc utilisés pour produire des matériaux de construction durables, ce qui permet de réduire ma consommation des ressources naturelles et énergétique (Madurwar & al, 2013). Dans cette étude, nous étudions une alternative envisageable pour la gestion des déchets à grande échelle, dans le but de proposer une solution durable dans le domaine du bâtiment. Nous examinons l'utilisation potentielle des déchets comme ingrédient pour des matériaux de construction durables innovants. En fonction de la disponibilité des déchets, les matériaux de construction durables sont évalués en fonction de leurs spécificités physico-mécaniques, de leurs techniques de production et de leur impact sur l'environnement.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

2.2. Le concept de développement durable et l'économie circulaire dans le domaine des matériaux de construction

Il s'est avéré que le secteur des briques cuites est un secteur énergivore qui consomme de la terre végétale fertile comme matière première. Mais grâce aux avancées technologiques, la production de briques cuites est plus économe en énergie et une partie de la matière première est remplacée par des déchets, ce qui permet de réduire la consommation de terre argileuse (Shakir & al, 2013; Singh & al, 2022). Ainsi, l'exploitation des déchets en tant que ressource secondaire représente une étape vers le développement durable et l'économie circulaire, ce qui peut restreindre l'exploitation excessive des ressources vierges tout en résolvant les problèmes environnementaux associés aux déchets (Kirchherr & al, 2017; Geissdoerfer & al, 2017; Prieto-Sandoval & al, 2018). Il a été prouvé dans la littérature que l'ajout de déchets organiques dans les briques cuites offre de nombreux bénéfices tant sur le plan comportemental que sur le plan environnemental (Monteiro & al, 2014; Han, 2014). Selon (Singh & al, 2020), d'autres études ont choisi de remplacer les matières premières par des produits dérivés de déchets hérités stockés dans les décharges de déchets solides municipales. Ces produits comprennent des plastiques, du bois, des textiles, des métaux, du verre, des pierres et d'autres matériaux qui peuvent être considérés comme des ressources secondaires. Étant donné qu'une grande partie des déchets enfouis est constituée de matériaux similaires au sol, tels que des matières organiques dégradées, de la terre, de la saleté, des matières ligneuses et d'autres matières inertes variées. Leur rôle est crucial dans les déchets enfouis et ils représentent entre 40 et 80 % des matériaux enfouis, en fonction du diamètre de coupure (Parrodi & al, 2018). De plus, la difficulté d'exploiter les métaux lourds, les microplastiques et les polluants organiques, qui sont des substances polluantes, et la réussite de leur réintégration dans le cycle des matériaux humains, contribuent à atteindre les objectifs d'économie circulaire et de développement durable pour les pays en développement. Chose qui encouragera la diminution des déchets et la réponse à la demande croissante de matériaux de construction, tout en réduisant l'utilisation excessive de ressources vierges telles que l'argile (Singh & al, 2020) et il a été prouvé que le processus de cuisson a un effet bénéfique sur l'immobilisation des métaux lourds. Ainsi, il est envisageable d'intégrer ce procédé comme un substitut durable dans la production de briques cuites afin de réduire la demande d'argile. (Ukwatta & al, 2017; Singh & al, 2022).

2.2.1. Le système d'économie circulaire

L'économie circulaire est définie comme un système économique qui remplace le concept de "fin de vie" en encourageant la réduction, la réutilisation alternative, le recyclage et la récupération des matériaux lors des processus de production de distribution et de vente (Kirchherr & al, 2017). En agissant au niveau de produits, des entreprises, de l'éco-industrie et sur la nation et au-delà, afin de promouvoir un développement durable, en établissant à la fois une qualité environnementale, une prospérité économique et une équité sociale, au bénéfice des générations actuelles et postérieures. La mise en place de nouveaux modèles commerciaux et

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLÉMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

des consommateurs responsables rendent cela possible (Kirchherr & al, 2017; Geissdoerfer & al, 2017; Prieto-Sandoval & al, 2018).

2.2.2. La production durable des matériaux de construction

En vue d'améliorer les niveaux de production durables, il est donc nécessaire de limiter l'utilisation des ressources géologiques primaires, tout en améliorant la gestion et l'élimination des déchets en réévaluant les ressources secondaires en matériaux résiduels à utiliser dans la production de nouveaux matériaux. Dans la production de briques, l'intégration de déchets peut apporter une solution durable à la question de l'élimination de quantités importantes de substances issues de diverses activités industrielles, qui représentent désormais des dangers pour l'environnement à l'échelle mondiale (Ouendi, 2023). Les industriels et les universitaires sont penchés sur la production des nouvelles briques respectueuses de l'environnement en raison de la nécessité d'éliminer ces déchets et de la demande grandissante de créer des alternatives durables aux matériaux de construction classiques (Bortali & al, 2023; Ouendi & al, 2023).

En Algérie, des mesures sont également mises en œuvre par les autorités pour promouvoir une construction plus durable et respectueuse de l'environnement. Ceci comprend la mise en place de normes de construction respectueuses de l'environnement, la mise au point de techniques de recyclage des déchets de construction et la sensibilisation des acteurs du secteur aux enjeux environnementaux. Ainsi, il est essentiel que les experts des domaines de la construction en Algérie s'investissent pleinement dans une approche de développement durable, en favorisant l'utilisation de matériaux recyclés afin de diminuer l'utilisation de l'énergie et de l'eau, réduire les émissions de CO₂ et préserver les ressources naturelles non renouvelables (Bouabdesselam & al, 2005). En luttant ensemble, il sera envisageable de parvenir à une préservation de l'environnement et la création d'un avenir plus durable.

2.2.3. L'approche analyse de cycle de vie « ACV » et l'amélioration des méthodes de construction

A l'instar des différents paliers économiques, le domaine du bâtiment joue un rôle essentiel dans les principales sources de pollution environnementale. En particulier, l'industrie des matériaux de construction a un impact significatif sur la planète. Une stratégie mondiale et même nationale a été mise en œuvre afin de minimiser ces conséquences sur l'environnement, en encourageant une production bio-sourcée locale et recyclable. En effet, le modèle industriel classique implique la consommation de matières premières, la production de matériaux et d'articles commerciaux, ainsi que le stockage de déchets et la détérioration de notre environnement. Cette méthode simpliste doit être remplacée par un modèle plus intégré, qui est un écosystème industrialisé, incluant la gestion de la pollution en utilisant divers dispositifs techniques qui interviennent habituellement à la fin du processus (Erkman, 2004).

L'amélioration des techniques de construction repose sur le principe de l'analyse de cycle de vie (ACV). Les pratiques économiques ancestrales de recyclage et de réutilisation des matériaux en fin de vie ont pour objectif de diminuer les déchets et d'optimiser la consommation des

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

ressources naturelles non renouvelables. La recherche de matériaux bio-sources encourage également l'innovation et le développement de nouvelles technologies durables. L'ACV est un procédé standardisé (série ISO 14040) qui permet d'évaluer l'empreinte écologique d'un produit ou d'un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets, en prenant en compte le produit en fin de vie. L'analyse se fait à partir de divers critères permettant d'évaluer les ressources naturelles, les sources d'énergie utilisées et les déchets produits (solides, liquides, gazeux). En fin, grâce aux écotecnologies, l'ingénierie des écosystèmes peut servir à combattre et à prévenir la pollution. Il est crucial pour cette discipline de maîtriser le potentiel de la nature à s'organiser à travers des liens durables, car cela permet de repérer les services écologiques rendus et de faciliter leur préservation. Afin de concevoir et mettre en œuvre des écotecnologies, il est essentiel de faire appel des experts qualifiés (Vendette, 2008).

2.3. Le choix de matériaux et les certifications environnementales

En pleine crise environnementale, le choix des matériaux locaux, sains et respectueux de l'environnement, contribuent à réduire l'impact environnemental du secteur des constructions. Des défis d'une telle ampleur se posent aux pays développés, ainsi qu'en Algérie, avec l'émergence d'une nouvelle politique (Han, 2014).

De fait, les pays développés et surpeuplés ont mis en place des règles strictes pour réduire l'empreinte écologique de l'industrie des matériaux de construction. Cela comprend des critères de construction écologique, des bénéfices financiers pour favoriser l'utilisation de matériaux recyclés et des mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il encourage également la recherche et l'innovation dans le domaine des matériaux de construction écologiques (Singh & al, 2022).

Dans le contexte d'une crise environnementale, les critères essentiels à considérer lors de la sélection de matériaux sont les certifications écologiques utilisées dans l'évaluation. Il est important de noter que, selon divers codes de normes internationaux, les briques sont définies et classées de manière distincte en fonction de l'importance des structures et de la gravité des conditions milieux. La normalisation des briques nécessite donc une analyse approfondie de la composition et des caractéristiques des briques, ainsi que de divers éléments liés à leur processus de fabrication (Murmu, 2018). Il convient de souligner que les certifications reconnues telles que l'éco label européen, BREEAM, HQE, NF Environnement et Cradle to Cradle permettent de sélectionner les matériaux de construction les plus respectueux de l'environnement et les plus sains. Une décision qui dépend du contexte et des objectifs du projet. Voici les certifications les plus écologiques pour les matériaux de construction en termes d'écologie, selon, (Pillard & al, 2018) :

- L'Eco-label européen est un label officiel de l'Union Européenne qui identifie les produits et services les plus respectueux de l'environnement. Il étudie les impacts environnementaux des matériaux de construction pendant toute leur durée de vie. De la

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLÉMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

production de la matière première à sa fin de vie, en passant par son utilisation et sa distribution (Rabetafika & al, 2006).

- Le BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) est une méthode spécialement conçue pour évaluer et certifier l'environnement des bâtiments, inventée au Royaume-Uni. Elle comprend 10 catégories, incluant les matériaux, en étudiant des critères tels que le recyclage, la durabilité et l'impact environnemental des produits utilisés (Crawley & al, 1999; Pillard & al, 2018).
- Le HQE (Haute Qualité Environnementale) est une initiative française qui a pour objectif de diminuer les impacts environnementaux des constructions. Bien qu'il n'y ait pas de certification directe des matériaux. Elle accorde une grande importance à l'utilisation de matériaux de construction à faible impact, sains et durable (Maupetit, 2008).
- NF Environnemental : Le label NF Environnemental est une certification française qui évalue les impacts environnementaux des matériaux de construction pendant leur durée de vie. Créé en se basant sur l'étude de la vie du matériau. Elle a pour but d'assurer des produits à faible impact environnemental (Dekhili & al, 2013).
- Cradle to Cradle : elle implique la certification des produits en respectant le principe économique circulaire, qui repose sur le réemploi, le recyclage et l'utilisation de matériaux sains. Qui s'applique notamment aux matériaux de construction (Laveglia & al, 2024).

2.4.Mobilisation à l'échelle nationale

Notons que la production de matériaux bio-sources contribue à l'agenda des Nations Unies. Utilisée dans une démarche de sélection des matériaux renouvelables, recyclables et surtout durables, dans le but de diminuer l'impact sur l'environnement et de diminuer la dépendance aux ressources fossiles (Khargonekar & al, 2024). On vous présente un résumé succinct de la mobilisation nationale en faveur de la problématique environnementale liée aux matériaux de construction :

Au niveau national, l'Algérie a développé des projets visant à réhabiliter et à préserver le patrimoine immobilier, comme les éco-quartiers Diar el Djenane à Alger (Ecoquartier diar-el-djenane), Malek Hassen à Tizi Ouzou (Allache, 2022) et El Riad à Oran (Groupe-hasnaoui). Au fur et à mesure que les rénovations durables commencent à utiliser des matériaux respectueux de l'environnement, des principes édictés par des certifications environnementales comme l'éco-label Européen, BREEAM, HQE et NF Environnement ont été instaurés pour sélectionner le matériau le plus respectueux de l'environnement (Tedjani, 2021).

Par ailleurs, les projets de l'éco-réhabilitation en Algérie, ont été confrontés à des difficultés techniques telles que les imprévus des structures existantes, ce qui a grandement contribué à l'intégration des nouveaux systèmes techniques et à la coordination entre les différentes disciplines. Dès lors, il est possible de conclure que cette mobilisation à l'échelle mondiale et nationale demeure essentielle pour faire face à ce défi environnemental, en tirant parti de l'innovation dans le secteur de la construction pour produire des matériaux durables, une

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

dynamique à laquelle l'Algérie participe malgré les difficultés rencontrées (Rahmani, 2002; Arrache, 2015).

3. DES GENERALITES SUR LES BRIQUES CUITES

3.1. Le développement de l'industrie des briques cuites à travers l'histoire

Les briques de terre cuite pleine sont un matériau de construction indispensable et l'un des plus anciens au monde. Le mot « céramique » est un mot grec qui signifie « terre cuite » et qui désigne les matériaux utilisés dans la poterie. Elles ont depuis longtemps joué un rôle crucial dans le secteur de la construction en raison de leurs qualités exceptionnelles, comme la grande résistance, un coût faible et une bonne durabilité, etc (Raut, 2011).

Historiquement, la première brique humaine a été trouvée en Égypte vers 10 000 avant J.-C (Raut, 2011). Les premières traces de la transformation de l'argile datent de 1900 av. J.-C et sont retrouvées au Japon, avant d'être utilisée dans les années 4000 av. J.-C. pour la construction de temples, de palais et de forts. Étant donné que la briqueterie a été inventée par les Romains il y a plus de deux mille ans dans de vastes territoires européens, à l'exception de l'Égypte, où les plaques céramiques émaillées étaient utilisées comme ornements murales pour les pyramides (MB/FS/EIPPCB/CER, 2007). D'autres chercheurs comme (Bories & al, 2014), témoignent que les briques ont été reconnues depuis 3000 avant JC comme un produit intéressant, solide, facile à fabriquer et à utiliser. Ils permettaient aux hommes de se protéger de manière efficace contre divers éléments tels que la pluie, le vent et les prédateurs, en leur permettant ainsi la construction de bâtiments plus grands. Quant à (Madurwar & al, 2013), confirment que la connaissance de la conservation des briques en terre cuite par cuisson est attestée dès 5000 avant J.-C., et il existe des documents sur l'utilisation du feu pour fabriquer des briques d'argile pour obtenir des performances améliorées. Selon, (Lynch, 1994; Kadir & al, 2011) l'évolution des briques cuites a été influencée par les échantillons archéologiques trouvés dans les premières civilisations, comme l'Euphrate, le Tigre et l'Indus, qui utilisaient à la fois des briques cuites et non cuites. Les premiers à utiliser les briques cuites sont les Romains, qui les ont introduites et utilisées en Angleterre. Cependant, le métier de briquetier a disparu avec le départ des Romains de Grande-Bretagne en 412 ap. J.-C et n'a été repris que plus tard par les briquetiers flamands. De nouveaux types de briques ont été inventés dans la plupart des pays du monde et les briques ont été ajoutées à la cargaison de la première flotte en direction de l'Australie, avec des moules à briques et un fabricant de briques de bonne qualité. La plupart des cultures ont utilisé les briques à travers les âges en raison de leurs caractéristiques physiques et techniques remarquables. Au fil des siècles, les briques ont connu un développement croissant dans la plupart des pays, et notamment au début de l'industrialisation en 1830, avec l'invention d'une presse à briques par Auguste Virebent (Brongniart, 1844). Depuis lors, l'industrie de la brique s'est considérablement développée et a connu des avancées, notamment grâce à l'utilisation de machines modernes, comme des équipements d'excavation puissants, des moteurs, des fours tunnels, etc. Ces derniers ont considérablement amélioré la capacité de production de briques. En 2015, la quantité mondiale de briques cuites produites était estimée à 1 500 milliards d'unités par an (Madurwar & al, 2013).

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

Compte tenu de cette évolution, les briques sont couramment employées dans la construction de bâtiments en raison de leurs caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques attrayantes (Kadir, 2012). C'est un produit abordable conçu à partir de matières premières à faible coût et abondantes (argile, sable) et qui est produit selon un procédé de fabrication simple (séchage, cuisson). Toutefois, l'introduction du béton à haute performance (BHP) dans les années 1980 a provoqué une diminution de l'utilisation de la brique. La part de marché a presque totalement diminué. Le chiffre d'affaires annuel de l'industrie française des matériaux de construction en 2001 était de 2 % pour les briques, tandis que le béton était le leader du marché avec environ 70 % des ventes (SESSI et Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, 2003) (Dhanapandian & al, 2010). Étant donné que les briques traditionnelles sont confrontées à des défis technologiques en raison de leur faible capacité d'isolation thermique et de leur poids élevé, il est essentiel de créer un matériau novateur qui présente des performances améliorées (thermiques et mécaniques). Pour y parvenir, il était envisageable de rajouter des particules dans le mélange d'argile, entraînant des vides lors de la cuisson et modifierait ainsi positivement les caractéristiques de la brique. Il convient de souligner que les civilisations ont tendance à mélanger au fil du temps les terres argileuses avec des additifs afin d'obtenir des briques cuites de haute qualité. Cependant, il y a peu de temps, la nouvelle approche a été mise en place, avec l'emploi des briques comme moyens d'élimination des déchets industriels et agricoles en complément des additifs. La réutilisation de déchets, plutôt que de les jeter ou de les brûler, pourrait être une solution, tout en améliorant les caractéristiques thermiques et mécaniques des briques. En outre, étant donné la popularité croissante, il serait avisé de développer un matériau respectueux de l'environnement tout en préservant les performances requises. La mise en place de cette approche aura des effets positifs sur le domaine de la construction et pour la préservation du patrimoine architectural à l'avenir. (Tite, 2001; Saenz. & al, 2019) Confirment que, grâce à l'utilisation d'additifs, la technologie d'amélioration des caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux archéologiques et de la poterie ethnographique a été rapidement mise au point. Selon (Bories & al, 2014) la production de briques entraîne une importante quantité de déchets, ce qui peut mettre en péril les paysages et entraîner une consommation d'énergie lors de la combustion, ce qui peut entraîner des émissions de gaz à effet de serre (Ahmari & al, 2012). Raison pour laquelle ils s'intéressent de plus en plus à une refonte de la production de briques plus respectueuse de l'environnement (Coletti & al, 2016) et grâce aux avancées technologiques, les méthodes classiques sont mises à jour afin d'optimiser l'efficacité énergétique de la fabrication de briques cuites et substituer une partie de la matière première utilisée dans les briques cuites par des déchets ou des produits dérivés de déchets en diminuant la consommation de terre végétale/argile (Singh & al, 2022).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

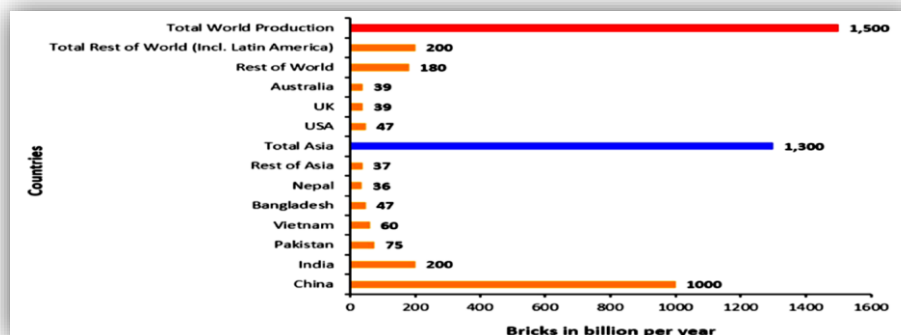


Figure 1 3: Production mondiale de briques publiée par la Banque mondiale rapport (Akhtar & al, 2022).

3.2. Les éléments constitutifs des briques cuites

3.2.1. Les terres argileuses

Dans la nature, les sols se présentent sous forme de squelette solide composé de grains minéraux, d'une phase aqueuse et d'une phase gazeuse (Figure 1.4). Leurs comportements dépendent de leurs compositions, les propriétés géométriques des grains et les caractéristiques physico-chimiques des fluides (Blanck, 2013) La structure des grains solides, peu liés, présente les matériaux granulaires (sable) et lorsqu'ils sont très liés, il s'agit des matériaux cohérents (argiles). Toutefois, ces liens sont fortement modifiés par les variations de l'eau adsorbée, voire détruites par excès pour les argile (Géologues, 2002). Cette composition peut varier également d'un prélèvement à l'autre. Les terres sont également constituées, du plus grand au plus petit, de cailloux, de graviers, de sables et de silts. Ils ne se différencient que par l'échelle, mais pas par la forme. La seule distinction réside dans la structure de l'argile. La classification proposée par la Norme ARS 670 (« 1996 – BTC, norme de terminologie ») est illustrée dans la (Figure 1.5) (Delot, 2015). Étant donné, la diversité des minéraux présents dans les sols, les minéraux les plus courants sont issus de la famille des silicates, des carbonates et des oxydes. Quant aux tectosilicates (quartz, feldspaths, etc.) et aux carbonates (calcite, dolomite, etc.), elles se caractérisent par leur insolubilité et leur insensibilité aux conditions physico-chimiques des fluides. Contrairement aux phyllosilicates comme les micas, les smectites et les kaolinites, leur structure en feuillets et leur composition chimique sont plus sensibles aux conditions environnementales et peuvent être changées en cas de modification de ces conditions (Palomino, 2005). D'après (Di Maio & al, 2004), ces transformations peuvent provoquer des mutations dans le fonctionnement mécanique de la terre. Il est donc essentiel de décrire la nature et la composition des minéraux argileux pour mieux appréhender le fonctionnement hydromécanique des sols.

Les argiles employées dans le domaine de la céramique sont présentes dans toutes les formations géologiques. La couche supérieure du quaternaire se compose principalement d'une argile siliceuse et d'un calcaire peu plastic. La décalcification de la couche supérieure du loess donne lieu à une argile très siliceuse, peu plastique, presque sans calcaire, appelée lehm. Toutefois, les sols qui nous intéressent sont des sols argileux qui présentent certaines

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

caractéristiques (rétention, plasticité, gonflement, retrait, durcissement à la cuisson...) (Mbuyi & al, 2012).

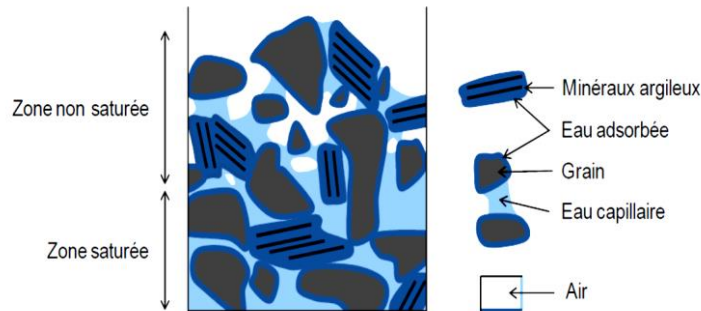


Figure 1 4: Constituants d'un sol, (Blanck, 2013).

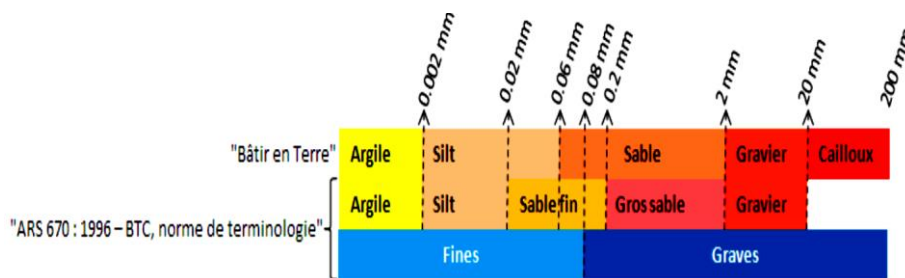


Figure 1 5: La classification de terre selon la quantité de composantes, (Delot, 2015).

3.2.2. Les argiles

Les briques de terre cuite sont principalement fabriquées en utilisant des terres argileuses d'une part, et des éléments dégraissants tels que le sable ou d'autres, d'autre part (Khitab & al, 2021). Quant aux argiles, elles sont la matière première des briques cuites et sont les plus appréciées pour leurs qualités céramiques. Il s'agit de roches sédimentaires dérivées de roche mère, transportées et déposées sous forme de sédiments (Lynch, 1994). Elles présentent une grande similitude chimique avec les roches d'origine et sont souvent impures en raison de leur processus de création. L'une de ces impuretés influence principalement leur composition lors de la cuisson (Dukuzg, 1990). Elles sont extraites de mines à ciel ouvert, dont une composition très variable qui dépend de la localité d'implantation du sol (Kadir, 2012).

D'après, (Mishra & al, 2021), elle est issue des dépôts alluviaux ou hydriques, des particules rocheuses qui entraînent la combustion des argiles, sources de défrancisation de couleurs et de l'apparence des briques cuite. Les éléments essentiels sont des silicates d'aluminium hydratés à granulométrie très fine (< 2 μ m), comprenant 20 à 30 % d'alumine et 50 à 60 % de silice, ainsi que de la chaux (1 à 5 %), du fer d'oxyde (5 à 6 %), du manganèse, du soufre et du phosphate en petites quantités (Riaz & al, 2020). Leurs caractéristiques principales qui les rendent très prisés sont leur aptitude à développer de la plasticité lorsqu'ils sont mélangés à de l'eau, ainsi que leur capacité à se solidifier sous l'effet des températures élevées en diminuant la quantité d'eau (Carretero & al, 2002; Elert & al, 2003). Généralement, les méthodes de fabrication sont

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLÉMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

influencées par la nature physique des matières premières. Il s'agit principalement de tamiser, de broyer, de laver et de travailler l'argile jusqu'à ce qu'elle soit à la bonne consistance pour le moulage en briques, que ce soit manuellement ou mécaniquement. (Kadir & al, 2011)

Selon (Yadav, 2019), étant donné que les minéraux argileux jouent un rôle essentiel dans la plasticité, le feldspath joue le rôle d'un fondant pour réduire le point de fusion, tandis que le quartz joue le rôle de remplisseur d'espace entre les briques. La plasticité, également connue sous le nom de « cohésion », résulte principalement de la capacité des minéraux argileux à pénétrer les molécules d'eau. La smectite, l'illite, la kaolinite et le chlorite sont les minéraux les plus plastiques. Le quartz, les carbonates et les feldspaths, ne présentent aucune plasticité et ils sont connus sous le nom de "dégraissage" (Fabbri, 2012).

Lors de la cuisson, les propriétés minéralogiques, chimiques et physiques des matières premières subissent des conversions. Les températures élevées, allant de 450 °C à 800 °C, brisent la structure cristalline de l'argile et créent de nouvelles substances amorphes pouzzolaniques telles que le métakaolin, qui varie en fonction du type de minéral argileux. Au-delà de 800 °C, les activités pouzzolaniques s'arrêtent pour laisser place à une nouvelle phase minérale qui se forme à haute température comme la mullite et la cristobalite (Mishra & al, 2021). En outre, la décomposition du carbonate de chaux se produit à la même température en libérant de l'anhydride carbonique en suivant la réaction: $\text{CO}_3\text{Ca} = \text{CaO} + \text{CO}_2$ (1). Les autres éléments de l'argile se combinent avec la chaux libérée pour créer des silicates d'alumine complexes, de couleur rose à jaunâtre (Alviset, 1987). De plus, les carbonates, à une température de 800 à 1000 °C, entraînent la formation de pores (Cultrone & al, 2004), tandis que les sels de sodium et de potassium (les alcalis) captent l'humidité en provoquant l'efflorescence (Khitab & al, 2021), et l'oxyde de fer (hématite ou magnétite) donne à la brique une couleur et une résistance (Cultrone & al, 2005). Il convient de souligner que certaines argiles demandent une grande prudence à l'emploi. La maîtrise de ces réactions chimiques permet de prévenir des réactions chimiques néfastes comme le soufflage, qui est souvent provoqué par l'argile-calcaire et qui entraîne la fissuration des corps de briques après cuisson (Alviset, 1987; Hoard & al, 1995). Du point de vue chimique, elles sont quasiment inertes lors des étapes de dissolution en raison de leur composition en silicium. Il est donc essentiel de bien comprendre les éléments constitutifs des argiles et leur fonctionnement afin de sélectionner le déchet approprié et d'obtenir les meilleurs résultats.

3.3. Caractéristiques des principales argiles de terre cuite

3.3.1. Composition chimique des argiles

Il convient de souligner que les argiles utilisées dans l'industrie présentent une grande variété chimique et minéralogique. Elles sont issues de l'illitique ou du kaolino-illitique et le tableau ci-dessous présente les différentes limites entre lesquelles les différents éléments dosés par analyse varient (Alviset, 1987) :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

Tableau 1 1: Composition chimique des argiles italiennes pour les briques (Fabbri, 2012).

Composante	Carbonaté	Non-Carbonaté
(SiO ₂)	45.2 %	71.5
(Al ₂ O ₃)	11.9 %	12.9
(TiO ₂)	0.7 %	0.6
(Fe ₂ O ₃)	5.1%	4.7
(CaO)	14.9%	0.1
(MgO)	0.1 %	1.5
(Na ₂ O)	0.8 %	0.9
(K ₂ O)	2.3 %	1
(MnO)	0.1 %	2
(P ₂ O ₅)	0.1 %	0.1
I.L.	16.3 %	5.1

3.3.2. Classification des argiles « abaque triangulaire de Taylor »

Étant donné la variété des sols, les systèmes de classification ont été créés pour simplifier la détermination de classes de sols ayant un comportement similaire lorsqu'ils sont utilisés comme matériaux de construction (Blanck, 2014). L'analyse des caractéristiques mécaniques d'un sol dans les études géotechniques repose essentiellement sur la taille de ses particules. Les sols sont donc classés par les ingénieurs géotechniciens en fonction de la granulométrie de leurs composants, sans tenir compte de leur composition chimique (Torraca, 2009). De nos jours, on évalue la répartition dimensionnelle des particules en utilisant différentes méthodes et modèles. L'une d'entre elles est présentée dans le schéma d'abaque de Taylor (Figure 1.6) d'une terre composée de particules inférieures à 2 mm (Minke, 2006). Chaque point culminant correspond à 100 % de l'un des trois éléments constitutifs du mélange : l'argile (<2µm), le silt (2 – 50 µm) et le sable (>50 µm). Les échantillons sont placés à différents points du triangle, en se référant aux trois côtés gradués (El Fgaier, 2013) :

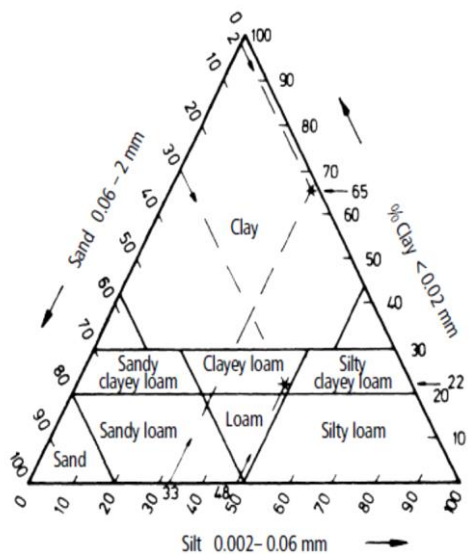


Figure 1 6: Abaque de Taylor (Minke, 2006).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

3.3.3. Classification des minéraux argileux

Les minéraux argileux, sont des silicates divisés en deux groupes distincts. Le premier est caractérisé par une chaîne de minerais fibreux, tels que la sepiolite, tandis que le second est connu par une structure en lamelles appelée phyllosilicates (Dukuzg, 1990). Leur forme en feuillets leur a donné leur nom, inspiré du mot grec phyllos, qui signifie feuilles (Reinholdt, 2001). La famille des phyllosilicates hydratés, sont constitués d'un tétraèdre organisé autour d'un atome de silicium et d'un octaèdre organisé autour d'un atome d'aluminium. Toutes ces structures se combinent en couches bidimensionnelles (Figure 1.7 et Figure 1.8). Il est possible de remplacer les atomes de silicium et d'aluminium par des ions de diamètre ionique équivalent, comme le silicium (Si^{4+}) « les tétraèdres » par des atomes d'aluminium (Al^{3+}). Quant aux octaèdres d'aluminium (Al^{3+}), ils sont souvent substitués par du magnésium (Mg^{2+}) ou du fer (Fe^{3+}) dans les SME (Blanck, 2013).

Les argiles sont donc analysées par les ingénieurs civils en tant que matériaux industriels en raison de leur aptitude à se déformer et de leur réaction à la cuisson. Les phyllosilicates de la fraction argileuse ($< 2 \mu m$) seront donc toujours associés au terme d'argile et de son attitude (Shimatu Mbuyi, 2012; Ouedraogo & al, 2015; Taha, 2017). Ces minéraux, se trouvent en abondance et facilement accessibles, ont toujours été des minéraux privilégiés. Les argiles, notamment, ont fait l'objet d'une utilisation très ancienne dans l'histoire de l'homme, notamment les céramistes (Baldeyrou-Bailly, 2003).

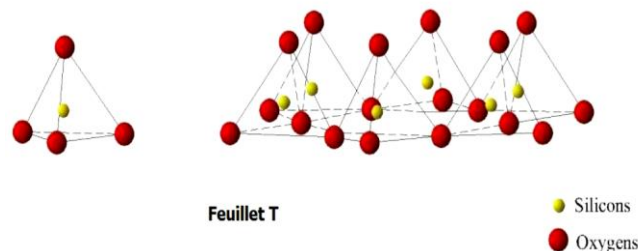


Figure 1 7: Organisation d'une couche tétraédrique, (Shimatu Mbuyi, 2012).

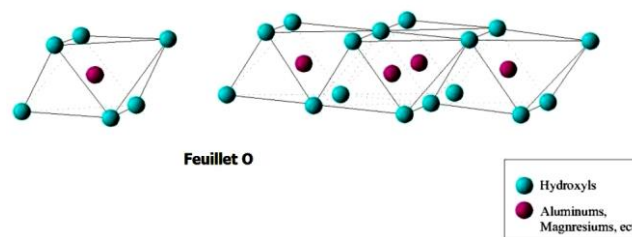


Figure 1 8: Organisation d'une couche octaédrique, (Shimatu Mbuyi, 2012).

L'AIPEA (Association Internationale pour l'Etude des Argiles) et Pédro ont établi une classification qui repose sur l'assemblage des feuillets constitués de couches tétraédriques et octaédriques (Dukuzg, 1990; Cabane, 2004) :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

La kaolinite $(Si_4O_{10}) Al_4(OH)_8$

À 7 °A, les minéraux sont constitués d'un feuillet tétraédrique (T) et d'un feuillet octaédrique (O). En élaborant un feuillet T/O ou 1/1. Les feuillets sont reliés les uns aux autres par des liaisons faibles de type hydrogène, avec un espace basal d'environ 7 °A, tels que la kaolinite.

L'illite $(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4.6} O_{20} (OH)_4$

À 10 °A : leur couche est constituée d'une association de deux feuillets tétraédriques et d'un feuillet octaédrique. En donnant une liaison de type T/O/T ou 2/1, d'un espace basal d'environ 10 °A. Des substitutions isomorphes créant un déséquilibre de charge compensé par des cations. En fonction des éléments substitués et la fréquence des substitutions minérales argileuses telles que les illites, et smectites, manifestent.

Les vermiculites $(Mg, Ca)_{0,7} (Mg, Fe, Al)_6 (Al, Si)_8 O_{22} (OH)_4 . 8H_2O$

À 10 °A : ils font partie de la famille des phyllosilicates 2 :1. C'est une famille proche de celle des smectites, mais elle se caractérise par un déficit de charge plus important. Il s'agit principalement de trioctaédre. Les substitutions tétraédriques sont responsables en grande partie du manque de charge, et la compensation se fait dans l'espace interfoliaire par des cations (Mg²⁺ principalement) et des couches d'eau.

Les chlorites $(OH)_4 (Si Al)_8 (Mg, Fe)_6 O_{20}$

14 °A : font partie de la famille des phyllosilicates, où la couche est composée d'une alternance de couche 2/1 et de feuillets octaédriques comme le chlorite entre les feuillets.

Les smectites $(OH)_4 Si_8 (Al_{10/3}, Mg_{2/3}) O_{20}, nH_2O$

Les minéraux interstratifiés, comme le rectorite "muscovite", la montmorillonite, les smectites et la bentonite, présentent des couches de couche distinctes. Ils appartiennent à la famille des phyllosilicates 2 :1 gonflants. Ils se distinguent par la superposition, par empilement vertical, de deux (ou plus) couches différentes. Plusieurs catégories de minéraux peuvent apparaître en fonction de la nature des éléments remplacés et de la fréquence des substitutions (Truche, 2010; Shimatu Mbuyi, 2012; Blanck, 2013).

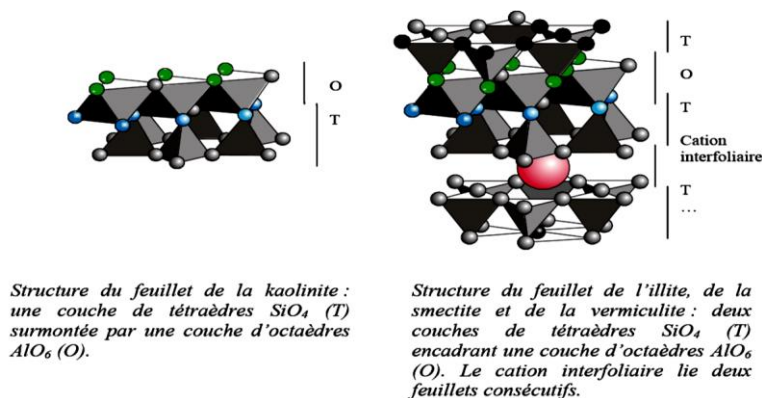


Figure 1 9: Structure d'un feuillet T-O de type kaolinite et T-O-T de type montmorillonite, (Shimatu Mbuyi, 2012).

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

Tableau 1 2: Principaux minéraux constituant les argiles céramiques (Fabbri, 2012).

Les minéraux argileux		Oxydes/Hydroxydes	
Illite	$K_{2-x}Al_4(Si_{6+x}Al_{2-x}O_{20})(OH)_4$	Quartz	SiO ₂
Chlorite	$(Mg_{1-y}Fe_y)_{6-x}Al_{2x}Si_{4-x}O_{10}(OH)_8$	Hématite	Fe ₂ O ₃
Smectite (Montmorillonite)	$4SiO_2 \cdot 0.85Al_2O_3 \cdot 0.33MgO \cdot 0.15Na_2O \cdot 0.5H_2O$	Goethite	FeOOH
Kaolinite	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$	Limonite	$\sim Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$
Feldspars		Carbonates	
Albite (sodic feldspar)	NaAlSi ₃ O ₈	Calcite	CaCO ₃
Orthoclase (potassic feldspar)	KAlSi ₃ O ₈	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂

Tableau 1 3: Caractéristiques des différentes familles d'argiles (Truche, 2010).

nom	type	diamètre d'une particule (µm)	surface spécifique en m ² / g	C.E.C en meq/ 100g
Kaolinite	1:1	0.1 - 4	10 - 30	3 - 15
Illite	2:1	0.1 - 1	100 - 175	25 - 40
Smectite (montmorillonite)	2:1	0.1	700 - 840	80 - 100
Vermiculite	2:1	0.1	760	100 - 150
Chlorite	2:1:1	0.1	20	5 - 15

3.3.4. Charge des surfaces argileuses et capacité d'adsorption d'eau et de gonflement

Certains minéraux argileux peuvent incorporer des molécules d'eau dans leur composition, ce qui est responsable de modifications de la taille de la couche par gonflement. On les appelle argiles gonflantes, en particulier les argiles de la famille des smectites (Tableau 1.4). Le phénomène peut entraîner une augmentation de 95% du volume. Les argiles gonflantes sont souvent à l'origine de la déstructuration, car en humidité, le sol gonfle en déformant la surface, tandis qu'en sèche, la déshydratation entraîne la formation de fissures. Contrairement aux minéraux ayant une forte capacité d'absorption d'eau mais qui ne possèdent pas de propriétés de gonflement, c'est le cas du groupe des argiles fibreuses, comme la bentonite (Shimatu Mbuyi, 2012).

Si les substitutions isomorphes entraînent des déficits de charge, les cations compensateurs et l'eau se lient dans l'espace interfoliaire aux minéraux argileux. La formation d'une couche diffusible dont l'épaisseur dépend de l'équilibre des forces entre les ions et le feuillet. La substitution des cations peut entraîner une altération de la composition chimique du milieu ou de la quantité d'eau dans l'espace interfoliaire, ce qui peut entraîner une altération de l'organisation des feuillets et une augmentation de la distance entre les feuillets. Par ailleurs, les feuillets présentent des charges électriques aux extrémités en raison de l'interruption de leur structure. Les charges, qui sont sensibles aux variations de pH, peuvent jouer un rôle dans les processus d'agrégation et de floculation des minéraux argileux (Palomino, 2005), en particulier dans la famille des kaolinites, où la plupart des charges sont réparties aux extrémités des feuillets (Blanck, 2013).

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

Tableau 1 4: Classification des argiles selon leurs propriétés de gonflement, (Shimatu Mbuyi, 2012).

ARGILES GONFLANTES			
Smectites			
Beidellite	Al	17	10
Montmorillonite	Al (Mg, Fe ²⁺ minor)	17	10
Nontronite	Fe ³⁺	17	10
Saponite	Mg, Al	17	10
Vermiculite	Mg, Fe ²⁺ , Al (Fe ³⁺ minor)	15.5	10-12
Mixed layer minerals*		10-17	<10
ARGILES NON GONFLANTES			
Illite	K, Al (Fe, Mg minor)	10	
Glauconite	K, Fe ²⁺ , Fe ³⁺	10	
Celadonite	K, Fe ²⁺ , Mg, Fe ³⁺ , Al ³⁺	10	
Chlorite	Mg, Fe, Al	14	
Berthiérine	Fe ²⁺ , Al ³⁺ (minor Mg)	7	
Kaolinite	Al	7	
Halloysite	Al	10.2	
Sepiolite	Mg, Al	12.4	
Palygorskite	Mg, Al	10.5	
Talc	Mg, Fe ²⁺	9.6	

3.4. Procédé de fabrication de briques cuites

La technique a une histoire de plus de 4000 ans, reposant sur une transformation irréversible des argiles sous l'influence des températures élevées (Stulz & al, 1997). Les briques cuites sont fabriquées à partir d'argiles mises en forme à l'état humide, séchées et cuites. La qualité dépend des minéraux argileux, de la température et des conditions de cuisson (Torraca, 2009). Pour rendre la lecture plus facile, une explication de chaque étape de processus de la fabrication est présentée ci-dessous :

3.4.1. Techniques de façonnage artisanal

Les briques cuites sont traditionnellement fabriquées en trois étapes principales. Dans un premier temps, un mélange d'argile et d'eau est préparée, puis la pâte est façonnée et moulée dans un moule de forme adéquate, généralement rectangulaire, pour obtenir des briques humides dite « verte ». On les sèche ensuite à l'air libre avant de les cuire dans un four traditionnel. En ajoutant une quantité adéquate d'eau à une terre argileuse, on obtient un état physique adéquat à la production. Toutefois, la quantité à ajouter varie en fonction de la technologie de façonnage sélectionnée : plastique, fluide ou liquide. Il est nécessaire d'utiliser une quantité d'eau de 20 à 30% pour les céramiques en plastique, afin de former une cohésion entre les particules et de permettre une déformation délicate de la pâte. Selon (Fabbri, 2012), ils sont les plus fréquemment utilisés depuis le début de la production céramique au Néolithique. Il est crucial d'ajouter des matériaux de charge tels que le sable siliceux ou, souvent, une chamotte, créée par le broyage de débris de terre cuite récupérée, tout comme les briques de la Rome antique incluent souvent de la pouzzolane comme matériaux de charge (Torraca, 2009)

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

3.4.2. Gisements

La formation de loess, argile siliceuse et calcaire à faible plasticité, est située au sommet du quaternaire. Il s'agit d'une argile très répandue dans l'est de la France (Alsace). Il arrive parfois que la couche supérieure du loess soit décalcifiée et qu'une argile très siliceuse, peu plastique, presque sans calcaire, appelée lehm, soit utilisée pour la fabrication de briques pleines à la presse et plus rarement par étirage à la mouleuse (Alviset, 1987).

3.4.2.1. Etape de murissement ou de fermentation

Un procédé qui s'est inspiré du processus de production du grès en Angleterre aux XVIII^e et XIX^e siècles a été fréquemment employé par les artisans, en essayant d'augmenter la plasticité de l'argile par une longue période de fermentation dans l'eau. Les fosses sont alors remplies de couches d'argile alternant avec des couches de chamotte d'une épaisseur adéquate, recouvertes d'eau et laissées au moins douze mois (Torraca, 2009).

3.4.2.2. Mélange, filtration et dégazage

Avant d'effectuer le moulage, le mélange est préparé en suivant une formule particulière. Il est indispensable de faire un filtrage des argiles pour éliminer les particules minérales ou végétales. Quant aux bulles d'air, elles sont éliminées par pression et dégazage sous vide. Notons que l'argile doit être filtrée à l'aide de tamis, puis placée en plaques plates et battue pour libérer l'air retenu (Torraca, 2009). L'étape de malaxage implique de piétiner la terre pieds nus ou à l'aide d'animaux. Cette méthode est ardue et souvent insatisfaisante, et surtout fatigante, nécessitant une grande quantité d'énergie et (Stulz & al, 1997).

3.4.2.3. Moulage et façonnage

À l'origine, on produit manuellement des briques en les projetant dans un moule en bois ou métallique, puis on arase l'excédent par une scée, on utilise un démoulage humide ou à sable pour extraire facilement les briques (Stulz & al, 1997). L'évaluation des dimensions des objets en argile avant la cuisson doit tenir compte du retrait prévu lors des étapes de séchage et de la cuisson (Torraca, 2009). La souplesse de la structure du moule nous donnera la possibilité de concevoir les formes complexes que nous désirons (Dukuzg, 1990; Fabbri, 2012).



Figure 1 10: Moulage dans le processus de fabrication de briques (Chanda, 2016).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLÉMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

3.4.2.4. Séchage à air ambiant

Le séchage correspond à une étape pendant laquelle l'eau ajoutée est prévue pour être éliminée par évaporation, sans causer de dommages. Un procédé effectué à l'extérieur ou dans des hangars et une protection contre le rayonnement solaire est toutefois conseillée afin d'éviter un séchage rapide (Stulz & al, 1997). Il est généralement effectué en dehors de l'hiver à l'air libre et demande un suivi attentif tout au long de la période de séchage, pendant laquelle le volume total diminue jusqu'à ce que les grains se rapprochent, une phase connue sous le nom de « phase de rétrécissement ». Par la suite, l'évaporation se poursuit, mais le volume reste constant, ce qui correspond à la "phase de porosité". Étant donné que la durée de séchage appropriée pour les briques cuites pleines est relativement longue, pouvant atteindre 15 jours. En outre, cela demande un grand nombre de personnel et entrave des immobilisations, ce qui explique pourquoi ce processus est abandonné (Dukuzg, 1990; Fabbri, 2012).

3.4.2.5. Brique crue

Selon (Dukuzg, 1990), l'état physique d'un objet partiellement séché se produit lorsque la pièce est assez solide pour supporter les contraintes mécaniques causées par des opérations spécifiques du cycle de traitement de la céramique, telles que l'application d'engobe ou de décoration, mais encore suffisamment humide pour permettre de telles opérations et d'assembler des pièces de forme indépendante. Pour éviter tout problème d'aspect lors du séchage, il est recommandé que le retrait ne dépasse pas 7 %. Pourtant, si le retrait dépasse les 10 %, il faut ajouter du sable ou des briques pilées comme dégraisseur (Stulz & al, 1997).

3.4.2.6. Cuisson

Les fours classiques, qu'ils soient de type compagne ou scellés à l'argile, sont de type intermittent (Stulz & al, 1997). Autrefois, les températures de cuisson étaient considérablement plus basses et inconstantes en raison de la structure basique des anciens fours, où les propriétés des briques varient en fonction de leur position à l'intérieur du four. Celles cuites à des températures plus élevées font preuve d'une plus grande résistance. La température joue également un rôle important dans la couleur. La couleur jaune signifie que la température de cuisson est basse (entre 700°C et 800°C), contrairement à la couleur rouge ou rose (cuisson jusqu'à 1000°C et plus) présenteraient des propriétés mécaniques moindres (Torraca, 2009). Dans les plus anciens systèmes de cuisson, les paramètres de cuisson (température et atmosphère) n'étaient pas contrôlables, à cause de la mauvaise isolation thermique et de l'absence de séparation entre la zone de combustion et la zone de cuisson, de sorte que l'atmosphère de cuisson est fortement influencée par la combustion du bois et aura tendance à être réductrice pendant le chauffage, mais oxydante pendant le refroidissement, lorsque la combustion est arrêtée. L'expérience a démontré que la production artisanale produit une quantité importante de déchets qui se manifestent à toutes les étapes de la production (Dukuzg, 1990).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.



a)



b)

Figure 1 11: Chambre de cuisson pour la fabrication de briques, b) Four de la cuisson des briques cuites (Chanda, 2016; Akhtar & al, 2022).

3.4.2.7. Technique Raku

Ce procédé de cuisson se distingue par un refroidissement très rapide, obtenu en retirant l'objet fabriqué du four alors qu'il est encore à haute température et en le plongeant dans de l'eau à température ambiante. Ce processus est instauré lorsqu'il y a des substances nocives pour diminuer les dégâts et rétablir l'état initial des pores (Dukuzg, 1990; Fabbri, 2012).

3.4.3. Procédé de fabrication de briques moderne

Les étapes de fabrication des briques cuites modernes sont pratiquement identiques avec le mode ancien, mais le processus de façonnage et techniques de production peuvent changer en fonction des moyens mécaniques disponibles et de la qualité et de la nature de la brique désirée. Les étapes principales sont illustrées dans la (Figure I.12) et peuvent être supposées de la façon suivante :

3.4.3.1. Extraction et préparation des matières premières

Comme nous l'avons déjà dit, les terrains argileux sont localisés au pied des collines ou aux abords des rivières, dans des zones agricoles, avec une bonne qualité d'argile, une accessibilité de la couche exploitable et une proximité de voies carrossables pour les transports (Stulz & al, 1997). Une fois que couche stérile à l'aide de pelles mécaniques, l'extraction se déroule à l'air libre, avec des hauteurs de front allant d'environ 1 mètre à une vingtaine de mètres (Alviset, 1987). L'argile peut aussi être extraite avec une pioche, un fil, une bêche pneumatique ou des explosifs, mais il est recommandé d'éviter les fils et les détonateurs en cuivre, car ils entraînent des taches bleu-vert lors de la cuisson. Le déplacement à l'usine est se fait par camion et, pour des raisons de coût, la plupart des briqueteries optent pour des gisements proches de l'usine. On préconise la propreté des véhicules de transport, car une simple impureté peut causer des dommages et compromettre l'intégralité du chargement (Dukuzg, 1990).

3.4.3.2. Préparation de Mélange

Selon (Alviset, 1987; Taha, 2017), il est primordial de procéder à la préparation des matières premières avant leur utilisation dans le mélange, en éliminant les impuretés, en concassant et en broyant les grandes particules, en les tamisant pour obtenir la finesse souhaitée etc. Lors de

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

la cuisson, les briques peuvent se fissurer ou éclater en raison d'une élimination insuffisante de certaines impuretés (éclatements de grains de chaux).

En fonction des exigences de la qualité du produit souhaité, les ingrédients sont mélangés dans un mélange sec, semi-humide ou humide. Afin de créer la boue, les mélanges sont homogènes grâce à l'humidification (Alviset, 1987; Taha, 2017).

L'utilisation d'un malaxeur motorisé pour effectuer un malaxage soigné a considérablement simplifié les choses, étant donné que la méthode de murissement est toujours employée par les briqueteries modernes, étape qui permet à l'eau de pénétrer dans la structure d'argile pendant quelques jours pour améliorer l'attitude de moulage d'argile (Stulz & al, 1997).

3.4.3.3.Façonnage

Le processus de préparation des briques cuites implique un étirage (extrusion, filage) puis un pressage de la pâte dans des machines appelées fileuses, extrudeuses. La pâte est alors coupée à la longueur adéquate à l'aide d'un coupeur. Les briques obtenues ne sont pas toujours de la même qualité, il y aura des différences en fonction des méthodes de fabrication utilisées. (Alviset, 1987; Dukuzg, 1990; Taha, 2017).

3.4.3.4.Séchage

Il s'agit d'une étape délicate et cruciale qui nécessite une gestion réfléchie afin d'obtenir des produits de grande qualité. Une fois que la brique a pris la forme recherchée, elle est ensuite dans un séchoir approprié afin d'évaporer une partie de l'eau de façonnage avant d'être placée dans le four de cuisson. Il est primordial de procéder à l'opération en respectant les normes de température et d'humidité afin de réduire au minimum les risques de fissuration ou de retrait qui peuvent se produire (Alviset, 1987; Taha, 2017). La turbulence générée par les ventilateurs latéraux dans les séchoirs tunnels dits d'hélicoïdal de l'air permet d'uniformiser le processus de séchage et d'accroître les contacts entre le flux séchant et les pièces, ainsi que les délais de contact (Dukuzg, 1990).

3.4.3.5.Cuisson

Une fois sorties du séchoir, les céramiques sont cuites à des températures allant de 800 à 1150°C. Il est important de procéder à la cuisson de manière à obtenir des produits avec des caractéristiques fonctionnelles satisfaisantes et aussi régulières que possible. L'objectif consiste à mélanger étroitement les combustibles et l'air de combustion à la sortie des brûleurs, à diluer ce mélange dans un excès d'air important pour ramener la température des flammes à la température de cuisson désirée pour la terre et, enfin, à soumettre tous les produits de l'empilage aux mêmes effets thermiques. La cuisson offre la possibilité d'obtenir les caractéristiques finales du produit, qui doivent respecter les normes et les exigences technico-économiques prédéfinies. La vitesse, la température et la durée de cuisson doivent être surveillées tout au long de la cuisson (Alviset, 1987; Taha, 2017).

3.4.3.6.Fours

Les fabrications artisanales utilisaient des fours intermittents et quelques usines sont encore dotées de fours continus à feu mobile (Hoffmann, Zig-zag, Migeon), Mais les usines avec une grande production actuellement sont opté pour une production actuelle assurée par des fours

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

continus à feu fixe, généralement appelés fours-tunnels. Dans ce genre de dispositifs (Figures 1.12), les produits sont empilés sur des wagonnets qui sont ensuite poussés à l'intérieur du tunnel où ils avancent progressivement. L'opération de cuisson s'étend habituellement entre 12 et 48 heures, selon le type de produits et les difficultés plus ou moins importantes auxquelles les matières premières font face lors de la cuisson. Les fours-tunnels ont une longueur d'environ 100 mètres. Ils ont une largeur de 3 à 8 mètres et une hauteur de 1,50 à 2 mètres. L'injection du combustible se fait généralement en voûte, parfois latéralement, dans des espaces ménagés dans les empilages. L'air de combustion et les fumées se déplacent à l'opposé du sens de circulation des wagons. L'air de combustion se réchauffe sur les produits en cours de refroidissement. Les fumées échauffent les produits en cours de préchauffage. L'homogénéisation des températures dans tous les points de la section de l'empilage est obtenue par des systèmes de brassage de l'air. Quelques usines ont installé récemment, à l'extraction des fumées, des échangeurs de chaleur qui récupèrent une partie des calories contenues dans les produits de combustion. L'air chaud obtenu est envoyé dans les séchoirs. Les fours-tunnels sont équipés de régulations automatiques, qui assurent une cuisson régulière, ainsi que d'une automatisation des mouvements des wagons (entrée et sortie). Ils constituent des appareils de cuisson très précis, dotés de nombreux moyens de réglage (Alviset, 1987; Dukuzg, 1990).

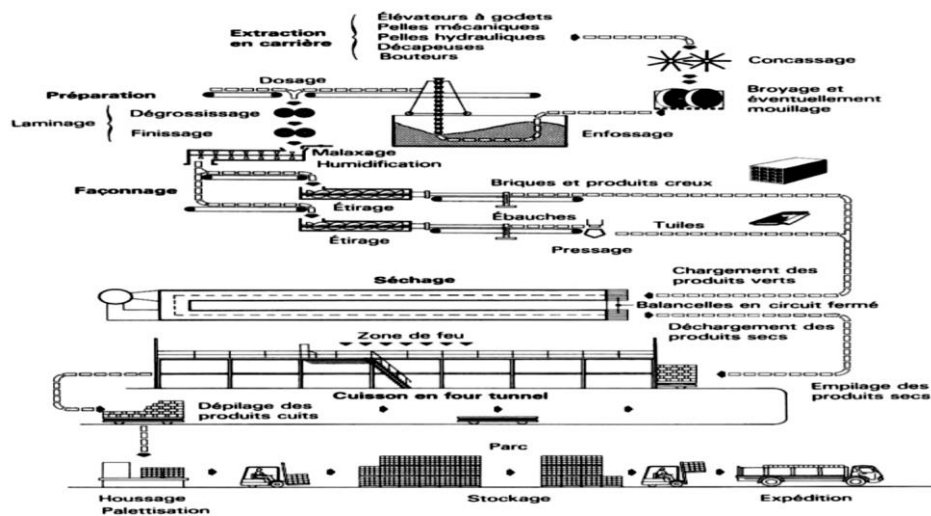


Figure 1 12: Procédé de fabrication de briques cuites, (Alviset, 1987).

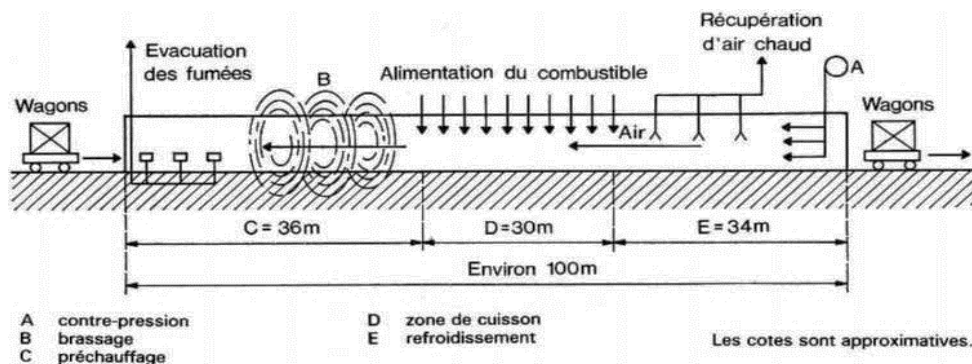


Figure 1 13: Principe de fonctionnement d'un four-tunnel, (Alviset, 1987).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

3.4.4. Des réactions chimiques destructives

Lors de la cuisson, des pics à environ 100°C sont dus à l'élimination de l'eau humide, tandis que le pic à environ 200-250°C concerne l'eau « liée » et la déshydratation partielle de l'illite et de la smectite, minéraux argileux gonflants. Les effets endothermiques du gypse se manifestent également dans la plage de température allant de 120 à 160°C (Moropoulou & al, 1995; Cardiano & al, 2004). Ensuite, il existe la phase de 300 à 350 °C où les hydroxydes de fer perdent également leur eau, et à 400-500 °C, les composés organiques s'oxydent en générant du dioxyde de carbone et de la vapeur, dans une atmosphère oxydante (Moropoulou & al, 1995; Cardiano & al, 2004). Ensuite, une diminution de masse, située entre 550 et 650 °C, sera liée à une diminution de la matière organique, ce qui correspond également à la plage de température où la (kaolinite) se distingue par deffets endothermiques assez intenses (El Ouahabi & al, 2015; Sutcu & al, 2015; Achik & al, 2019).

À 500°C, la structure cristalline des argiles est détruite et de la silice amorphe (non cristalline) et de l'alumine se forment. Tous les minéraux argileux perdent leur eau entre 500 et 700 °C et à 573 °C, la phase SiO₂ stable à basse température (α -Quartz) se transforme en phase stable à température plus élevée (β -Quartz), avec une augmentation de volume inférieure à 10 %. Le refroidissement a pour effet de résoudre cette réaction en diminuant le volume (Fabbri, 2012). Quant à la phase la phase comprise entre 600°C et 700°C, les ions sodium ou potassium présents dans l'argile provoquent la fusion d'une partie de la silice, ce qui entraîne la formation d'un verre en phase de refroidissement (Fabbri, 2012). Entre 700 et 850 °C, la décomposition des carbonates provoque la libération de dioxyde de carbone (Kizinievič & al, 2013; Sutcu & al, 2015; Achik & al, 2019). En outre, la chaux hygroscopique libre absorbe l'humidité de l'air afin de créer de l'hydroxyde de calcium [Ca(OH)₂], qui réagit lentement avec le dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), ce qui induit la cristallisation de la calcite reformée (Fabbri & al, 2014) .

Les réactions solides commencent entre 800°C et 900°C, avec la silice, l'alumine et certains oxydes métalliques qui sont des mineurs dans le mélange initial, ou encore la formation de silicates d'aluminium comme la diopside ou la gehlénite (Fabbri, 2012), et vers 950°C, les compositions eutectiques commencent à se fusionner avec les feldspaths. Selon (Dukuzg, 1990; Fabbri, 2012), les concentrations théoriques de fusion des feldspaths sont les suivantes : feldspath sodique à 1120 °C, feldspath potassique à 1200 °C et plagioclases à plus de 1200 °C. (Fabbri, 2012; Dukuzg, 1990).

En outre, la phase après 850°C est causée par la dihydroxylation d'autres minéraux argileux comme la muscovite, qui se déshydroxylent après 950°C. Illite, chlorite, smectite, muscovite et vermiculite sont des minéraux argileux qui se décomposent à des températures de 950°C (Moropoulou & al, 1995; Cardiano & al, 2004). La calcite et la dolomite se transforment en chaux (CaO) à des températures supérieures à 1100 C° et réagissent avec d'autres éléments pour former de nouveaux minéraux calciques tels que la gehlénite, le diopside et la wollastonite (Moropoulou & al, 1995; López-Arce & al, 2005). Finalement, la présence de ces substances cristallines dans une terre cuite peut donner une indication de la température de cuisson (Torraca, 2009).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

Selon (Qlihaa & al, 2016), des recherches antérieures ont démontré l'efficacité des minéraux argileux dans l'absorption des métaux lourds présents dans les effluents et les eaux, tels que la smectite, la montmorillonite, la bentonite, l'illite, la vermiculite, la Kaolinite et la sépiolite. En outre, des recherches ont prouvé leur efficacité dans l'élimination de certains ions dans des solutions aqueuses synthétiques. Il convient de souligner que le pH joue un rôle essentiel dans la régulation de l'adsorption des métaux lourds, comme il est indiqué dans la littérature (Sorgho & al, 2011).

3.4.5. Réaction chimique reconstructive

Les résidus des processus destructeurs provoquent la formation de nouvelles phases cristallines. Il s'agit principalement des résidus des carbonates décomposés, mais aussi de la silice et de l'alumine des minéraux argileux. Lorsque la température de cuisson augmente, on peut observer la formation des composés suivants :

- 1) $\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3$ (wollastonite),
- 2) $2\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 = \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (gehlénite),
- 3) $\text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{SiO}_2 = \text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (diopside, minéral du groupe des pyroxènes),
- 4) $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anorthite, plagioclase calcique) ; la même réaction peut s'écrire comme : $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (gehlenite) + $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{SiO}_2 = 2\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, ce qui signifie que l'anorthite peut également se former aux dépens de la gehlenite,
- 5) à 750-800 °C, en milieu oxydant, Fe_2O_3 commence à cristalliser (Dukuzg, 1990; Fabbri, 2012).

3.5. Les briques cuites dans la littérature

Même si les humains ont connu la cuisson de l'argile depuis le Néolithique, soit environ 13 000 ans avant J.-C., l'utilisation des briques dans la construction s'est développée plus lentement, la qualité de la brique ancienne explique la pérennité de sites historiques en maçonnerie qui ne requièrent pas de restauration (Saenz & al, 2019). (Tite & al, 2001), a soumis une brève bibliographie sur les caractéristiques mécaniques et thermiques de la poterie archéologique et ethnographique à base d'additifs est présentée. Les briques cuites sont principalement fabriquées à partir de sols argileux. Après la cuisson elles deviennent poreuses en raison de la chaleur du four et des interactions minéralogiques. Pour (Cultrone & al, 2004) il a été souligné que lors de la phase de cuisson, des changements et des interactions se produisent, ce qui entraîne l'apparition de nouvelles phases minéralogiques et la vitrification de la brique. La solidité et la résistance des briques sont donc obtenues par les variations de composants. (Papargyris & al, 2001), tout en tenant compte de l'impact de la méthode de fabrication sur la texture de la brique (Fabbri, 2012), la couleur varie en fonction de la présence de substances telles que le fer et la calcite, de la présence d'impuretés et même de l'environnement de cuisson (Dondi & al, 1997; Hendry, 2001). Le contrôle de la composition du sol argileux, des conditions d'immersion, de fermentation, des méthodes de fabrication, de la température de cuisson et de la technologie des fours est indispensable pour produire des briques de qualité (Carretero & al, 2002). Du point de vue chimique, les briques sont pratiquement exemptes de dissolution car elles sont composées de matériaux silicatés (Saenz & al, 2019).

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

Au départ, le choix des gisements à proximité des sites à restaurer est essentiel. De plus, la sélection des meilleures terres dans la littérature repose principalement le pourcentage d'argile et de divers autres facteurs (Ziegert & al, 2013). Elles sont principalement composées de grandes quantités d'alumine et de silice, d'une proportion modérée de chaux et d'oxyde de fer, ainsi que de différents autres carbonates et oxydes en petites quantités (Xavier & al, 2012; Khitab & al, 2021). Cette composition est principalement constituée de grandes quantités d'alumine et de silice, d'une proportion modérée de chaux et d'oxyde de fer, ainsi que de divers autres carbonates et oxydes en petites quantités. Il arrive que nous confrontés à une terre particulière ou difficile à manipuler, lorsque la quantité d'ions spécifiques dans le mélange est exagérée. Les briques marneuses ou calcaires peuvent présenter des propriétés réfractaires élevées en raison d'un excès de chaux et d'oxyde de fer, comme le souligne (Athmania, 2009; Kazmi & al, 2016; Achik & al, 2021). Prenons l'argile calcaire comme exemple, qui fonctionne à la même manière que l'argile non calcaire (Blasius Ngayakamo, 2020), mais il est important que le fabricant prenne en compte les étapes simples pour éviter le soufflage de la chaux en présence d'eau, de liquide ou de vapeur. Le principal problème réside dans les carbonates tels que la calcite. Les carbonates qui n'ont pas réagi avec les silicates pour former de nouvelles phases minérales pendant la cuisson se transforment en chaux (CaO) à la sortie de fours. Cet oxyde extrêmement réactif, en présence d'humidité, la chaux réagit avec l'eau pour former de la portlandite (Ca(OH)₂). La carbonatation de la portlandite en calcite et l'augmentation de volume due à cette transition entraînent la fissuration et l'éclatement des briques après cuisson (Elert & al, 2003). D'autre part, une surabondance de sulfate, un élément toxique, peut modifier la composition des briques (Ziegert & al, 2013).

Donc, le comportement d'une terre dépend de la réaction combinée et du degré d'organisation de différents minéraux, dont chacun possède une résistance intrinsèque qui le distingue. A priori, Il est essentiel qu'elle contienne une quantité adéquate d'argile (plus de 20%) (Baglioni & al, 2016; Călătan & al, 2020) et qu'elle soit suffisamment plastique pour atteindre un indice de performance de 25 % (Taha, 2017). Il convient d'avoir une humidité naturelle restreinte et une faible quantité de matière organique (Stulz & al, 1997; Mbuyi & al, 2012). Il serait préférable d'avoir une quantité importante de la fraction argileuse en kaolinite, car elle est la composante la plus stable et non déformable, étant donné son retrait linéaire à la déshydratation minimale (Torraca, 2009). Contrairement aux argiles complexes et gonflantes, présentant un grand retrait, telles que la Smectite et l'illite (Girard & al, 2005; Houben, 2006; Berthaud, 2013; Ngayakamo & al, 2020). Leur présence avec de grands pourcentages est inappropriée pour la fabrication de la céramique. (Stulz & al, 1997). Par contre, il est envisageable de les utiliser après une correction, en diminuant l'effet de gonflement et de retrait par dégraissage (Girard & al, 2011; Shakir & al, 2013; Zebair & al, 2019; Adediran & al, 2021).

Selon (Pappu & al, 2007), une approche novatrice repose sur la durabilité et les performances optimales des dégraisseurs ajoutés. Toutefois, il est envisageable de réparer ces sols en utilisant un processus de dégraissage, comme il a été prouvé dans de nombreux travaux de recherche qui ont opté pour des stratégies d'intégration de matériaux locaux, comme des alternatives écologiques et économiques adaptées à la construction, tout en préservant la santé publique tout en réduisant les coûts de l'élimination des déchets (Shakir & al, 2013). De fait, à l'heure actuelle,

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

la fabrication de briques consomme une grande quantité extraite de la nature, génère aussi de grandes quantités de déchets, qui compromettent également les paysages, et lors de la cuisson, elle réclame trop d'énergie et entraîne la libération de gaz à effet de serre (Ahmari & al, 2012). Cela explique l'intérêt croissant pour rendre la production de briques plus respectueuse de l'environnement (Coletti & al, 2016). Selon (Bories & al, 2015), l'emploi de déchets en tant qu'additifs permet de diminuer l'extraction et l'expiration de la matière première non renouvelable, tout en résolvant le problème environnemental associé à l'accumulation de déchets industriels et agricoles. Le principe est basé sur une amélioration du comportement des briques cuites, qui dépend de la nature de la terre utilisée et du processus de fabrication (Attar, 1994; Stulz & al, 1997; Mbuyi & al, 2012).

Effectivement, les stabilisants les plus fréquemment utilisés pour résoudre le problème des sols en difficulté sont le ciment et la chaux, car ils ont prouvé leur aptitude à améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Pourtant, certaines études révèlent qu'ils entraînent une erreur démesurée en causant des dommages considérables dans le temps. Leurs propriétés chimiques altèrent la texture de la brique et entravent un processus de recyclage adéquat pour son environnement. Une problématique, dont de nombreuses recherches ont été confrontées, est d'évaluer l'influence des renforts naturels sur les compétences en ingénierie (Ukwatta & al, 2015). De nombreuses études ont été menées au cours des 20 dernières années sur l'utilisation de divers déchets toxiques et intoxicants dans la production de nouvelles briques. Dans de nombreux cas, la présence de quantités significatives de déchets dans les briques les a rendues plus solides et plus résistantes. De plus, ils ont également amélioré la plasticité du mélange à l'état humide, ce qui réduirait la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage. De plus, ils ont également augmenté les températures à l'intérieur de la brique, ce qui entraînerait une réduction de la température de cuisson requise pour la vitrification (Ziegert & al, 2013). D'après, (Madurwar & al, 2013; Ayodele & al, 2019; Meddah & al, 2020) , cette approche peut être utilisée comme des solutions écologiques et économiques adaptées pour la construction, ce qui favorise la préservation des terres considérées comme une source non renouvelable, la préservation de la santé publique et l'environnement, tout en réduisant les coûts d'élimination des déchets (Shakir & al, 2013).

Pour atteindre notre objectif, il est essentiel de respecter les normes et les standards de fabrication des briques cuites. Les briques sont généralement évaluées au laboratoire en fonction des valeurs de retrait de cuisson, de la densité, de la porosité et de l'absorption d'eau, ainsi que de la résistance à la compression et à la traction. Selon les études menées par les chercheurs (Garrity, 2010; Khitab & al, 2021), les briques de haute qualité sont solides, exemptes de fissures, d'éclats et de débris de briques (Attar, 1994). Il faut donc diminuer la part de liant dans le mélange pour diminuer la quantité d'eau et diminuer les tensions qui peuvent provoquer des fissures et des retrait lors du séchage ou de la cuisson. Selon (Taha, 2017), l'utilisation de granulats de forme angulaire entraîne un retrait global quasiment nul.

D'après (Belkadi & al, 2018), une augmentation de la masse volumique des briques est observée pour les dépresseurs de grande densité, tandis qu'une diminution est observée pour les suspensions minérales poreuses. Le poids minimum conseillé est de 3000 g, à moins que la légèreté ne soit un avantage en termes de faible poids mort des structures, à condition que les

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

caractéristiques mécaniques et la durabilité demeurent conformes aux normes (Khitab & al, 2021). D'après les études, quand la densification diminue, la porosité augmente et l'absorption d'eau augmente considérablement. La densité d'une brique argileuse classique est définie dans les codes indiens entre 1,6 et 1,92 g/cc. La perméabilité varie en fonction du type de porosité, des minéraux argileux et de leur capacité d'adsorption, de la granulométrie et de la nature des ajouts (Laou & al, 2020), ainsi que de la température qui consolide les briques et favorise le retrait (Pittaluga & al, 1991). D'après les normes de construction, il est recommandé que les briques de première classe absorbent 20 % d'eau (CTTB, 1998; Prabhu & al, 2019) et 28 % pour la deuxième classe (Alonso-Santurde & al, 2011; Khitab & al, 2021). La résistance à la compression doit être comprise entre [6,9–27,6] MPa selon les standards (NR EN 771-1/C) et (ASTM C270) (NR EN 771-1/CN, 2008; Bruno & al, 2015; Achik & al, 2019), sinon elles sont trop fragiles selon (Kizinievič & al, 2018) .

Or, des facteurs intrinsèques peuvent entraîner des anomalies qui compromettent la durabilité de la brique. Selon (Blasius Ngayakamo, 2020) même si l'emploi de chaux ou de craie diminue le retrait et que la calcination de calcite (CaCO_3) améliore la vitrification de la céramique de brique lors de la cuisson, sa présence en grande quantité a un effet néfaste sur la brique (Attar, 1994; Samara & al, 2009; Ngayakamo & al, 2020). La transformation en chaux vive entraîne la formation d'autres types de porosité après la combustion de la CaCO_3 , entraînant une dilatation et une augmentation du nombre des pores, ce qui entraîne une absorption accrue et des fissurations (Uchechukwu & al, 2006; Alonso-Santurde & al, 2012; Achik & al, 2019) L'inclusion de (CaO) ou de Fe_2O_3 dans le mélange peut provoquer un phénomène d'efflorescence, ce qui compromet la durabilité de la maçonnerie, ce qui compromet la durabilité de la maçonnerie (Marouf, 2018; Ngayakamo & al, 2020). Les stabilisants peuvent également être sensibles à la chaleur ou brûlés, ce qui peut entraîner la formation de microfissures et une réduction de la résistance (Alonso-Santurde & al, 2012).

L'examen de ces expériences précédentes, il est évident que la production de maçonnerie stabilisée nécessite une approche scientifique rigoureuse afin d'évaluer certaines performances structurelles et de durabilité. Outre la résolution d'un problème environnemental, ces briques dotées de caractéristiques spécifiques peuvent être utilisées efficacement dans les nouvelles constructions et même pour les travaux d'entretien. Pour mieux appréhender cette notion, nous vous présentons une série d'expériences scientifiques sur l'exploitation des déchets dans le domaine de la maçonnerie dans la section suivante :

3.6. Éléments dégraissants et recyclage de déchets

Les déchets générés par les activités quotidiennes, de la production et de l'industrie qui ne cessent de se multiplier pour satisfaire les besoins d'une population en constante évolution. Les ingénieurs civils ont adopté une approche novatrice afin de les convertir en actifs rentables. Actuellement, le recyclage des déchets est largement utilisé pour prévenir les décharges, préserver les ressources naturelles et favoriser la durabilité et la préservation de la nature (Cherian & al, 2022). Il est donc crucial de tenté satisfaire les exigences matérielles des normes, notamment en raison de nouveau mouvement croissant, encourageant l'utilisation de matériaux

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

de construction abordables, légers et respectueux de l'environnement (Himabindu & al, 2024). De nombreuses recherches scientifiques à l'échelle mondiale, ont démontré que les additifs ont été employés comme substituts aux matières premières dans la production de briques cuites. La rigueur est donc primordiale lors du processus de recyclage, mais les règles environnementales sont de plus en plus rigoureuses et l'intégration des approches alternatives pour gérer et utiliser ces déchets devient cruciale (Singh & al, 2020).

D'un point de vue opérationnel, pleines d'expériences sur intégration des déchets dans des briques en terre cuite pour obtenir des briques simples, efficaces et légères. Ont démontré leur efficacité dans la résolution des problèmes de pollution et dans l'amélioration des performances des briques (Hernández García & al, 2024). Les briques résultant ont connu une légèreté accrue, un retrait minimal, ainsi qu'une porosité, des propriétés thermiques et une solidité améliorées, respectivement. Cette légèreté est privilégiée, car les briques deviennent plus faciles à manipuler et moins coûteuses à transporter. La légèreté résulte de la combustibilité des particules de déchets organiques incorporées, ce qui permet de réduire la masse de la brique tout en maintenant les caractéristiques exigés. En outre, l'économie d'énergie résulte de la consommation substantielle de calories provenant de divers types de déchets (Dondi, 1997; Dondi & al, 1997). Quoique les hautes températures entraînent la libération de substances toxiques, mais les changements dans les caractéristiques chimiques des substances en incorporant des composants toxiques en les immobilisant dans la phase vitreuse de la brique en terre cuite, a permis de contrôler cette toxicité. En outre, l'ajout de plus de 5 % avait un effet défavorable sur la qualité mécanique des échantillons cuit (Vieira & et al, 2006).

Les déchets les plus fréquemment utilisés sont la cendre volante et les boues, la sciure, le papier, le polystyrène, l'herbe, le verre, les déchets des usines d'acide phosphorique, l'émail d'acier et des déchets minéraux tels que la poudre de marbres et les calcaires (Dondi, 1997; Dondi & al, 1997). Leurs extinctions restent une priorité. Toutefois, les éventuels déchets ne peuvent être recyclés que si les caractéristiques et la pollution environnementale de la nouvelle brique sont conformes aux normes en vigueur. Selon (Kadir, 2012), le processus de fabrication comprend principalement une première étape de tamisage, une seconde étape de broyage, puis un lavage et un malaxage de la pâte jusqu'à ce qu'elle atteigne la consistance requise pour le moulage en briques. La partie suivante récapitule les analyses de la littérature sur les déchets :

3.6.1. Aperçu bibliographique sur des déchets recyclés en terre cuite

En raison de l'importance accordée au recyclage des déchets, nous avons autant évoqué l'histoire du recyclage des déchets dans la fabrication des briques en terre cuite. Les déchets ont été divisés en trois grandes catégories : les cendres volantes, les boues et d'autres déchets solides de type organique et inorganique.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

3.6.1.1.Cendres volantes

(Dondi, 1997; Dondi & al, 1997), ont confirmé que 10% de cendres volantes permettent d'économiser de l'énergie lors de la cuisson, en raison de la chaleur de combustion élevée des déchets. Cependant, ces résultats varient selon les quantités de déchets ajoutées, la réaction de différentes compositions dans la brique et la granulométrie. Les conclusions de l'étude (Pimraksa & al, 2000; Tyagi & al, 2004; Kayali, 2005) montrent que leur utilisation a entraîné une amélioration significative du comportement mécanique en augmentant les résistances de compression et de traction. D'après (Kadir, 2012), une légèreté supplémentaire a été observée par rapport aux briques d'argile classiques. Les briques cuites présentent une surface rougeâtre et rugueuse. Les liaisons céramiques synergiques et la complication des pores après la vitrification ont été observées dans la dimension microscopique. Sa capacité à immobiliser efficacement les métaux lourds a été confirmée par les tests de lixiviation. Cela présente de nombreux bénéfices tant sur le plan écologique que financier

Quant à (Lin, 2006; Sun & al, 2021), il a été constaté que l'utilisation d'une quantité significative de déchets provenant des scories de cendres volantes provenant de l'incinérateur de déchets solides municipal a entraîné une hausse de la densité sèche et de la résistance à la compression. Toutefois, la consommation d'eau et le taux de retrait ont baissé. Tandis que l'ajout de cendres volantes contenant des sels solubles a eu des conséquences néfastes sur les caractéristiques physiques et mécaniques respectives. Après leur élimination par lavage, elles ont développé une texture lisse et homogène. Parallèlement, des porosités étendues ont été observées. Quant à la phase minérale, il a été observé que la présence de sels solubles entravait la création de Silicoaluminates complexes et perturbait la fusion des matières premières. Le test de lixiviation a révélé que des briques avec 10 % de cendres volantes lavées peuvent être conformes aux normes réglementaires. Il a donc été prouvé que les cendres volantes peuvent être utilisées pour fabriquer des briques cuites après l'élimination des sels solubles par la décomposition. Egalement, (Lin, 2006) plaide pour l'utilisation de laitier de cendres volantes afin d'obtenir une brique de haute qualité tout en diminuant l'énergie nécessaire lors de la production. En outre, (Lingling & al, 2005) l'ont examiné avec une forte proportion de substitution. Les résultats montrent une diminution de la plasticité et de l'absorption d'eau, une amélioration de la résistance à la compression, au gel et à l'efflorescence. De plus, aucune fissure n'a été provoquée par la chaux.

3.6.1.2.Boues

Étant donné la variété des boues, (Rouf, 2003; Hassan & al, 2014) ont expérimenté les boues de fer et d'arsenic, il a été démontré que la proportion de boues et la température de cuisson jouent un rôle essentiel dans la qualité des briques. Au fur et à mesure que la proportion de boues augmentait, la résistance des briques à la compression a augmenté. Grâce à l'ajout de 25 % de boues, la surface spécifique, la finesse et les besoins en eau ont été considérablement augmentés, tout en réduisant la plasticité de l'argile. De plus, l'absorption d'eau diminue avec la

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

diminution de la quantité de boues et l'augmentation de la température de cuisson. En ce qui concerne le test de lixiviation, 6 % de l'arsenic en poids ont révélé des pourcentages nettement inférieurs aux limites TCLP. Des boues de tannerie ont été étudiées par (Basegio & al, 2002), il a été observé que la densité sèche augmentait en fonction de l'augmentation de la température et de la diminution de la quantité de boues. On a observé une résistance maximale à la flexion à 1180°C, tandis que le retrait le plus élevé a été observé entre 1100°C et 1180°C. L'analyse de lixiviation a mis en évidence que le chrome, le principal polluant des boues, peut être maintenu dans le produit final d'argile. De plus, les études sur les émissions atmosphériques ont montré que le zinc et le chlore proviennent des émissions de gaz et ne sont donc pas absorbés par le système céramique. Néanmoins, la consommation de briques était conforme. Quant à (Liew & al, 2004), des boues d'épuration de différentes compositions ont été examinées. Les conclusions indiquent une augmentation du retrait, de la masse volumique apparente et de la résistance à la compression. Les briques contenant de la boue séchée de 10 à 40% de poids, présentent des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques conformes. On observe également une faible lixiviation des métaux lourds dans les briques.

Les chercheurs (Dondi & al, 1997; Ramadan & al, 2008; Cangussu & al, 2023) ont également observé de nombreux bénéfices associés au recyclage des boues d'épuration, tels que des économies d'énergie et une acidification de la terre. Ces caractéristiques ne seront cependant obtenues que pour les taux de boues les plus élevés, pouvant atteindre 25 % à 50 % des déchets ajoutés. Par ailleurs, les boues issues de l'épuration des eaux doivent être incinérées avant d'être utilisées dans la fabrication de briques afin d'évaporer la majeure partie de sa teneur en matières organiques relativement élevée, ce qui explique la forte perte de poids au feu.

Par ailleurs, l'étude des boues issues du traitement des eaux usées de l'industrie papetière par (Singh & al, 2018; Bhushan & al, 2020) a rapporté que ces boues contiennent des agents fondants, ce qui permet d'économiser de l'énergie lors de la cuisson des échantillons de briques. Les briques produites étaient extrêmement légères, ce qui permettra de réduire les coûts de transport et de main-d'œuvre requis. Résistantes à la corrosion et à la compression. Le pourcentage maximal d'ajout qui répond aux normes de construction de diverses normes de résistance minimale à la compression était de 15 %. D'après (Makni & al, 2021; Goel & al, 2021), il a également été mentionné que les briques réalisées à partir des mêmes boues ont montré une absorption d'eau et une porosité apparente plus élevées lorsque la quantité de déchet augmente. L'apparition d'une structure poreuse avec des pores interconnectés, de forme irrégulière, a permis d'améliorer les performances d'isolation thermique et de diminuer la conductivité thermique des briques en terre cuite. Les concentrations de lixiviation suggèrent que l'utilisation de 12% des déchets pourrait aider à diminuer l'impact écologique des déchets abondants et à préserver les ressources naturelles non renouvelables.

(Razli & al, 2007), suite à l'incorporation de sciure et de boues de fabrication de papier étudié, l'aspect fibreux renforce le corps humide et simplifie le processus de séchage. La création de pores fines et uniformes a légèrement réduit la résistance à la compression. Quant aux boues de

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

papier contenant de la calcite contribuent à améliorer les caractéristiques mécaniques des briques. Quant à la boue siliceuse qui contient la montmorillonite minérale qui se gonfle. Une grande quantité d'eau a été employée afin de faciliter la manipulation, ce qui a provoqué l'apparition des fissurations lors du séchage. Ainsi, la vulnérabilité des briques pendant la cuisson demeure significative. Il s'agit donc d'un ajout dont l'usage reste limité. Enfin, les débris de polissage de type granitique sont finalement aussi testés. Bien qu'elle a simplifié la manipulation et la production des briques, ils ont rendu l'argile plus sensible au séchage, en particulier lorsqu'une quantité plus importante est ajoutée. Ils diminuent également les caractéristiques mécaniques des produits.

Dans un contexte similaire (Cusidó & al, 2015; Vieira & al, 2016; Makni & al, 2024), l'utilisation de la boue de papier dans la production de briques a démontré une résistance acceptable à la compression, ainsi qu'une amélioration des performances d'isolation thermique et sonore. La cuisson ne produit aucune émission significative de substances dangereuses comme le SO₂, les NO_x, le TOC et le CO. Il est possible d'optimiser 10% d'ajout afin de respecter la norme et de ne pas dépasser les valeurs nécessaires pour le retrait, l'absorption d'eau et la perte au feu.

L'étude de (Hegazy & al, 2012) a examiné la substitution totale de l'argile de brique par des boues de traitement des eaux ajoutées à des cendres de balle de riz (RHA). Il a été recommandé d'avoir une quantité minimale de particules RHA pour éviter une augmentation importante des pores ouverts lors de la cuisson, ce qui entraîne une augmentation de l'absorption d'eau et une diminution de la densité et de la résistance à la compression. Ainsi, le taux optimal de boues et de RHA était de de 75 %. La majorité des caractéristiques analysées étaient en accord avec les critères de spécification standard. Dans leurs recherches (Vieira & et al, 2006; Kadir & al, 2016), ont étudié les effets du recyclage des boues d'acier sur la fabrication de briques cuites. Il a été observé que 5 % des boues fines d'acier, principalement composées de fer métallique, d'oxydes de fer et de carbonates de calcium, permettent d'obtenir une brique de haute qualité, avec une grande résistance à la compression et un faible taux initial d'aspiration. Cependant, toutes les briques sont toujours conformes aux normes et peuvent être utilisées dans diverses situations de travail. Dans une recherche similaire menée par (Sarani & al, 2022), il a été prouvé que l'ajout de boues d'aciérie jusqu'à 15 % à une température de cuisson élevée améliorerait les caractéristiques des briques tout en contrôlant les niveaux de métaux lourds associés aux déchets. L'incorporation de ces boues dans des briques d'argile cuite pourrait donc constituer une solution d'élimination respectueuse de l'environnement.

Un autre type de boue a été étudié par (Dos Reis & al, 2020), en particulier les boues provenant de la partie minérale inerte des déchets de construction et de démolition, obtenues à partir de l'usine de recyclage des agrégats. Avec une proportion de boue de 70 % et une température de 800°C, des résistances à la compression sont améliorées. Par ailleurs, une grande partie de la boue a légèrement diminué la densité. La conductivité thermique des déchets présente des

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLÉMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

performances d'isolation améliorées. En ajoutant jusqu'à 70 % de boue, on obtient des briques cuites de grande qualité physique et mécanique.

Une étude réalisée sur les boues issues de l'industrie du raffinage du pétrole ou de l'extraction de l'huile de grignons avec de l'argile (Eliche-Quesada & al, 2015) a démontré que des taux élevés (10 % à 15 %) en poids entraînent des briques à faible résistance à la compression et une diminution de la masse volumique apparente et une augmentation de l'absorption d'eau. Il s'agit d'une porosité croissante causée par la présence de substances organiques, qui agissent comme des porogènes lors de la combustion, ce qui accroît la porosité de l'argile et fournit un support énergétique lors de la cuisson des briques. Ces tests de lixiviation ont montré que les concentrations de métaux lourds lixiviés à partir de briques concassées respectaient les normes en vigueur. L'étude menée par (Vieira & al, 2018) a examiné l'impact de divers déchets provenant des usines sidérurgiques, tels que les boues de haut fourneau, les boues et les scories provenant du processus d'affinage de l'acier à l'oxygène, sur les caractéristiques des briques cuites. Ils ont opté pour les boues de galvanoplastie afin de produire des briques en argile cuite. Les déchets sélectionnés présentent une distribution granulométrique appropriée pour le traitement des briques d'argile. Il est indéniable que des variations de compositions chimiques et minéralogiques peuvent être tolérées, mais en quantités restreintes, sans altérer les caractéristiques physiques et mécaniques. Ils ont prouvé leur efficacité dans l'économie d'énergie lors de la cuisson. Dans leur recherche sur l'évaluation des propriétés physico-mécaniques et du risque environnemental à long terme des briques d'argile cuites incorporées à des boues de galvanoplastie (Dai & al, 2019). Les résultats ont révélé une légère baisse du retrait linéaire et de la masse volumique apparente. Néanmoins, l'absorption d'eau a augmenté et la résistance à la compression a été fortement diminuée, ce qui pourrait limiter l'emploi de cette méthode dans le futur. La porosité croissante a également entraîné une augmentation du volume et de la taille des pores. Les tests de lixiviation ont montré que les concentrations de tous les métaux lourds (Cu, Zn, Cr et Ni) sont inférieures aux valeurs limites réglementaires correspondantes. Un ajout de moins de 10 % en poids ne modifierait pas les caractéristiques physico-mécaniques des briques.

3.6.1.3. Déchets organiques et inorganiques

De nombreuses études ont privilégié l'utilisation des matériaux locaux, en traitant ou en transformant pleins de déchets pour les utiliser comme des alternatives écologiques et économiques adaptées à des fins de construction. À partir de déchets organiques solides, de nombreux chercheurs, tels que (Madurwar & al, 2013), ont opté pour le recyclage des déchets agricoles. Les matériaux de construction/composites élaborés à partir de divers déchets agricoles sont considérablement plus abordables, ont une conductivité thermique plus faible, économes en énergie et rentables, légers et durables. Toutefois, la question de l'absorption d'eau constitue un défi majeur pour la majorité de ces produits, ce qui nécessite des recherches approfondies. Selon (Sutcu & al, 2009), d'autres chercheurs ont utilisé du papier recyclé et ont observé une diminution du retrait et des densités, tandis que la porosité et l'absorption d'eau ont

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

augmenté, ce qui a entraîné une réduction de la résistance à la compression. Toutefois, cette dernière demeure conforme aux valeurs habituelles de résistance. Les recherches menées par (Veyseh & al, 2003) ont démontré que le polystyrène améliore les capacités d'absorption d'eau tout en réduisant la résistance et la densité sèche de la boue. Grâce à l'ajout de 2 % de polystyrène, la résistance à la compression et à l'absorption d'eau a été améliorée, tout comme les performances thermiques. Pour sa part, (Folaranmi, 2009) a également réalisé une recherche sur des cendres de manguiers séchés et de sciure de bois d'acajou. Les briques ont montré une performance thermique supérieure, tandis qu'avec 30% de sciure de bois, la conductivité thermique a été la plus élevée. En utilisant des feuilles d'ananas et des grappes de fruits de palmier à huile, ainsi que l'ajout de ciment comme liant (Chan, 2011), on a constaté une légère diminution de la densité, ce qui a entraîné une amélioration des caractéristiques d'absorption. La résistance à la compression augmente lorsque les taux de feuilles d'ananas augmentent, mais à certains taux élevés, la résistance commence à diminuer progressivement. Toutes les briques ont présenté une résistance à la compression minimale, conformément aux normes britanniques. (Phonphuak & al, 2011), ont opté pour une combinaison de charbon de bois et d'argile. L'augmentation du taux de charbon de bois a entraîné une augmentation de l'absorption d'eau et de la porosité apparente. En revanche, la taille apparente et la résistance à la compression sont diminuées. La cuisson des briques à une température de 950°C permet d'améliorer leur solidité, leur porosité et leur résistance. Dans une étude menée par (Binici & al, 2007), ils ont ajouté des fibres plastiques, de la paille et du tissu en polystyrène, ainsi que de la pierre ponce basaltique, du ciment et du gypse. En utilisant des fibres plastiques, la résistance à la compression a été améliorée et en utilisant de la pierre ponce basaltique, le coefficient de conductivité thermique a diminué. Toutes les briques à fibres renforcées respectent les normes ASTM et présentent les caractéristiques techniques requises en termes d'isolation thermique et de propriétés mécaniques optimales.

(Ayodele & al, 2019), ont effectué une étude sur les cendres de sciure et les coquilles d'œufs en raison de leur teneur élevée en SiO₂ et en calcium. Le mélange de sciure et de coquilles d'œufs présente une solution viable pour remplacer le ciment en tant que stabilisateur pour les briques de latérite dans le cadre de logements à bas coût. Selon (Alabduljabbar & al, 2021), il a étudié les avantages de la sciure de bois prélevée à partir de copeaux de bois. Ces briques d'argile ont été montrées plus légères, plus absorbantes et moins solides. Dans leur étude, (Dondi & al, 1997) ont également examiné le recyclage de la sciure de bois provenant de l'industrie de la construction, avec des particules inférieures à 2 mm. Il a démontré une amélioration de la maniabilité et une réduction du temps de séchage, mais il peut également causer des difficultés lors de la fabrication et du séchage. De plus, l'augmentation de la quantité d'eau a entraîné une diminution de la résistance. Selon (Kadir, 2012), le produit final était plus léger et présentait des performances thermiques et acoustiques améliorées. Afin de profiter des avantages économiques et technologiques, il est conseillé d'utiliser seulement de petites

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

quantités de sciure. Des effets secondaires peuvent aussi survenir en raison des émissions de gaz toxiques lors de la cuisson et de la formation d'efflorescences.

(Demir & al, 2005), ont également utilisé les résidus de fabrication de pâte kraft en ajoutant des quantités de plus en plus importantes. Jusqu'à 5 % de résidus, la résistance à la flexion à sec a augmenté, la porosité a augmenté et sa nature organique combustible a renforcé la chaleur au four. Les grandes quantités ont entraîné une diminution de leur résistance à la compression, mais elle reste conforme aux normes. Selon (Kazmi & al, 2016), ils ont fabriqué des briques en utilisant 5 % de déchets (comme des cendres de balle de riz et des cendres de bagasse). Ils ont constaté une baisse de la capacité de compression et du module de rupture. Ils ont cependant répondu aux exigences des briques de construction en respectant les normes ASTM. La résistance à la porosité et à l'efflorescence a également été améliorée. La légèreté des briques peut entraîner une diminution des dépenses structurelles et des économies. Une autre étude a été menée en utilisant du sulfate d'alumine et de la chaux pour extraire la cendre de bagasse (Prabhu & al, 2019). Les produits issus du sulfate d'alumine présentent une plus grande solidité, des résistances à la compression acceptables, des coefficients de ramollissement plus élevés, des taux d'absorption d'eau plus faibles et une compaction efficace. D'après (Dondi & al, 1997), il y a des déchets supplémentaires tels que la laine fibreuse et les boues utilisées pour traiter les eaux de lavage de la laine. Dans le processus de fabrication des briques, ces déchets permettent d'économiser beaucoup de carburant. Les briques sont plus légères, plus efficaces dans l'absorption d'eau, mais plus faibles en résistance à la flexion en utilisant des textiles. Cependant, la majorité des désavantages sont associés aux coûts de transport et d'emballage. Quant, aux déchets minéraux et inorganiques (Achik & al, 2019), ont opté pour l'expérimentation de la cendre de pyrrhotite et de la sciure de cèdre. Ils ont réussi à obtenir des briques légères et poreuses d'une couleur rouge naturelle. En raison de déchets organiques, les briques deviennent plus poreuses, mais elles respectent les normes européennes et leur résistance à la compression reste supérieure à 7 MPa. Toutefois, des recherches montrent qu'ils entraînent une erreur excessive en provoquant des dommages importants dans le temps. Les substances chimiques présentes dans les déchets altèrent la forme des briques et entravent un recyclage respectueux de l'environnement. Selon les résultats de l'étude réalisée par (Xin. & al, 2021), il a été prouvé que l'emploi de verre usagé broyé permet de réduire la température de cuisson tout en préservant la résistance des briques. En outre, l'accroissement de sa quantité et la diminution de sa granulométrie ont amélioré considérablement les caractéristiques physiques/mécaniques des briques cuites, notamment la résistance à la compression. La conductivité thermique a été positivement améliorée par la concentration en verre. C'est donc une solution pratique et envisageable pour fabriquer un matériau de construction écologique et résoudre un problème de déchets de plus en plus préoccupant. Selon l'étude menée par (Aneke & al, 2018), ils ont examiné l'impact des dolomitiques, de la fumée de silice et du sable de rivière en utilisant différents rapports en fonction du taux de déchets de cendres volantes utilisés dans la production de briques. Ils ont découvert que ces déchets témoignent de bonnes performances des briques en tant qu'élément porteur. Le poids volumique unitaire, la capacité d'absorption, la densité apparente et le volume poreux ont été réduits. Les briques obtenues sont respectueuses de l'environnement, cependant leur production nécessite des températures

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

élevées, tout comme la production des briques en argile traditionnelles, ce qui entraîne une consommation d'énergie et des coûts élevés. (Alonso-Santurde & al, 2012), ont également réalisé des tests avec le sable vert et le sable de fonderie afin de fabriquer des briques en céramique. Il a été démontré que les briques d'argile/sable vert cuites à une température de 1050 °C présentent les caractéristiques physiques les plus performantes. Les proportions les plus recommandés est de 35 % de sable vert et de 25 % de sable de noyau. Quant au sable fin (Balogun & al, 2021), les résultats ont démontré une diminution de la porosité, de l'absorption d'eau, de la perte de poids, et même une augmentation de la masse volumique apparente en corrélation avec l'augmentation du pourcentage de sable. Les performances thermiques ont également été améliorées. Par ailleurs, la résistance des briques à l'humidité et aux chocs diminue. Ces briques sont appropriées à des zones sèches et arides. La résistance et la densité apparente ont été améliorées par rapport aux spécifications standards tandis que les taux de retrait lors du séchage et de l'absorption d'eau ont diminué, confirme (Murathan, 2022). (Adediran & al, 2021), ont aussi révélé que l'ajout croissant de sable fin et de poudre de verre usagé a entraîné une amélioration des caractéristiques mécaniques des briques. De plus, il a été constaté qu'une proportion plus importante augmente la résistance à la charge dans les briques cuites. (Adediran & al, 2021), ont également mis en évidence que l'incorporation des pourcentages importants de sable fin et de poudre de verre a conduit à une amélioration des caractéristiques mécaniques des briques.

Selon (Oorkalan & al, 2020), l'argile a été en partie remplacée par de la cendre de bois, de la poudre de céramique et de la poussière de marbre. Ils ont conclu que l'ajout de la poudre de céramique a augmenté considérablement la résistance par rapport à la poussière de marbre. La cendre de bois entraîne une diminution de la résistance et favorise l'absorption d'eau. Les briques sont légèrement effleurées, mais l'aspect des briques n'est pas altéré. La substitution de 30 % du matériau argileux est extrêmement avantageuse et l'emploi de cendre de bois, de poudre de céramique et de poussière de marbre s'est avéré très efficace. D'après (Muhammad & al, 2021), les briques contenant de 5 à 20 % de poudre de marbre présentent une résistance à la compression conforme aux normes internationales. La résistance à la compression et la masse volumique apparente ont baissé, tandis que l'absorption d'eau et la porosité ont augmenté avec une quantité plus importante de poudre de marbre. Confirme (Rasool & al, 2023), l'emploi de poudre de marbre entraîne une diminution du poids, ce qui rend la structure plus légère. Les résultats d'analyses de compression et de gel-dégel sont conformes aux normes ASTM C67. En ajoutant 12 % de poids d'argile, il est possible d'améliorer la production de briques en terre cuite, tout en diminuant les déchets environnementaux et assurer la durabilité et l'économie de l'industrie de la construction. Selon une étude menée par (Kadir, 2012), des déchets de poudre de sciage de granit et de marbre ont été analysés. . Les résultats ont démontré que les particules les plus fines et l'homogénéité du mélange augmentent la densité apparente et la résistance. Les taux d'absorption d'eau et de porosité diminuaient également en raison de la quantité de déchets et de la température de cuisson élevée. Les pores sont généralement remplis et obstrués, ce qui diminue la porosité et l'absorption d'eau. Il est envisageable d'ajouter jusqu'à 50 % du poids des matières premières d'argile des briques des déchets de sciage de granite et de marbre, tout en

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLÉMATIQUE DE CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.

conservant les caractéristiques mécaniques requises. La proportion de 20 % du poids des déchets est la plus appropriée.

Quant à la cendre de pyrrhotite (Achik & al, 2021) ont révélé que, ce déchets est de forme sphérique et lisse, avec une forte teneur en Fe_2O_3 et SiO_2 , ainsi que des agents fondants, des agents colorants et des éléments pouzzolaniques. Les briques produites sont rouges. La quantité d'eau requise pour la fabrication des mélanges et leur retrait sont faibles. De plus, la résistance à la flexion, la masse volumique visible et la porosité ont légèrement augmenté. Finalement, l'emploi de déchets jusqu'à 30% est idéal pour créer un nouveau matériau qui satisfait aux exigences technologiques établies par les normes européennes et ASTM. (Dominguez & al, 1996), ils affirment que la poussière d'acier a été employée afin de fabriquer une brique écologique et ayant de bonnes performances commerciales. Après avoir obtenu des résultats prometteurs, un prototype de brique commerciale à 20 % de poussière d'acier a été produit. Les résultats des tests de lixiviation EP-TOXIC et TCLP sont conformes aux normes commerciales courantes, et le processus céramique produit peu de gaz toxiques. La présence de poussière d'acier réduit la température de cuisson du procédé céramique, ce qui est conforme aux critères de recyclage de l'EPA pour l'élimination des déchets dangereux. (Karayannis & al, 2016), ont opté pour la poussière de four à arc électrique de l'industrie sidérurgique. En utilisant la poussière provenant des fours à arc électriques de l'industrie sidérurgique. D'après les résultats obtenus, il est possible de produire des briques cuites contenant jusqu'à 15 % de déchets sans changement significatif de leurs caractéristiques technologiques et de leur conductivité thermique. Un niveau de déchets accru pourrait compromettre la qualité des produits finis. La porosité ouverte ne se modifie que légèrement avec l'ajout de poids de poussière. Lorsque la température de cuisson augmente jusqu'à $1050^{\circ}C$, on observe une légère augmentation de M.O.R. et de conductivité thermique (pour les briques chargées de 10 % en poids) en raison d'une densification accrue et d'une cristallinité plus élevée. D'après (Dondi & al, 1997; Kadir, 2012), l'incorporation de déchets de raffinerie de pétrole dans les corps des briques permettait d'économiser du carburant en raison de sa grande valeur calorifique. Les essais ont montré que les diverses caractéristiques étaient maintenues, à l'exception de la résistance à la flexion. Les propriétés d'isolation thermique satisfaisantes ont été obtenues grâce à l'augmentation de la porosité, avec une concentration de 1 à 2 % de cire de pétrole. Malgré une légère baisse de la résistance mécanique, elle encourage le processus de séchage et la cuisson. Dans la même optique, (Singh & al, 2022) a réalisé une expérience de réutilisation des anciennes décharges, qui ont été mises en place en raison d'une approche structurée de la gestion des déchets solides municipaux. Il ressort des résultats que la densité et la conductivité thermique des briques diminuent, ce qui offre des avantages en matière de transport et d'économie d'énergie. L'augmentation de la température entraînait une augmentation de la résistance à la compression. Finalement, l'argile pouvait être substituée jusqu'à 23 % à $1\ 000^{\circ}C$, et les tests de lixiviation ont démontré que les briques cuites produites peuvent être utilisées sans aucun risque environnemental.

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : PROBLEMATIQUE DE
CHOIX DE MATERIAUX, DANS LE CADRE D'UNE
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE.**

4. CONCLUSION

Dans le premier chapitre, la question de choix des matériaux de construction dans un contexte de crise environnementale est largement abordée. On a fait le tour des capitales données essentielles et indispensables pour cerner la corrélation entre l'élimination des déchets et la durabilité dans le secteur de fabrication des matériaux de construction. Il était nécessaire, voire impératif de procéder à des notions comme le développement durable et l'économie circulaire dans le secteur des matériaux de construction, la gestion de la crise environnementale liée à l'industrie et sa résolution par l'implication du secteur de la construction voir l'industrie de céramique, ou encore l'utilisation de déchets pour produire des matériaux locaux, sains et respectueux de l'environnement, contribuaient à réduire l'empreinte écologique des secteurs de l'industrie et de constructions. La finalité établi que les nations développées, ont instauré des règles rigoureuses, en optant pour une approche de sélection des matériaux renouvelables, recyclables et surtout durables, dans le but de diminuer l'impact sur l'environnement et de diminuer la dépendance aux ressources fossiles. Ou il a été conclu que cette mobilisation à l'échelle mondiale et nationale reste cruciale pour relever ce défi environnemental, en tirant parti de l'innovation et encourager également la recherche dans le secteur de la construction pour produire des matériaux durables. Un processus où l'Algérie s'engage malgré les difficultés rencontrées. De nombreux travaux scientifiques et techniques ont été menés et ont validé l'utilisation de briques respectueuses de l'environnement pour les différentes opérations à réaliser pour les nouvelles constructions ou même le bâti historique. En bref, les connaissances acquises constitueront une base scientifique pour approfondir notre thématique, qui cherche à résoudre un problème économique et environnemental, en explorant la possibilité de la fabrication de briques à partir de déchets dans un contexte plus large, allant de la construction à la réhabilitation, une question qui sera traitée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II
LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE
L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE.

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

Dans ce chapitre, la problématique de choix de matériaux de réhabilitation, dans le cadre d'une crise environnementale au point de vue secteur du bâtiment a été mis en exergue. D'autres concepts ont également été pris en considération, allant des facteurs pathologiques, des méthodes de diagnostic et des mesures correctives jusqu'aux prescriptions des interventions adéquates. Les recherches antérieures sur l'utilisation de briques stabilisées dans le domaine du bâtiment, en particulier en réhabilitation, ont été récapitulées.

1. PRÉAMBULE

Le deuxième chapitre étudie en profondeur les divers acteurs qui gouvernent la fabrication de matériaux « écologiques » pour la fabrication de briques cuites stabilisées de réparation ou de réhabilitation. Cela permet de remédier à la pénurie de matériaux adéquats pour la réhabilitation tout en réduisant au minimum l'empreinte écologique. Par ailleurs, son but est d'atteindre les objectifs de développement durable, en particulier le neuvième objectif qui encourage la construction d'infrastructures résistantes, ce qui encourage une industrialisation durable et stimule l'innovation (Romero Quidel, 2023). Pour bien encadrer cette thématique, on a opté pour quatre parties dans ce chapitre. Dans une première partie, on a remis en question le concept de réhabilitation écologique. En se basant sur des études précédentes menées par des experts du domaine à travers le monde, nous cherchons à réhabiliter les bâtiments historiques en maçonnerie de manière écologique tout en luttant contre une consommation irrationnelle des ressources naturelles et la destruction de l'environnement. Une deuxième et une troisième partie ont été consacrées, aux facteurs de risque et toutes changements affectant les matériaux poreux, notamment les briques en terre cuite, ainsi qu'à quelques méthodes de diagnostic non destructives utilisées in-situ en fonction des cas. Une quatrième et dernière partie repose sur un cadre général de l'ensemble du processus, une approche qui ne peut se limiter à la question de la pathologie, de la méthodologie et de l'intervention, mais qui doit prendre en compte les aspects du savoir-faire, de l'environnement et de la gestion durable des ressources naturelles et des déchets pour la fabrication des briques d'argile cuite destinées à la réhabilitation. Toutefois, notre proposition de méthodologie de diagnostic et d'intervention peut être bénéfique pour la création d'un outil d'assistance à la réhabilitation des structures en maçonnerie. Cette méthode a été améliorée dans ce chapitre en lui donnant une dimension globale et en introduisant la notion de recyclage des déchets de démolition des structures.

2. REHABILITATION DES STRUCTURES HISTORIQUES EN MACONNERIE

2.1. Le concept de la réhabilitation écologique des structures historiques

Tout d'abord, un édifice historique témoigne d'un élément unique dans un parc immobilier existant, qui doit répondre à des critères spécifiques tels qu'un âge spécifique, ainsi qu'une intégrité et une importance réelles (Mazzarella, 2015). Il doit donc avoir au moins 50 ans (Pérez-Lombard & al, 2008), respecter tous les critères physiques qui étaient présents depuis sa

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

création (Ma & al, 2012), et être distinct en raison de sa valeur probante, historique, esthétique ou culturelle (Cantin & al, 2010). Seulement en respectant ces trois critères, il est envisageable de qualifier l'édifice de bien historique désigné. Les bâtiments anciens seront soumis à des principes et des pratiques de conservation établis par les autorités locales et internationales expérimentées, dans le but de préserver à la fois l'ensemble du tissu historique et la particularité du bâtiment. Les directives ont donc pour objectif de restaurer cet héritage établi, ce qui est accompli au niveau national grâce à des règlements d'application spécifiques (Webb, 2017). Une réhabilitation dans son figure connue, nécessite une étude de cas qui comprend la collecte de données, l'identification du problème et la sélection de la solution adéquate (Kumar & al, 2020). Cependant, lors de sa dix-septième session, en 1972, les prestations de l'UNESCO ont établi les conditions de protection des bâtiments d'une valeur exceptionnelle, en commençant par une convention nécessitant l'approbation et l'application de tous les États membres. Dans sa nouvelle version de 2005, des prestations ont été prises pour aider les États pour faire face aux dangers qui menacent le patrimoine culturel et naturel, en adoptant des mesures juridiques, scientifiques, techniques, administratives et financières adéquates pour le préserver et le faire revivre. De plus, une assistance à la création de centres de formation nationaux et régionaux, dans le but de préserver le patrimoine et de favoriser la recherche scientifique dans le même contexte (أبو الهيجاء, 2011). En parallèle, sur le plan environnemental, l'industrie des matériaux de construction a un impact considérable sur l'écosystème. Il est essentiel que les interventions, y compris celles de réhabilitation, soient non seulement pérennes dans le temps, mais aussi capables de favoriser des mécanismes vertueux sur le territoire. Certaines chercheurs tels que (Kohler & al, 2002) soulignent l'importance de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du bâtiment ainsi que celui de ses matériaux/composants.

D'un point de vue scientifique, des travaux antérieures (Azil & al, 2022), ont étudié de façon timide les performances des matériaux employés dans la réhabilitation des bâtiments historiques et traditionnels, sans approfondir ni étudier en profondeur les critères, les méthodes et les processus utilisés pour évaluer la pertinence des performances et la gestion durable des matériaux de rechange. Un certain nombre d'initiatives récentes ont été mises en œuvre pour développer des outils d'orientation et de prise de décision permettant de prendre les meilleures décisions pour une éco-réhabilitation. Il faut se focaliser sur les critères essentiels utilisés pour évaluer le processus de réhabilitation approprié aux bâtiments historiques et traditionnels, en soulignant les éléments clés et les stratégies de réhabilitation qui y sont associés, tout en mettant en avant l'aspect environnemental dans le processus.

2.2. Le concept de l'éco-réhabilitation et le développement durable

Des scientifiques tels que (Power, 2010; Megahed, 2014; Akande & al, 2016; Abo Lila & al, 2017) ont souligné une forte corrélation entre la restauration ou la rénovation du patrimoine immobilier et la préservation de l'environnement. Ils se sont concentrés principalement sur l'amélioration des performances des matériaux anciens, en se basant sur les recommandations de la charte de Burra et de Venise (De Gregorio & al, 2023) qui ont souligné l'importance d'équilibrer les actions de préservation et de se tourner vers une amélioration plus approfondie des biens (Adams, 2014; Zhou & al, 2022; De Gregorio & al, 2023). Pour y parvenir, des études approfondies ont été indispensables afin de saisir pleinement le concept dans tous ses aspects (Cessari & al, 2012; Dişli & al, 2023). Dans les travaux de recherche, on a découvert une base de données qui traite des informations spécifiques sur les éléments et matériaux historiques de

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

valeur, ainsi que des données sur leur cycle de vie, leurs performances résiduelles et potentielles. Il s'agit là d'une précieuse ressource, car il nous permet de saisir leur réaction face à des conditions limites particulières liées aux événements terrestres. (De Gregorio & al, 2023). Avant toute réhabilitation, il est essentiel de saisir l'histoire du bâtiment pour obtenir des informations pertinentes pour identifier les caractéristiques des matériaux, ainsi que les matériaux et les techniques de construction qui lui sont liés. Il convient de faire une distinction entre les phases évolutives de valeur qui doivent être préservées en utilisant des matériaux compatibles pour reconstituer leur valeur symbolique (Pantini & al, 2020; Silva & al, 2022). Il faut mentionner que dans le cas de processus de production artisanal, un contrôle de qualité empirique et non scientifique ne permet pas de prédire les performances, ce qui peut être surmonté par l'analyse des matériaux anciens. Grâce à l'expertise artisanale du matériau unique, nous pouvons obtenir des données sur ses performances, ce qui nous permet de déterminer la classe d'utilisation pertinente (Brol & al, 2015). En second lieu, et comme nous l'avons déjà souligné, l'industrie a un impact important sur l'écosystème. Les interventions, y compris celles de réhabilitation, doivent donc être non seulement efficaces, mais aussi capables de favoriser des mécanismes vertueux sur le territoire et l'économie. Il est donc primordial de mettre en relation la durabilité environnementale lors de la réhabilitation, en favorisant des solutions de préservation du patrimoine architectural dans un cadre d'économie circulaire (Larsen & al, 2022). Cette méthode tire largement son inspiration des nouvelles directives, comme celle du Pacte vert, qui a été présenté en mars 2022, qui a instauré des mesures comme un plan d'action axé sur l'économie circulaire pour diminuer les déchets et rendre les produits plus durables. L'objectif est de passer du concept de « production-utilisation-déchets » à un concept de « production-utilisation-déchets-réutilisation ». L'enjeu majeur de cette approche est de pouvoir respecter les normes de qualité et de compatibilité des matériaux de rechange lors d'une valorisation des déchets dans des nouvelles production (European Commission, 2022). Un second concept, à prendre en compte dans cette démarche, est celui d'Eco-réhabilitation qui repose sur la collaboration des connaissances et des techniques de réhabilitation en accord avec la notion de développement durable, selon l'Agenda Habitat et la Charte de la Terre, en particulier l'Agenda 21 pour la Construction Durable, dont il est essentiel de mettre en œuvre les principes de développement durable dans toutes les actions, depuis l'extraction et la valorisation des matières premières jusqu'à l'aménagement urbain et la gestion des déchets, entre autres (ECO-ARQ). Leurs principales recommandations consistent à instaurer quelques règles nouvelles dans le processus de réhabilitation, en favorisant un équilibre entre développement durable (économie et énergie) et identité culturelle (matériaux, techniques), en intégrant de nouveaux matériaux et compétences aux connaissances et techniques traditionnelles, et surtout en intégrant le monde scientifique et technologique dans le domaine de l'éco-réhabilitation. (ECO-ARQ).

2.3. Le processus de la réhabilitation des structures historiques en briques cuites

Il est communément admis que la brique cuite est l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus courants, en raison de la disponibilité des matières premières et la facilité de sa production. La présence de structures architecturales en maçonneries très complexes

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

témoigne de l'adoption de cette technologie depuis des siècles. (Cultrone & al, 2005), dans son étude, confirment que certains sites patrimoniaux en briques ont encore conservé leur embellissement depuis des milliers d'années, tandis qu'une grande partie sont endommagées et même détruites et dévastées. Ce niveau de détérioration peut varier considérablement et nécessite dans plusieurs cas le remplacement des parties manquantes par des briques réutilisables en bon état ou une brique compatible. La compatibilité est un critère essentiel à maintenir afin de préserver la structure historique. Les matériaux de construction des briques issus de bâtiments historiques démolit sont largement réutilisés. Toutefois, il n'existe pas d'entreprises spécialisées dans la collecte de ce genre de matériaux en Algérie, et la quantité requise sur le chantier est insuffisante et difficilement assuré (Monserrat & al, 2022). Néanmoins, de nombreuses entreprises ont essayé de les restaurer en utilisant les briques disponibles sur le marché, mais cela n'a pas été concluant. Étant donné la perte considérable d'authenticité causée par l'utilisation de solutions et de matériaux inadaptés et l'incompatibilité fonctionnelle des matériaux sélectionnés sans avoir été soumis à une évaluation expérimentale de leur efficacité (Mishra & al, 2021). Une situation qui a suscité autant d'intérêt chez les chercheurs qu'elle est devenue récemment un sujet d'actualité. Il convient de remplacer les briques d'origine par des matériaux adaptés afin de préserver la structure historique. D'après (Elert & al, 2003) de nombreuses études sont réalisées afin de saisir les codes des caractéristiques des constructions en maçonneries. Il n'est possible de résoudre les mystères de la briques anciennes qu'en analysant sa structure de manière statistique, dimensionnelle, fonctionnelle et compositionnelle. Une série d'essais rigoureux, à l'aide de méthodes et d'analyses physico-chimiques, de tests mécaniques, chimico-minéralogiques et microscopiques, etc., est nécessaire (De Bonis & al, 2014). Dans son étude scientifique, (Lucchi, 2016) a suggéré une méthode de conception basée sur les résultats analytiques et la compréhension des performances des matériaux anciens. D'autres chercheurs, tels que (López-Arce & al, 2005), soulignent l'importance de saisir les aspects historiques, techniques et environnementaux afin de bien choisir les techniques de restauration adaptées aux bâtiments historiques en briques, et de définir une norme de comparaison appropriée pour la catégorisation et l'identification des briques historiques. Pour mieux expliquer le concept, des études comme (Binici & al, 2020) ont souligné que grâce à ce processus, nous pouvons les classer en sorte de famille, tout comme celles de la forteresse anatolienne construite pendant la période ottomane aux XIIIe et XIVe siècles. Elles sont à 1,66 g/cm³, à 32,4 % de porosité et à un taux d'acquisition de 19,5. Toutefois, celles des XIVe et XVe siècles sont évaluées entre 1,7 et 1,8 g/cm³ et avec une porosité de 33 à 37 %. La finalité sera de constituer une base de données scientifique pour obtenir des briques adaptées aux applications de restauration à effectuer dans la région, en utilisant ces données.

2.4. Le concept de stabilisation des briques cuites, dans le domaine de la réhabilitation

La distinction entre la réhabilitation et l'éco-réhabilitation peut résider dans le fait que les autorités et la population sont encouragées à prendre conscience de la valeur de leur héritage historique ainsi que leur environnement, en éprouvant l'importance de préserver un aspect culturel et historique mais d'une manière écologiques et durable. Cependant, pour une

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

réhabilitation écologique efficace des anciennes structures en maçonnerie, il est essentiel de bien expérimenter ces briques historiques (Medjelekh & al, 2020). (Borri & al, 2015; Binici & al, 2020) mettent également en évidence l'importance des données fournies par les examens visuels, physico-mécaniques et microscopiques pour comprendre l'identité des briques étudiées et les constituants dominants dans la composition du mélange, ainsi que d'autres éléments (Rovero & al, 2009), afin de trouver des solutions pour gérer efficacement les déchets compatibles lors de la fabrication de nouvelles briques.

Toutefois, avant d'atteindre cette étape, il convient de mettre en évidence les particularités des matériaux anciens qui sont évoquées auparavant d'une manière timide dans la littérature (Medjelekh & al, 2020). En citant que l'époque romaine a utilisé les carbonates pour produire de la « terra sigillata ». Le sel a garanti la durabilité du produit, tandis que des grains de NaCl ont été employés pour fabriquer de l'argile à base de pâtes carbonatées. Les déchets à ajouter sont choisis en fonction du type d'argile et de la température de cuisson. Il est ainsi primordial de mener une étude pluridisciplinaire pour choisir les déchets à utiliser dans la production des briques de rechange les plus adaptées lors de la réhabilitation (Cultrone & al, 2005).

Cela implique principalement une réhabilitation durable qui nous permet de transférer les valeurs matérielles et immatérielles des bâtiments, tout en préservant a priori les ressources naturelles requises. Plus spécifiquement, nous étudions les dimensions de la durabilité des matériaux anciens et nouveaux, leur réutilisation dans le cadre du projet de réhabilitation, la traçabilité pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la carte d'identité des matériaux et leurs composants. Grâce à la mise en place de cette approche novatrice, les experts du secteur ont été conscients de l'importance des choix qui présentent des avantages environnementaux et économiques. Plusieurs expériences ont été menées dans le but de créer une brique "écologique" qui aide à résoudre le problème du manque de matériaux adaptés à la réhabilitation en utilisant des déchets comme stabilisants, tout en réduisant l'impact sur l'environnement et en atteignant en même temps les objectifs de développement durable (Romero Quidel, 2023). Nous avons enregistré une série d'expériences dans la littérature pour mieux expliquer ce concept dans la section suivante.

2.5. La stratégie de réhabilitation durable des briques cuites historiques dans la littérature

Comme mentionné préalablement, la littérature a mis en évidence l'état critique dans lequel se trouvent de nombreux centres historiques en briques à travers le monde. La conservation a été largement compromise par les difficultés rencontrées dans la sélection des matériaux alternatifs et l'ignorance des critères de performance spécifiques nécessaires aux nouveaux matériaux. Afin d'obtenir des briques cuites compatibles de qualité supérieure, de nombreuses recherches ont été réalisées sur l'utilisation des déchets industriels comme substitut dans diverses pâtes. Étant donné que l'argile a toujours été rectifiée afin d'obtenir des briques cuites adéquates et à prix abordable à partir de déchets. L'accent est mis sur la durabilité de la maçonnerie en briques stabilisées dans le cadre d'une étude des briques monumentales historiques de la région de Haryana, dans le sous-continent indien, datant des 14-18^e siècles de notre ère (Mishra & al, 2021). Une analyse géochimiques et microstructurale (XRF, XRD,

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

FTIR, TGA et SEM) a été effectuée dans un premier temps afin de déterminer les matériaux et les techniques de fabrication utilisées. Les résultats indiquaient que les briques étaient de nature hydraulique, contenant une quantité élevée de silice et peu de calcium, avec un faible retrait et des caractéristiques mécaniques de grande qualité. Elles sont fabriquées de façon traditionnelle et cuites à une température de 900°C. La composition géochimique des matières premières ont également été révélées par ces résultats. Quand à (De Bonis & al, 2014), il a utilisé différentes technologies afin d'évaluer le potentiel technologique de deux types d'argiles pour la fabrication de céramiques archéologiques. Afin d'obtenir les informations et les détails fondamentaux, il a réalisé une analyse scientifique des céramiques anciennes en termes de technologie et de provenance, dans le but d'enrichir les connaissances existantes sur la fabrication traditionnelle de la céramique, étant donné que les échantillons de céramique ont été analysés à l'aide de techniques minéropophysiques. (Medjelekh & al, 2020), ont publié une étude sur la restauration de l'habitat patrimonial dans les centres historiques de Cahors (France), Porto (Portugal) et Vitoria (Espagne). Une étude hygrothermique, des caractéristiques structurelles et des données physico-chimiques et mécaniques ont été réalisées. Le rapport final a montré que l'âge, la composition minéralogique, le processus de fabrication, le niveau d'humidité et les conditions environnementales dominantes sont des éléments qui entraînent des fluctuations et contribuent à la préservation des matériaux anciens. Avec la possibilité d'évaluer le comportement des matériaux anciens, il sera possible de prendre les bonnes décisions de traitement pour ces matériaux.

Dans sa recherche sur les briques historiques en maçonnerie patrimoniale, (Lucchi, 2016) a adopté une méthodologie de recherche basée sur la sélection de maçonneries traditionnelles et l'expertise combinée des matériaux. La réalisation d'une étude expérimentale rigoureuse permettra d'utiliser les résultats des études des maçonneries en briques historiques pour la fabrication de matériaux compatibles. (Binici & al, 2020), dans leur étude sur les briques employées dans les structures historiques du site de Harran, en Turquie. Il a souligné l'importance de la collecte d'informations à divers niveaux et il propose une méthode de classification basée sur l'époque de la production, les technologies actuelles, la main-d'œuvre et les ressources, ainsi que les conditions environnementales. Il a également entrepris la caractérisation mécanique des matériaux, ce qui représente une information essentielle pour les futures analyses sur la vulnérabilité et la mise en place d'interventions de préservation. À leur tour, (Borri & al, 2015), ils ont proposé une méthode pour classer et analyser les diverses catégories de maçonnerie historique. Différents critères de classement essentiels ont été abordés et évalués, tels que les matériaux essentiels, la conformité de la maçonnerie, l'harmonie du matériau avec les composants, les types de mortier et bien d'autres encore. Les résultats des analyses ont été utilisés pour de nombreuses expériences expérimentales ultérieures, réalisées au cours des vingt dernières années, afin de développer une norme de comparaison adaptée à la classification et à l'identification des briques historiques. (Rovero & al, 2009), ont mené des études sur la procédé de construction employée dans la construction de Shali, l'ancienne forteresse érigée au XIIe siècle à Siwa, une oasis du désert occidental égyptien. La composition et la mécanique des matériaux de construction de maçonnerie ancienne et récente ont été étudiées. Une méthode d'enquête fondée sur la connaissance des processus de dégradation qui impactent l'ancien matériau, la sensibilité des acteurs de l'environnement local et l'histoire du

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

site, en prenant en compte la tradition de construction locale et sa vulnérabilité, présente des avantages pour développer les stratégies de sauvegarde les plus efficaces. Dans leur étude, (Fabbri & al, 2014) expose les diverses méthodes utilisées pour expérimenter la calcite dans les céramiques archéologiques. Les différentes composantes supposées de la calcite permettent d'obtenir des informations sur les matières premières, la température de cuisson et la méthode de fabrication des briques, ce qui peut donner des conclusions significatives tant sur le plan technologique que archéologique. Les différentes composantes peuvent être identifiées par des analyses thermiques, chimiques et minéralogiques, ainsi que par des analyses microscopiques comme la microscopie optique polarisante, la diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie infrarouge (FT-IR), l'observation au microscope optique en lame mince. Dans leur recherche (Cultrone & al, 2005), ils ont également examiné l'impact de la calcite, de la dolomite et du chlorure de sodium en tant qu'additifs qui améliorent le comportement physico-mécanique et la composition minéralogique des briques pleines cuites utilisées comme matériaux d'échange dans le domaine de la restauration. Il apparaît que l'identification de l'influence des acteurs impliqués dans la production permet de fabriquer des briques aux caractéristiques préétablies, adaptées à chaque situation de préservation des bâtiments historiques. Il convient de comprendre que le matériau le plus résistant n'est pas nécessairement le plus adapté, car il peut fragiliser les matériaux d'origine en les rendant plus sensibles. Une connaissance suffisante des propriétés des matériaux permettra d'améliorer les performances. La maîtrise des caractéristiques des matériaux permettra alors d'améliorer les opérations de conservation. Selon (Azil & al, 2022), leur étude a porté sur l'analyse de la construction du site vernaculaire dans la région du Souf en Algérie. Ces bâtiments en pierre rose du désert, avec dômes, sont classés sur la liste indicative de l'UNESCO. Le système constructif a été analysé in situ et en laboratoire afin de développer une politique de protection cohérente. Ils ont étudié en détail les techniques de construction et le comportement structurel qui impactent la culture de construction pour élaborer des stratégies de protection et de sécurité adéquates. Les techniques de fabrication des briques grises traditionnelles sont retracées dans les provinces du Jiangsu, du Zhejiang et de l'Anhui. Ces études visent à élucider leurs caractéristiques physiques et chimiques, ainsi que leurs capacités de résistance. Il a été souligné que, malgré l'exposition prolongée des briques anciennes aux conditions météorologiques, elles demeurent une référence dans les travaux de restauration des bâtiments historiques (Zhao & al, 2019).

Pour leur part (Saenz & al, 2019). Ils ont combiné des études minéralogiques et physiques afin d'analyser l'effet des déchets utilisés comme additifs sur la qualité de la brique cuite. Les résultats ont montré que l'emploi de briques à base de déchets ne nuit pas à priori à l'ancien bâtiment. Toutefois, il est probable que leur apparence et leurs caractéristiques physico-mécaniques soient proches de celles des briques d'origine et qu'elles ne présentent aucun danger pour l'environnement. Bien que les résultats soient prometteurs, d'autres expériences avec différentes concentrations d'additifs pourraient apporter des données supplémentaires intéressantes. Dans leurs études, (Elert & al, 2003), les limitations liées à l'interprétation des résultats des tests ont été examinées, ainsi que le manque d'application systématique des normes existantes pour évaluer l'état de conservation des briques historiques et définir des spécifications pour les briques de substitution. Ils ont souligné les disparités notables dans la variation des étapes de la vitrification, ainsi que le niveau de porosité, la répartition et même la

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

taille des pores, en fonction de la composition de la matière première et de la température de cuisson. Les résultats indiquent que des recherches sur la texture et l'hygrométrie des échantillons de briques suggèrent que ces paramètres peuvent être fortement impactés par des variations de composition de mélange crue et de température de cuisson, ce qui permet de fabriquer des briques de substitution pour des utilisations de conservation spécifiques. L'analyse pluri-analytique des briques de la basilique Sainte-Justine de Padoue, réalisée par (Monserrat & al, 2022), à partir d'une approche interdisciplinaire, vise à mettre en évidence les méthodes de fabrication utilisées dans la ville à l'époque romaine, à l'Antiquité tardive et au Moyen Âge, et à identifier les principaux facteurs qui contribuent à la conservation et à la dégradation des briques. Étant donné une approche scientifique rigoureuse basée sur des analyses comme la spectrophotométrie, la X (XRF), la PXR, la POM et la SEM-EDS a été menée. Il a été montré que les briques sont jaunes et en excellent état de conservation global, ce qui suggère que les phases ont été développées à une température élevée, mais qu'un degré de vitrification de faible intensité a été obtenu. Ainsi, la couleur des briques peut être un indice d'une époque de construction spécifique, à partir d'argiles localisées. (Pérez-Monserrat & al, 2021), il est également mis en évidence que même si la couleur des céramiques a permis de repérer les technologies de fabrication des briques historiques des murs, le degré de cuisson peut révéler la qualité, les performances physiques et la durabilité du produit final.

L'identification réalisée signifie que l'analyse nécessite un grand nombre de briques issues de diverses constructions patrimoniales. Il a néanmoins été nécessaire de prendre en compte le niveau d'humidité entre la surface des briques et l'environnement humide à proximité, ainsi que la répartition différentielle des efforts générés à l'intérieur des briques en raison de leur système poreux différent. Finalement, la reproduction des caractéristiques esthétiques d'origine des briques anciennes, tant pour la restauration que pour la construction neuve, serait assurée par des mesures de couleur et par le degré de vitrification qui serait utilisé comme indicateur de la qualité des performances physiques et de la durabilité des briques. Il est donc crucial d'avoir acquis les compétences requises pour fabriquer de nouvelles briques de haute qualité, ce qui contribue à la préservation du patrimoine bâti. Les caractéristiques texturales et micro structurelles des briques ont été associées à leurs performances lors des tests hydriques et de vieillissement. Ces informations permettent d'évaluer la compatibilité des briques avec les matériaux de maçonnerie d'origine (Elert & al, 2003)

Les études scientifiques ont porté sur la restauration de bâtiments historiques en briques cuites en utilisant des briques innovantes et compatibles, fabriquées en ajoutant des déchets de différentes natures à la matière première argileuse. Ce qui est basé sur une approche pluridisciplinaire, qui combine théorie et technique. Elle s'ajuste aux défis actuels, notamment économiques et environnementaux. La restauration est basée sur une analyse approfondie en laboratoire des matériaux anciens et la collecte d'informations sur les matières premières et la technologie de fabrication des briques cuites. Les résultats essentiels permettront tout d'abord de déterminer le comportement des vieilles briques, mais aussi de donner des informations sur la fabrication de nouvelles briques, de prendre la bonne décision de traitement pour ces matériaux de rechange et de répondre aux exigences de compatibilité mécanique (résistance à la flexion et à la compression) et de compatibilité physique, notamment en ce qui concerne le comportement hygrique (absorption capillaire de l'eau), qui est une priorité. La recherche vise

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

également à étudier les effets physiques et mécaniques des briques en présence de déchets particuliers, ainsi que à comprendre les phénomènes de dégradation observés sur l'état de la maçonnerie stabilisée après cuisson. Cela nous aidera à obtenir le maximum d'informations sur l'influence des déchets choisis sur les briques. Les recherches pluridisciplinaires sur les anciennes briques cuites forment ainsi une base de connaissances qui possède une valeur patrimoniale et technologique, pouvant être une ressource de patrimoine culturel. Il serait possible de transférer l'industrie céramique actuelle afin de fabriquer des briques durables de haute qualité. Lors de cette thèse, nous aborderons une expérience qui servira d'approfondir ce sujet en proposant divers dégraisseurs qui sera employés pour corriger les tessons des briques en terre cuites. En étudiant leurs effets sur le comportement et repérant les principaux mécanismes de dégradation en cas de besoin. Cependant, avant de procéder à cela, une partie est consacrée aux différentes pathologies qui affectent ce genre de structures. Des essais et des méthodes d'investigation adaptées à chaque cas sont délicatement proposés, et enfin des recommandations appropriées pour résoudre ces anomalies sont délicatement élaborées.

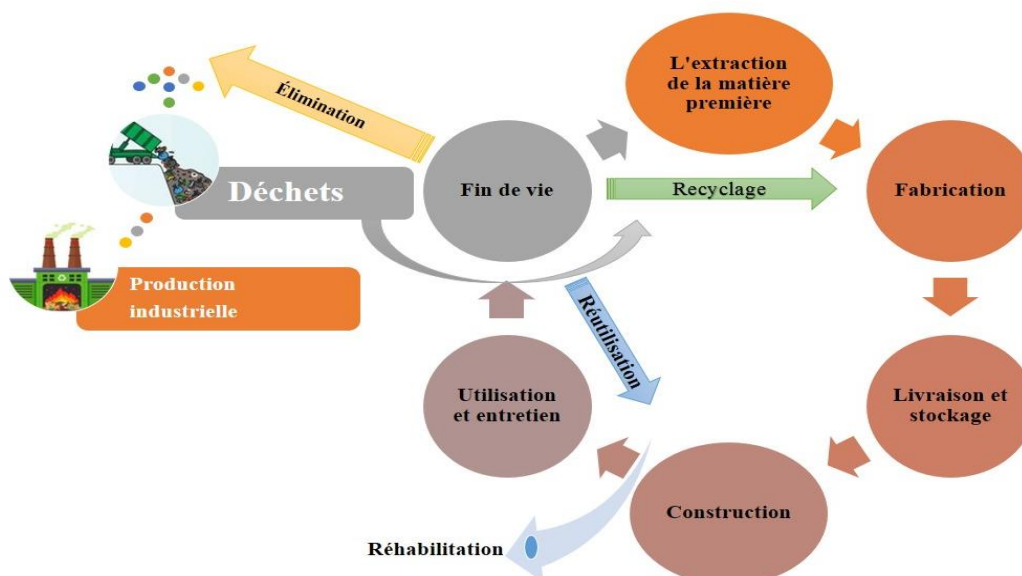


Figure 2 1: Cycle de production des matériaux durables pour le domaine de construction et la réhabilitation.

3. FACTEURS DE RISQUE ET DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX

Toute structure historique en maçonnerie est confrontée à des dégâts interdépendants qui peuvent être résolus grâce à des opérations de réhabilitation (Kumar & al, 2020). Nous présentons dans cette section l'origine, l'apparence et la composition chimique des dépôts et des taches sur les murs des bâtiments anciens, ainsi que leurs conséquences et même d'autres pathologies. Au-delà de la simple question esthétique qui peut être résolue avec un traitement simple, les dommages peuvent avoir un effet profond sur ces structures et entraîner même d'autres problèmes internes. Il est crucial que les professionnels possèdent des compétences en

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

diagnostic afin de planifier de manière efficace la solution de réparation appropriée (Environnement Canada, 1994; Torres & al, 2007).

3.1. Causes des dépôts, des souillures et de la désintégration

Les dépôts, les taches et la décomposition des matériaux sont généralement provoqués par l'humidité, les sels du sol, la pollution de l'air, ainsi que par les agents biologiques et les corrosifs. Selon (Fabbri, 2012), l'humidité joue un rôle d'intermédiaire entre toutes ces problématiques. Il est également possible que certains enduits artificiels entraînent l'émergence de dépôts et de taches qui, bien qu'ils ne soient pas forcément destructeurs, ils restent dégradants. La patine est le produit des différents dépôts sur la surface ou à l'intérieur d'une maçonnerie, qu'il s'agit souvent d'une tache protectrice, inoffensive, d'une couleur agréable et qu'il n'est pas nécessaire de retirer. Le tableau ci-dessous liste les divers éléments environnementaux qui altèrent ou dégradent les matériaux anciens :

Tableau 2 1: Principaux agents ambiants de dégradation, (Environnement Canada, 1994).

Chimiques	Physiques	Biologiques
Oxygène	Énergie de rayonnement	Végétation
Ozone	Chaleur (élevée)	Insectes
Gaz carbonique	Froid (gel)	Animaux
Anhydride sulfureux	Abrasifs	Humains
Hydrogène sulfuré	Eau	
Acides, alcalis, sels	Matière en mouvement	
Eau		
Solvants organiques		

3.1.1. L'humidité

D'après des experts en réhabilitation (Torres & al, 2007), l'humidité est la principale préoccupation des édifices anciens, mettant en péril la préservation et la performance des maçonneries anciennes. Les interactions avec les sels solubles, la pollution de l'air, les agents biologiques, la rouille, la corrosion, la patine et les enduits sont des facteurs qui favorisent les dommages (Sandrolini & al, 2006). Les matériaux sont davantage exposés aux phénomènes de gel-dégel (Fabbri, 2012). Les parois internes des pores favorisent l'attraction des fluides par absorption et des solides par adsorption. Lorsqu'une température baisse, l'eau des pores se gèle et augmente de 10 % de volume, ce qui entraîne des contraintes mécaniques qui entraînent la dégradation des parois des pores et la désagrégation complète des briques. Tout en créant de plaques avec des nuances de couleur et de texture divergentes (Environnement Canada, 1994; Lisø & al, 2007).

3.1.1.1. Type d'introduction et migration de l'humidité dans un matériau poreux

Le principe de migration de l'humidité dans la maçonnerie est influencé par l'action capillaire, la pression osmotique ou la pénétration de la vapeur atmosphérique (Di Tullio & al, 2012).

3.1.1.1.1. Absorption

La maçonnerie retient l'humidité du sol, de l'air ou des éléments de construction adjacents. En présence d'un mauvais drainage (Fodde & al, 2010), l'eau près du mur inférieur d'une construction peut entraîner une augmentation de l'humidité en raison des capillarités. De plus, l'eau de pluie ou de ruissellement entraîne une circulation horizontale de l'humidité dans les matériaux poreux (Killip & al, 1984). Étant donné que l'humidité qui pénètre dans une maçonnerie contient généralement des sels et des substances solubles (Environnement Canada, 1994).

➤ *Action capillaire*

La capillarité d'un matériau poreux se produit lorsque l'eau de bat monte vers le haut, contenant des sels en solution (Fodde & al, 2010). L'opération diffère selon l'environnement et le type de porosité. Plus les pores sont serrés, plus l'eau atteint une hauteur plus élevée. La raison pour laquelle une maçonnerie avec une microporosité élevée présente un risque accru de détérioration (Environnement Canada, 1994).

➤ *Pression osmotique*

En ce qui concerne les pressions osmotiques, qui sont le résultat des actions des solutions de sels solubles à différentes concentrations, dirigées vers la maçonnerie par capillarité. Le phénomène influence la quantité et la direction du déplacement de l'eau, en propulsant l'eau vers le haut pour rétablir l'équilibre entre les solutions salines concentrées. (Environnement Canada, 1994), admettre que l'action a un potentiel très élevé pour transporter l'humidité, pouvant atteindre 10 mètres, dans les vieilles maçonneries.

➤ *Pénétration de la vapeur d'eau contenue dans l'air*

La vapeur d'eau a la capacité de se condenser et d'entrer dans les pores, où une quantité précise est maintenue en équilibre avec l'humidité relative de l'atmosphère (Camuffo, 1995). La condensation survient lorsque la température de la surface du parement diminue ou que le taux de vapeur d'eau augmente (Environnement Canada, 1994).



Figure 2 2: Une détérioration des briques, au contact avec l'eau en raison d'un problème d'étanchéité (Florence & al, 2021).

3.1.1.1.2. Adsorption

L'adsorption se produit lorsque les briques en maçonnerie attirent des atomes étrangers, qui se trouvent dans un état de stimulation qui provoque des réactions chimiques, ou la plupart d'entre

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

elles sont provoquées par la présence d'eau dans les pores (Winkler, 2013). La réactivité de la surface interne d'un matériau poreux est bien supérieure à celle d'un matériau compact (Environnement Canada, 1994).

3.1.1.1.3. Sels solubles

Les matériaux rocheux, le ciment et les mortiers contiennent plusieurs minéraux plus ou moins solubles dans des solvants communs (eau et acides faibles), comme le carbonate de calcium et de magnésium, les silicates, le sulfate de calcium, de magnésium et de sodium, ainsi que divers minéraux argileux (sulfate et chlorure de sodium), à un degré limité. Ils se trouvent également dans le sol, dans l'air marin et dans les excréments des animaux, des oiseaux et des chauves-souris, ainsi que dans les sels dégivants utilisés dans les climats froids (Ahmad & al, 2010; Gentilini & al, 2012). Certains agents nettoyants utilisés peuvent aussi provoquer la formation de sels solubles qui peuvent agir directement sur la surface de la maçonnerie ou être absorbés par la structure poreuse par action capillaire, ce qui entraîne une dégradation de la maçonnerie lors de leur cristallisation (Environnement Canada, 1994; Charola, 2000; López-Arce & al, 2009; Di Tullio & al, 2012).

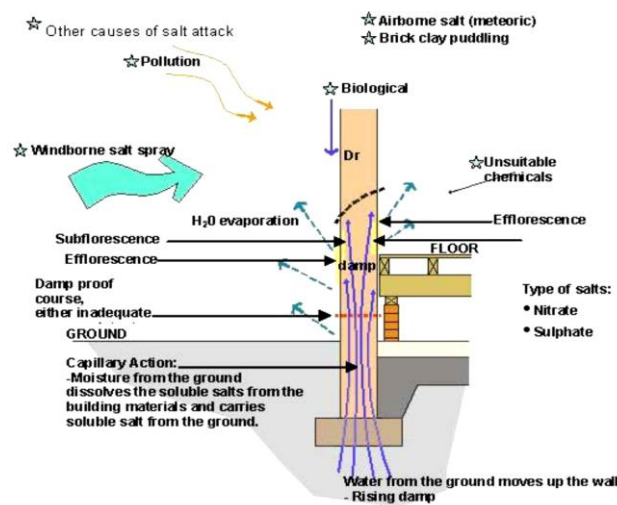


Figure 2 3: Les attaques des sels dans les bâtiments (Ahmad & al, 2010).

Un phénomène de cristallisation qui se produit dans des solutions saturées et extrasaturées. Une fois que la quantité de solvant diminue, les cristaux se dilatent et provoquent une pression mécanique interne qui brise les pores (Environnement Canada, 1994; Fodde & al, 2010; Ahmad & al, 2010).

➤ Efflorescence

Les sels solubles se cristallisent à l'extrémité des pores, ce qui entraîne l'efflorescence en raison d'un déplacement de l'humidité vers l'extérieur de la maçonnerie. Elle se présente sous la forme de taches, de plaques ou de traces de sels blancs ou incolores, qui indiquent les limites de l'écoulement des sels et le niveau atteint par l'humidité qui monte dans la maçonnerie. Les

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

briques cuites riches en sulfates accroissent les risques d'éclatement (Environnement Canada, 1994; Fodde & al, 2010; Ahmad & al, 2010).

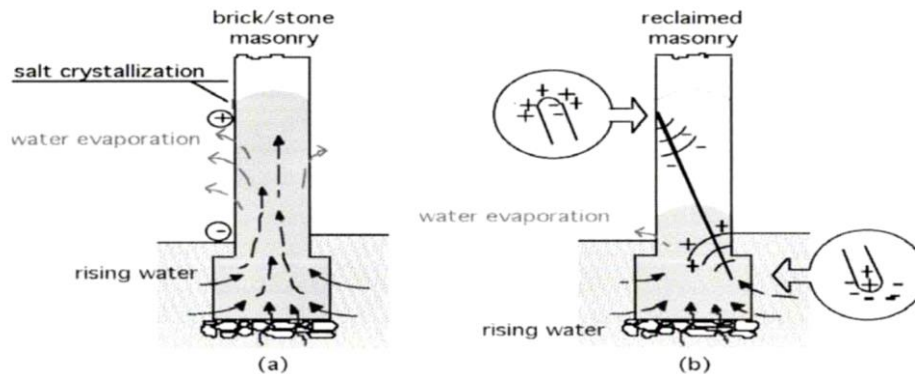


Figure 2 4: Schémas de la polarisation spontanée provoquée dans un mur par l'humidité ascendante (a) ; et effet des auto-inducteurs électrostatiques (b) (Sandrolini & al, 2007).

➤ Subflorescence

La subflorescence, qui a l'apparence et les effets de l'efflorescence, se produit quand les sels se cristallisent juste sous le parement. Elle se produit lorsque les couches superficielles se détériorent et se désagrègent (Environnement Canada, 1994; Fodde & al, 2010; Ahmad & al, 2010).



Figure 2 5: Des taches Subflorescence ou d'efflorescence en couleur blanche sur le mur (López-Arce & al, 2009).

3.1.2. Pollution de l'air

Les particules, les aérosols et les gaz, en particulier les gaz acides, polluent l'air et altèrent les matériaux des maçonneries à carbonate de calcium et à calcite. Les matières solides de combustion (suie, aérosols, gouttelettes ou petites particules en suspension dans l'air) génèrent des acides qui modifient la texture des maçonneries. La présence d'impuretés solides et gazeuses dans l'air urbain entraîne une détérioration accélérée des maçonneries. De plus, la vapeur qui se condense sur les maçonneries attire également les polluants et les aérosols, qui sont extrêmement toxiques. De plus, le vent accentue encore davantage la détérioration des maçonneries (Varotsos & al, 2009). L'association de ces éléments entraîne une décoloration et une désagrégation des parements par cloquage et écaillage. Même l'érosion ou le nettoyage

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

provoquent la dégradation du parement, ce qui laisse les couches plus profondes exposées à une attaque similaire (Unesco, 1968; Camuffo, 1995; Franzoni & al, 2011).

3.1.2.1. Pollution par les gaz et la vapeur

Les polluants les plus nocifs pour la maçonnerie sont le CO₂, le SO₂ et le SO₃. D'abord, la combustion du charbon, du mazout et du gaz naturel produit des sulfates qui émettent du soufre sous forme de SO₂ dans l'air. L'hivernage, les embruns marins et la poussière des plaines arides entraînent une libération significative de sulfates. En exposant au soleil, ils s'oxydent et l'anhydride sulfurique est produit. La réaction d'oxydation est beaucoup plus rapide en présence de monoxyde de carbone (CO) et une humidité relative élevée dans l'air (Johnson & al, 1990). Elle se dissout dans l'humidité en acide sulfurique qui, de son côté, accroît l'acidité de la pluie et de la vapeur d'eau, permettant ainsi à l'acide sulfurique d'atteindre les roches carbonatées et de les transformer en sulfite de calcium ou en sulfate de calcium (gypse). Comme le gypse se dissout beaucoup plus facilement dans l'eau que la calcite, l'eau peut s'emparer de toutes les couches du parement et la maçonnerie se dégrade rapidement (Environnement Canada, 1994; López-Arce & al, 2009; Franzoni & al, 2011). En ce qui concerne le gaz carbonique (CO₂), qui représente plus de 60 % de toutes les émissions industrielles. Le carbonate de calcium se dissout en acide carbonique en solution, ce qui entraîne l'érosion de la pierre de carbonate de calcium. Le CO, très toxique, est produite par la combustion incomplète et joue un rôle de catalyseur dans la transformation des sulfates. Un smog photochimique dissout les roches carbonatées par la dégradation de certains chlorures en acide chlorhydrique, tandis que des nitrates, principalement sous forme de NO₂, se dégradent en acide nitrique corrosif. La présence de sulfate et de carbonate sous les surfaces horizontales exposées à la pluie peut entraîner la formation d'espèces de stalactites. Alors que l'eau de pluie pénètre dans la maçonnerie, des gouttes d'eau passent sous les surfaces horizontales, par la force de la gravité, où elles créent des particules de carbonate de calcium ou de sulfate de la pierre. Ces particules sont regroupées à l'instar des stalactites. La vapeur d'eau de l'air, de la pluie ou de la condensation est généralement un peu acide en raison de la présence de carbone. C'est la raison pour laquelle, peu importe l'atmosphère, il effectue une réaction chimique sur la maçonnerie lorsque la température est élevée (Environnement Canada, 1994; Franzoni & al, 2011). La vapeur d'eau permet aussi de retenir en suspension les particules de carbone, d'oxyde de fer ou de sulfate de calcium (gypse) qui se déplacent sur la maçonnerie. Bien que la principale cause de la dégradation des matériaux compacts à faible porosité est la condensation. Cependant, son impact n'est pas aussi nocive que celui de l'eau de pluie, car elle transporte les substances polluantes et les dépose sur la surface. (Camuffo, 1986; Saiz-Jimenez, 1993; Environnement Canada, 1994).

3.1.2.2. Pollution particulaire

Les particules humides présentes dans l'air des zones industrialisées peuvent réagir de façon alcaline ou acide et être l'objet d'une attaque chimique, en attaquant les matériaux de construction. Il est possible que les particules entrent dans les pores du matériau et entraînent une dégradation durable de l'extérieur de la maçonnerie (Environnement Canada, 1994; Camuffo, 1995).

3.1.2.3. Poussière naturelle

Les particules de poussière naturelle ont une taille de 1 à 100 microns et sont principalement constituées de débris de vent (les lits de cours d'eau asséchés, les plaines d'inondation, les plages, les champs labourés et les chantiers de construction), d'une partie de poussière volcanique et d'une petite partie de poussière cosmique extraterrestre. En présence des acides de l'eau, la calcite de la poussière se métamorphose en gypse (Saiz-Jimenez, 1993; Environnement Canada, 1994).

3.1.2.4. Suie

La suie se lie facilement en raison de sa teneur en goudron. Les éléments saillants des anciennes constructions sont recouverts d'épaisses incrustations noires, à base de suie et de substances chimiques provenant de la maçonnerie ou des parements. Les moellons de grès aussi sont uniformément noircis par la suie présente dans les pores superficiels (Saiz-Jimenez, 1993; Environnement Canada, 1994).

3.1.2.5. Aérosols

Les particules liquides émises par des substances en suspension dans l'atmosphère sont appelées aérosols. Il est possible de les fabriquer à partir de chlorure de sodium issu du sel marin ou de sels dégivrants. Ils s'installent sur la maçonnerie et la dégradent (Saiz-Jimenez, 1993; Environnement Canada, 1994).

3.1.3. Agents biologiques

3.1.3.1. Arbres et plantes

Il est possible que la présence de végétation sur un monument ou dans son environnement entraîne sa détérioration et entrave l'évaporation de l'humidité des murs, ce qui entraîne une humidité anormalement élevée des matériaux à l'endroit où elle pousse et constitue un risque sérieux de dérive rapide. Les racines des végétaux s'étendent sur les surfaces dures, où elles interagissent chimiquement avec les minéraux et extraient les nutriments très rares en s'attaquant à ces surfaces (Winkler, 2013). Ces petits arbres peuvent s'introduire dans les lézardes et les joints de mortier affaiblis des anciens éléments et les détruire. Les pressions axiales sont initialement élevées à l'extrémité des racines, mais à mesure que la croissance axiale est empêchée, la pression radiale augmente sur toute la surface de la racine. L'action de pression, telle qu'un coin enfoncé, élargit les lézardes et les joints, favorisant ainsi une meilleure adhérence à l'humidité (Environnement Canada, 1994).

3.1.3.2. Algues et lichens

Les algues sont des filaments de couleur verte, rouge ou brune qui se forment facilement sur diverses structures. En général, leur apparition indique une humidité élevée sous le parement et on les retrouve fréquemment près des tuyaux de descente pluviale ou sur les parties inférieures des bâtiments qui sont mouillées par capillarité (Kumar & al, 2020). Les lichens sont des algues et des champignons qui cohabitent, les plus dégradants étant les lichens calcicoles qui se développent sur les matériaux calcaires et contribuent à leur dégradation

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

chimique. Les lichens silicoles, quant à eux, se forment surtout sur les roches ignées et les surfaces minérales (Winkler, 2013). Les lichens et les algues s'attaquent aux surfaces de pierres, elles retiennent de l'eau, échangent des ions et produisent de l'acide. La présence de lichens n'est que rarement observée dans les zones urbaines et industrielles, où l'air est soufré et riche en gaz carbonique. Cependant, l'existence de micro-organismes dans le matériau structurel entraîne des contraintes mécaniques et chimiques (Pinheiro & al, 2019; Kumar & al, 2020). Les méthodes d'élimination peuvent aussi entraîner la destruction de ces structures (Environnement Canada, 1994).

3.1.3.3. Champignons et micro-organismes

La présence de champignons peut entraîner des dégâts sur les matériaux de construction poreux (Kumar & al, 2020). Ils témoignent d'une forte humidité (Vanhellemont & al, 2008) et provoquent la formation d'acide carbonique, nitrique et sulfurique, ainsi que d'autres acides plus faibles, qui attaquent les silicates. Ils sont aussi les premiers à apparaître dans le processus de météorisation, qui sont souvent à l'origine de la croissance d'autres organismes. Les moisissures, en effet, sont des champignons à la fourrure qui se forment d'abord en taches et en plaques, puis se dispersent parfois pour former une couche gris-vert, noire ou brune sur la surface de matériaux. Selon (Kumar & al, 2020), il est rare de constater la présence de moisissures qui se nourrissent de matières organiques en groupe. De leur côté, les bactéries provoquent la détérioration, la dégradation et la fissuration de la maçonnerie. En concentrant intensément, il y aura une décoloration de toutes les couleurs envisageables. Elles sont alimentées par l'énergie solaire, l'oxydation ou la réduction chimique, ainsi que les composés organiques du sol (Environnement Canada, 1994; Warscheid & al, 2000).



Figure 2 6: L'apparition des micro-organismes, sur les briques (Toolkit, 2021).

3.1.4. Animaux et oiseaux

3.1.4.1. Pholades

Les pholades représentent un risque pour les monuments historiques situés sur les côtes, vu qu'ils creusent des trous par abrasion mécanique ou par attaque chimique. Certains ont un creusement annuel de 12 mm et des trous d'environ 150 mm de profondeur. Les animaux (palourdes foreuses) génèrent des acides qui sont utilisés pour l'attaque chimique. Grâce à ces acides, ils peuvent creuser des galeries rectilignes à paroi lisse à une profondeur de 100 mm (Environnement Canada, 1994; Winkler, 2013).

3.1.4.2. Oiseaux

Ils se cachent sous les éléments constructifs des constructions et les attaquent avec des acides organiques tels que l'acide phosphorique et l'acide nitrique présents dans leurs excréments (Winkler, 2013). Les fientes des oiseaux acidifient l'eau de pluie, ce qui la rend plus corrosive pour la maçonnerie. Selon (Environnement Canada, 1994), la présence de soufre sur les enduits superficiels peut être due aux fientes d'oiseaux ou à la pollution de l'air.

3.1.5. Rouille et corrosion

3.1.5.1. Naturelle sur la pierre

Les minéraux ferreux (silicates ferromagnésiens) et les minéraux dont le réseau cristallin est ferreux sont météorisés dans le voisinage immédiat du grain minéral. L'oxydation et l'hydratation des oxydes et des hydrates de fer sont responsables de la formation des taches de rouille, qui sont pratiquement insolubles. Selon (Winkler, 2013), les hydrates de fer, qui sont le produit final de la météorisation dans les climats humides et semi-humides, peuvent être cristallisés ou rester amorphes. En raison de la perte de fer, les silicates sont naturellement oxydés. Le carbonate ferreux, soluble dans l'eau, se dissout rapidement dans de l'eau contenant du gaz carbonique, en particulier dans les zones polluées, pour former de l'hydroxyde ferrique qui se cristallise ensuite en goethite peu cristallisé FeO-OH (Environnement Canada, 1994).

3.1.5.2. Corrosion des éléments métalliques

La corrosion lors du contact du fer avec des matériaux de construction est conditionnée par le pH du milieu. Le niveau le plus élevé de corrosion se produit dans un environnement acide, mais on a également observé une corrosion assez importante dans un environnement alcalin, avec du chlorure de sodium ou du chlorure de magnésium. Le fer utilisé pour la rouille est six à huit fois plus grand que la rouille et l'expansion peut entraîner un éclatement qui peut donner des lézardes ou d'autres défauts dans le matériau proche du fer. Les pièces d'ancrage ainsi que les boulons utilisés pour fixer les pierres peuvent subir des dommages graves en raison de l'éclatement causé par la rouille, qui se retrouve également dans l'oxydation de la pyrite. Si le cuivre et ses alliages ne sont pas vernis, ils sont recouverts d'une couche de sulfate de cuivre bleu-vert soluble dans l'eau. En raison des pluies, une tache verte se forme à l'endroit où l'eau traverse. Cette corrosion peut être évitée en utilisant un drainage approprié. Les autres réactions du sulfate (patine naturelle) entraînent une diminution de sa solubilité et un retard dans la corrosion (Environnement Canada, 1994; Kumar & al, 2020).

3.1.6. Patine

La patine est une modification avantageuse du parement d'une maçonnerie due à des changements légers en chimie et en physique, qui se renforce en contact avec la surface. On peut expliquer ces changements par différents facteurs que l'on appelle parfois « vieillissement » ou « météorisation ». Au-delà de cette limite, indéfinie, les modifications d'une surface n'ont plus d'intérêt et commencent à engendrer des contraintes qui entraînent une détérioration physique. Il est possible que la surface soit fragilisée en raison de sa capacité à se rassembler et à s'adhérer (Environnement Canada, 1994). Ces dépôts sont parfois assez restreints ; cependant,

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

il y a une modification de la surface qui se manifeste par une modification de la texture, de la translucidité ou de la couleur (le fer ferrique en solution donne des teintes chaudes et le fer ferreux ou le cuivre des teintes plus froides tirant sur le vert). Les surfaces patinées sont souvent poreuses et renferment des impuretés colorées qui leur confèrent une certaine texture. L'emploi d'abrasifs, d'outils aigus ou d'acide quelconque pour le nettoyage peut entraîner la dégradation de la patine (Environnement Canada, 1994; Kumar & al, 2020).

3.1.7. Enduits

Les enduits sont des substances utilisées pour protéger les surfaces et modifier leur couleur, telles que la peinture, et autres. Il s'agit d'une couche de protection qui se dégrade, attire la saleté et se solidifie, ce qui la rend difficile à retirer. Les revêtements peuvent diminuer la résistance des surfaces maçonnées et entraîner leur propre défaillance. Il convient d'identifier les origines de ces dégâts afin de réduire au minimum les obstacles liés à l'enlèvement, au nettoyage et à la réparation. Un plan d'évaporation dans la maçonnerie est souvent causé par les enduits. Il est donc envisageable que la surface enduite se dégrade et provoque l'écaillage de l'enduit lui-même. Dans la plupart des cas, la formation de cristaux est en partie responsable du défaut de l'enduit. Les enduits qui empêchent très fortement le passage de la vapeur d'eau peuvent entraîner la condensation de la vapeur sous leurs couches. Par conséquent, l'eau submerge le parement, ce qui entraîne l'écaillage du gel (Environnement Canada, 1994; Torres & al, 2007).

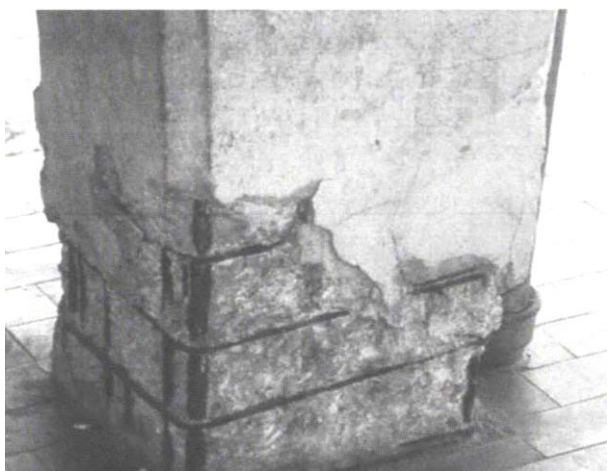


Figure 2 7: Détachement des couches de la peinture sur piliers en briques cuites (Sandrolini & al, 2007).

3.1.8. Modification minéralogiques de cœur de céramique

L'exposition prolongée de la céramique à des solutions et des substances polluantes provoque une interaction et une altération de la composition minéralogique du fonds des briques. L'eau (Pluie, eau de percolation ou humidité) joue un rôle essentiel dans ces processus de dégradation. Il transporte aussi des acides, du dioxyde de carbone, des sels solubles et d'autres substances polluantes. Selon (Fabbri, 2012), le cœur de céramique est principalement soumis à quatre modifications minéralogiques : la réhydratation, la transformation de la gehlénite, la calcite secondaire issue de la carbonatation et la calcite provenant d'un apport externe.

3.1.9. Orientation et emplacement des maçonneries

3.1.9.1. Orientation

En ce qui concerne les points d'orientation, les deux éléments à prendre en considération : le vent et la contrainte thermique :

3.1.9.1.1. Le vent

La dégradation due à l'humidité et à la cristallisation se propage par le vent. La force des vents entraîne une évaporation plus rapide à la surface des maçonneries que les pores du matériau ne peuvent supporter. L'intérieur des pores est donc recristallisé, ce qui entraîne une dégradation plus importante du matériau. Selon (Camuffo, 1995), les vents forts peuvent avoir un impact similaire à celui d'un jet de sable qui peut causer des dommages aux maçonneries, en particulier celles en pierre tendre. Le poids du vent est directement lié à la taille du bâtiment. L'angle sous lequel l'édifice est touché par le vent a également un impact (Environnement Canada, 1994; Blocken & al, 2010).

3.1.9.1.2. Contrainte thermique

En raison de la faible conductivité thermique de la maçonnerie, le parement exposé au soleil pendant la journée se réchauffe plus rapidement que la structure. Le contraire se produit pendant la nuit, quand la radiation provoque un cycle de contraintes thermiques différentes entre le parement et la structure (Unesco, 1968). Dans ce processus, la détérioration du matériau provoque la création de fissures. Les variations thermiques peuvent provoquer à un niveau microscopique l'expansion et la contraction des cristaux. Selon (Fodde & al, 2010), la pression exercée peut entraîner la fracture des briques (Camuffo, 1995). Les zones plus froides captent l'humidité, tandis que les zones plus chaudes laissent l'humidité s'échapper. Ainsi, l'humidité se déplace des zones froides vers les zones chaudes, ce qui entraîne la libération des sels solubles et des composants solubles du matériau. La température a un impact indirect sur les éléments qui favorisent l'hydrolyse dans la maçonnerie, tels que l'humidité des pores, la solubilité des sels et les réactions chimiques des gaz dissous. Selon (Unesco, 1968), l'hydrolyse augmente de deux fois à chaque 10° de température supplémentaire (Environnement Canada, 1994).



Figure 28: L'effritement des couches supérieures des briques cuites (Toolkit, 2021).

Les maçonneries sont facilement envahies par la poussière, la suie et la saleté dans les zones humides. Ces polluants se combinent avec l'humidité sur la maçonnerie ou dans l'air et, par réaction chimique ou altération physique, créent une croûte qui peut protéger la maçonnerie

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

solide, mais qui peut également former des cloques et des écailles sur les briques tendres. On observe la formation de pellicules sur les parties de maçonnerie protégées par des éléments en saillie ou en porte-à-faux, où les gaz sulfureux acides se transforment en sulfates, qui attirent ensuite la suie et les particules de fumée. La décoloration des emplacements de maçonnerie par ces particules entraîne une absorption accrue d'acides libres et de sels solubles à l'état gazeux dans l'air, formant ainsi une croûte dure et imperméable qui se cloque et s'écaille. Dans les zones humides, ces croûtes ne se forment pas, car les polluants sont transportés par la pluie, ce qui empêche la formation de croûtes. La présence de plantes et de leurs racines peut affecter les parties de maçonnerie près du sol. Des taches d'oxydation peuvent apparaître sur la maçonnerie près des toitures de cuivre. Les conditions des maçonneries diffèrent de la ville à la campagne. Les surfaces des briques s'assèchent plus lentement en raison de la diminution de l'ensoleillement et de la vitesse des vents (en raison des obstacles posés par les gratte-ciel). Cela engendre des dommages d'origine thermique et humide, qui se manifestent par une évaporation (Environnement Canada, 1994; Blocken & al, 2010).

3.1.10. Dégâts causés par l'homme

Les dégâts humains sont associés à des mesures de préservation antérieures inadéquates et à une mauvaise gestion des sites. Aucun suivi scientifique n'a permis de mettre en œuvre des mesures de préservation suffisantes, ce qui a entraîné des dommages graves à de nombreux bâtiments (Fodde & al, 2010). Il est important de prendre en compte l'influence des interventions humaines lorsqu'il s'agit de travaux de restauration antérieurs mal accomplis. Des actions humaines telles que le tourisme de masse entraînent également des changements dans les microclimatiques. Il est également possible de prendre en compte les interactions entre les différents matériaux (tels que les mortiers et les briques) et les défauts de fabrication (tels que le "calcinello") (Fabbri, 2012). Il est parfois exposé à un processus de démolition et d'abandon ou les bâtiments sont plus exposés aux actions extérieures sans entretien, ce qui entraîne de nouveaux dégâts structurels. De plus, de nombreuses restaurations sont effectuées avec des matériaux modernes plutôt que des matériaux traditionnels, en prenant des mesures incorrectes et incompatibles (Azil & al, 2022), comme dans le reste du Maghreb (Baglioni & al, 2016) et malheureusement dans de nombreux autres coins du monde (Silveira & al, 2007).

3.1.11. Dégâts structurels

Les mouvements structurels peuvent résulter de facteurs internes, mais dans la plupart des situations, ils sont causés par des éléments externes tels que les séismes (Fabbri, 2012; Kumar & al, 2020). Les cisaillements dynamiques et les charges supplémentaires engendrées entraînent des fissures qui se propagent en raison de perturbations dans les fondations, ce qui peut entraîner des dégâts aux murs et à l'ensemble de l'édifice (Corradi & al, 2018).



Figure 2 9: Des céramiques fissurées suite à des mouvements structurels provenant de l'intérieur de l'artefact (Fabbri, 2012).

4. SOLUTIONS POUR DES PATHOLOGIES, AFFECTANT LA MACONNERIE

Comme on l'a vu auparavant, chaque pathologie est due à des conditions dont il faut se débarrasser afin de la résoudre. Quelques approches fréquemment utilisées par les experts de domaine pour résoudre ces problèmes sont exposées dans la section suivante :

4.1. Elimination de l'humidité

Selon (Netinger & al, 2008), le drainage souterrain reste la méthode la plus ancienne pour réguler l'humidité. Selon (Torres & al, 2007), ils ont pour objectif principal d'éviter l'infiltration d'eau du sol près de la fondation du mur et d'améliorer l'évaporation de l'humidité provenant du mur en cas de canaux vides. Par ailleurs, la taille transversale du mur à la base peut être réduite en ouvrant des arcs dans la maçonnerie. Il arrivait parfois qu'une barrière soit établie dans le mur en ajoutant quelques rangées de pierres de rivière au-dessus du sol. La porosité limitée de la pierre était censée prévenir la remontée capillaire de l'eau (Sandrolini & al, 2007; Franzoni, 2014). En guise d'alternative à la découpe de murs, les barrières chimiques (appelées aussi imperméabilisation chimique) ont été suggérées. On l'obtient en creusant des trous à la base du mur et en injectant des matériaux qui bloquent les pores ou qui sont hydrophobes, que ce soit sous basse pression ou simplement sous pression (Alfano & al, 2006). Les « siphons atmosphériques » sont également des tubes en argile cuite, en plastique ou en métal perforés qui sont insérés dans la maçonnerie dans des trous en pente préalablement percés et scellés avec du coulis poreux pour évacuer l'humidité (Heiman, 1982). L'objectif des canaux est de faire sortir l'air lourd et humide de l'extérieur du mur, tandis que l'air léger et sec demeurant à l'intérieur (Heiman, 1982). Plus récemment, une nouvelle méthode qui a été suggérée est d'aérer la plinthe des murs en utilisant une ventilation naturelle ou un dispositif de ventilation mécanique hydro-régulé, à l'aide de caissons ou de canaux de (Torres & al, 2010). L'utilisation d'enduits de restauration a été proposée afin de réduire la hauteur du front de mer, en favorisant l'évaporation par les surfaces des murs extérieurs et en réduisant les dommages causés par la cristallisation du sel. Selon la spécification allemande WTA 2-2-91, les enduits de restauration sont définis comme un mélange sec à forte porosité, contenant une grande quantité de vapeur (Pavlíková & al, 2011; Franzoni, 2014).

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

Une autre approche thermique, qui implique de chauffer la surface du mur, a également été essayée afin d'accroître le taux d'évaporation de l'eau (Dreyer, 2005). La déshumidification par électroosmose active et passive est une autre forme de déshumidification qui exploite les effets électrocinétiques associés à la migration de l'eau dans les matériaux de construction poreux. La présence d'une double couche électrique à toute interface entre un électrolyte aqueux et un solide est à l'origine des effets électrocinétiques. Il en est de même à la surface des capillaires dans les matériaux de construction poreux humides comme la brique, la pierre, le mortier et le béton. En particulier, la présence d'un champ électrique externe dans un tel système peut conduire à un mouvement relatif des deux phases, comme l'eau dans les pores d'un solide poreux (électroosmose) ou les particules solides dans une suspension solide aqueuse (électrophorèse) (Chien & al, 2010; Franzoni, 2014).



Figure 2 10: Traitement d'un cycle d'imperméabilisation par injection chimique (Ahmad & al, 2010).

4.2. Nettoyage

Avant d'éliminer un dépôt de surface, il est impératif de déterminer la nature chimique des concrétions. Ils peuvent être retirés de façon mécanique ou chimique, mais il est nécessaire de procéder à des tests préalables pour s'assurer que la brique n'est pas endommagée et de choisir la méthode appropriée.

La saleté de surface peut être préalablement nettoyée avec une brosse douce, pour la céramique non émaillée, en particulier. En outre, il est possible d'éliminer certains dépôts en utilisant des instruments à ultrasons. Quant aux glucides, aux protéines et aux graisses, des enzymes peuvent être utilisées pour faciliter leur élimination par lavage. On peut éliminer les sels solubles en les plongeant pendant une longue période dans de l'eau distillée ou déionisée. Les résidus de Après avoir parfaitement trempé la céramique dans l'eau, il est nécessaire d'appliquer les acides avec un compte-gouttes, une pipette ou de la pulpe de papier en quantité suffisante pour éliminer la concrétion. Étant donné que l'utilisation d'un acide pour éliminer les dépôts entraîne la production simultanée de sels solubles, il est donc nécessaire de procéder à un lavage prolongé des éléments (Fabbri, 2012). Étant donné que la décoloration de la maçonnerie causée par les communautés microbiennes, il est essentiel d'utiliser des solutions de préservation chimique pour la réhabilitation (Schabereiter-Gurtner & al, 2001) et les biocides naturels sont considérés comme une solution adéquate (Fidanza & al, 2019). Le nettoyage éventuel en cas de noircissements dues au sulfite de plomb doit être évalué avec soin, car il peut ne pas toujours être nécessaire (Fabbri, 2012). Selon (Di Turo & al, 2019), l'hydrogel d'alcool polyvinylique est une solution électrolytique polymère utilisée pour réparer les métaux archéologiques.



Figure 2 11: Le dessalement du sel sur les surfaces murales par le procédé de cataplasme (Ahmad & al, 2010).

4.3.Consolidation

La substance solide cyclododécane ($C_{12}H_{24}$) se sublime à température ambiante et est utilisée comme un agent de consolidation temporaire pour les matériaux faibles ou cassants. On peut le chauffer et le faire fondre, avec un pinceau ou une spatule chauffante, ou bien le dissoudre dans des solvants apolaires ou aromatiques et l'utiliser par pulvérisation, par pinceau ou par injection. La sélection des matériaux de consolidation et la méthode d'application varient en fonction de l'état du matériau. L'expérience a montré que des solvants comme le Paraloid B-72, la résine acrylique ou l'acétate de polyvinyle dans l'acétone ou le toluène sont plus efficaces que les émulsions (Fabbri, 2012).

4.4.Collage

Il est essentiel de choisir un adhésif réversible, non jaunissant, stable et facile à installer. Il ne doit pas affecter le corps de la céramique. De même, il doit être suffisamment résistant pour maintenir les fragments ensemble sans les diminuer. La viscosité de l'adhésif choisi est également essentielle. La porosité de la céramique aura un impact sur la densité adéquate. Les meilleurs résultats peuvent être obtenus avec un adhésif solvant, tel que le Paraloid B-72 (Acryloid B-72 en dehors de l'Europe). La stabilité et la résistance du Paraloid B-72 ont été prouvées dans de nombreuses applications en conservation (Fabbri, 2012).

4.5.Le renforcement avec des éléments en acier inoxydable

L'acier inoxydable utilisé dans la réhabilitation doit respecter des normes pour pouvoir être utilisé dans des environnements extérieurs non protégés, notamment dans les zones à risque géologique. Ces critères incluent la stabilité chimique (non-corrosive), la résistance spécifique (la résistance du matériau divisée par sa densité) et la compatibilité avec les maçonneries anciennes (Corradi & al, 2018). Différentes méthodes ont été expérimentées, soit en renforçant les panneaux muraux contre le cisaillement par (ACM) soit en augmentant la capacité de compression des colonnes de maçonnerie non circulaires par effet de confinement. En outre,

CHAPITRE II

LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN BATI EN MACONNERIE

des barres torsadées en acier inoxydable ont été employées afin de relier des murs fissurés ou divers panneaux muraux non reliés. Les barres d'armature hélicoïdales en acier inoxydable ont également été évoquées pour renforcer la maçonnerie et les tiges en acier inoxydable pour accroître la résistance à la traction. On a également décrit ces techniques afin de renforcer les liens entre les parois voisines (Dolce & al, 2009; Ismail & al, 2012; Borri & al, 2013; Corradi & al, 2017; Corradi & al, 2018).



Figure 2 12: a) Cerclage avec câbles d'acier précontraints (Borri & al, 2013), b) Renforcement des murs de refend : méthode CAM, c) détail du joint renforcé de barres torsadées en acier inoxydable (Corradi & al, 2018).

4.6. Intégration ou restauration formelle

Le choix des remplissages sera influencé par l'importance de la pièce, la valeur et le contexte historique de l'objet, les ressources financières et le temps disponibles, ainsi que la manipulation et l'exposition futur. Si l'objet est reconstruit, le matériau choisi doit être réversible et avoir de bonnes caractéristiques de vieillissement. Le matériau le plus adapté est composé d'un plâtre industriel spécifique. Le remplissage idéal est la poudre Polyfilla pour l'intérieur (appelée aussi Moltotfill innen) qui est composée de sulfate de calcium. Dans le domaine archéologique, il est courant de combler plus bas afin de mettre en évidence la différence entre l'ancien et le nouveau. Il y avait souvent de la saleté dans cet espace et en diminuant le niveau de remplissage, la bordure initiale était endommagée ou affaiblie (Fabbri, 2012).

4.7. Solutions pour remplacer les briques cuites manquantes dans les structures anciennes

La dégradation des briques est fréquente et dépend largement de divers facteurs tels que des techniques et des matériaux de construction inadaptés, des tassements des fondations, des charges sismiques et une dégradation environnementale, ce qui entraîne souvent un remplacement partiel des éléments manquants. Il est essentiel d'utiliser des matériaux adéquats afin de remplacer les briques d'origine afin de préserver la structure historique (Elert & al, 2003; Cultrone & al, 2004; Cultrone & al, 2005). Pour y parvenir, les solutions doivent assurer la sécurité structurelle tout en préservant la valeur architecturale, la forme et le poids des éléments, sans compromettre les exigences esthétiques. Par conséquent, les chercheurs et les professionnels de ce domaine se sont de plus en plus portés sur le remplacement par des briques

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

anciennes récupérées ou la création de briques plus compatibles et adaptées, qui sont innovantes et irréversibles (Borri & al, 2013). Une réhabilitation à petite échelle, qui propose une approche historique et des expérimentations in-situ de l'ancien matériau, renforcé par une évaluation du comportement des nouvelles briques à partir d'une série d'essais qui évaluent leur aspect textural et microstructural, ainsi que leur résistance et leur longévité. On évalue également la production de briques de substitution qui répondent à des exigences de conservation particulières en prenant en compte une analyse approfondie de la matière première et de ces substituts (Elert & al, 2003).

5. LA METHODOLOGIE D'UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE, DES BRIQUES CUITES HISTORIQUES

5.1.Limites à respecter dans le choix de matériaux

Dans son ouvrage Méthode et principe de préservation du patrimoine architectural bâti (أبو الهيجاء, 2011), il a évoqué certaines conditions à prendre en considération lors de la réhabilitation des façades et de la sélection des matériaux en maçonnerie

- Identifier tous les éléments susceptibles d'influencer le bâtiment du point de vue des matériaux de construction d'origine.
- La modification de l'extérieur du bâtiment par l'ajout de nouveaux éléments est inadmissible.
- Il convient d'utiliser au moins des matériaux traditionnels pour la restauration des façades extérieures, tels que des pierres, des briques, de la boue et tous autres éléments traditionnels, à la différence du ciment, etc.
- Les matériaux originaux doivent être remettre s'ils ont été affectés et dissimulés au fil du temps, et les articles endommagés doivent être réparés avec des matériaux similaires.
- Il est recommandé de choisir les mêmes matériaux ou d'autres similaires lors des travaux.
- L'apparence et les matériaux d'origine doivent être conservés.
- Étude expérimentale détaillé des matériaux utilisés reste indispensable pour garantir l'adaptabilité avec l'ancien.
- Il demeure nécessaire d'effectuer une étude historique et technique des matériaux anciens.
- Il reste essentiel de mener une étude expérimentale approfondie des matériaux utilisés afin de s'assurer de leur compatibilité avec l'ancien.

5.2.L'aspect historique de processus de réhabilitation de la brique

Une véritable analyse des évolutions subies par le bâti et des événements historiques qu'il a traversés permet de réaliser un diagnostic et un traitement de manière scientifique et authentique. C'est pourquoi aucun projet de réhabilitation ne devrait commencer sans avoir été précédé par la collecte de données sur l'histoire du bâtiment, les méthodes de construction, ses composants et l'analyse des évolutions historiques qui y ont existé (أبو الهيجاء, 2011).

D'après (López-Arce & al, 2003), l'histoire de la maçonnerie peut être envisagée à partir de l'analyse statistique des dimensions des briques, à partir d'une analyse minéralogique des matériaux utilisés (He, 1995; Böke & al, 2006; Scalenghe & al, 2015). Par ailleurs, il est possible de les classer géologiquement en fonction des argiles utilisées pour leur production, et

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

il est courant de remarquer des liens familiaux étroits entre les briques fabriquées à partir d'argiles d'origine similaire (Mishra & al, 2021). D'après (López-Arce & al, 2003), le concept essentiel de la détermination de l'histoire des matériaux historiques repose sur deux hypothèses : soit la concordance et la compatibilité entre la composition chimique des matières premières issues de la même source. Or, les différences de composition sont plus faibles au sein d'une même source que parmi des matériaux provenant de différentes sources (Scalenghe & al, 2015). Il existe une grande diversité d'approches appliquées à l'étude des briques historiques en céramique dans la littérature scientifique, parmi lesquelles nous proposons :

5.2.1. Analyse du cadre méthodologique

L'analyse des matériaux par classification en fonction de leur date de construction est l'une des méthodes les plus utilisées. Une étude approfondie du processus de fabrication, de la taille et de la couleur est effectuée afin de comprendre l'histoire de la brique. L'analyse des matières premières est fréquemment employée pour recueillir davantage d'informations, car chaque trace peut être importante. On établit les datations des anciennes briques cuites afin d'obtenir des fiches de référence pour la classification des briques (أبو الهيجاء, 2011).

Une alternative se base sur la compréhension des performances des matériaux à travers l'histoire du bâtiment, comme le soulignent (De Gregorio & al, 2023). Il est donc important de faire une distinction entre les phases évolutives de valeur qui doivent être conservées en utilisant des matériaux compatibles afin de reconstituer leur fonction symbolique. Grâce à cette connaissance historique, il est également possible de repérer les techniques de construction traditionnelles liées aux matériaux locaux. Il est également envisageable de saisir les performances résiduelles et potentielles qui sont bénéfiques pour une réutilisation optimale (Brol & al, 2015). La carte d'identité du matériau (Material's ID) doit contenir l'analyse de l'histoire du matériau/composant et les informations sur sa mise en service d'un point de vue constructif (De Gregorio & al, 2023).

Dans une autre perspective, Daniela Puttaluga l'a présenté dans son livre « L'analyse mensiocronologica dei mattoni ». En l'appelant l'analyse mensiocronologique des briques. En proposant une technique de datation non destructive et directe qui permet d'obtenir une datation absolue des éléments en brique en se référant uniquement aux dimensions physiques des briques (longueur, largeur et épaisseur). Les mesures et les données obtenues devraient être étudiées de façon statistique et comparées à des courbes particulières, connues sous le nom de « mensiocronologiques », qui relie l'évolution des mesures à l'époque de production. Pour appliquer cette technique, il est donc nécessaire de commencer par définir les courbes elles-mêmes, qui sont d'ailleurs déjà disponibles dans de nombreux contextes territoriaux déjà en place. La mensiocronologie des briques est une analyse « directe » qui s'appuie sur des observations et des mesures effectuées directement sur l'objet. D'autre part, une approche indirecte s'intéresse à la production et à l'interprétation de l'œuvre artistique, telles que les textes écrits et les représentations iconographiques. Il s'agit d'un procédé non destructif, car il ne requiert pas de rassemblement de matériel, mais il repose uniquement sur l'observation et la mesure des différents éléments. C'est un mode de datation « absolu », c'est-à-dire qu'il a tendance à donner une date précise, même si l'intervalle de temps est plus ou moins court (erreur de datation possible) (Puttaluga, 1991).

5.3. Planification d'une intervention de réhabilitation

Il convient de préciser le type de la maçonnerie en question, si elle est cuite à basse ou à haute température, émaillé ou autre. Le choix de la solution sera favorisé par une description précise de matériaux (Fabbri, 2012). Leurs états d'urgence et les problèmes dont souffrent, sont les facteurs qui vont conditionner la démarche de l'intervention, le choix de solutions et la planification des travaux.

5.4. Diagnostic visuel in-situ

Il est essentiel de procéder à une phase de diagnostic approfondie avant toute intervention de réhabilitation. Il faut en faire une documentation minutieuse en tant que structure de valeur historique. La maçonnerie est d'abord évaluée à l'œil nu in-situ. Il est indispensable de rassembler toutes les observations dans un rapport ou de les vérifier à partir d'un dossier écrit et photographique existant. La prise en charge d'urgence sur place, ainsi que les enregistrements écrits et photographiques de haute qualité, sont d'une grande valeur pour le travail ultérieur dans le laboratoire de recherche ou ateliers de restaurations. Dans le cas d'études plus approfondies, il est essentiel de procéder à un prélèvement et les tests doivent être effectués en laboratoire à l'aide d'ultraviolets, d'infrarouges ou de rayons X, ainsi que des analyses de haute technologie. Les réparations anciennes, négligées, doivent être prises en compte par les conservateurs (Fabbri, 2012). Cette étape permettra de saisir la corrélation entre l'état du matériau et son environnement. Conformément aux recommandations des lois de l'UNESCO, qui mettent en évidence l'importance d'analyser le bâtiment dans son contexte (UNESCO 1985) (أبو الهيجاء, 2011), Il s'agit d'une étape préliminaire des étapes restantes.

5.4.1. Relevés géométriques et graphiques

Outre la démonstration de l'état réel des matériaux, l'exécution des levés permet de révéler de manière approfondie la nature des matériaux. Avec pour but de mener une étude méthodique et analytique. On peut mesurer avec des instruments simples comme l'échelle de dessin, le mètre et d'autres. Néanmoins, dans des situations plus complexes et afin d'obtenir une plus grande précision, il est possible de opter pour des outils plus avancés tels que Phylogarithm possédant une correction d'image électronique. Pour réaliser ce rapport de relevé, il faudra tracer les différentes faces des matériaux en prenant des photos qui sauvegardent tous les détails de manière claire et professionnelle (أبو الهيجاء, 2011).

5.4.2. Relevés pathologique et constructif

Selon (أبو الهيجاء, 2011), Cette étape de l'étude de projet a pour objectif principal de comprendre les matériaux utilisés et leur niveau d'homogénéité. Ces informations permettront également d'éclaircir l'histoire de ces matériaux afin d'en déterminer l'origine. Notre objectif est également de mieux comprendre les dommages et les pathologies dont souffre notre matériau afin de mieux prescrire le traitement. Ces relevés offrent une analyse détaillée en donnant une

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

interprétation précise de chaque problème. Ainsi, il est possible de choisir des essais sur place, avec des outils principalement non destructifs. Parmi lesquelles, nous vous présentons :

5.4.2.1. Tôle simple et double

L'objectif est d'évaluer la capacité des murs à supporter les forces du poids de l'immeuble et son degré de solidité. On procède à l'insertion d'une tôle d'une épaisseur inférieure à 10 mm sur la totalité de l'épaisseur du mur. Ensuite, on insère une quantité précise d'oïl dans la tôle et cette quantité est régulée par un système informatisé relié à un ordinateur. Pour mesurer les pressions exercées sur la tôle dans un temps équivalent à la réapparition du mur à son état normal sous l'influence de son poids (Binda & al, 2010).

5.4.2.2. Radar / Tomographie

Il s'agit d'une technique permettant de détecter l'humidité, de repérer les fissures incarnées et d'évaluer l'efficacité d'une consolidation par injection. Son mode de fonctionnement se repose sur des ondes de différentes longueurs, qui permettent d'évaluer la densité des matériaux en mesurant la vitesse des fréquences sonores (أبو الهيجاء, 2011).

5.4.2.3. Thermographie

Un autre procédé non destructeur, qui peut également repérer des anomalies telles que l'humidité, les vides, les parties manquantes, la présence de conduites encastrées de différentes natures, telles que l'électricité, l'eau pluviale ou usée, etc (أبو الهيجاء, 2011).

5.4.2.4. Endoscopie

Un outil extrêmement fin, d'un diamètre de demi-centimètre, qui permet de saisir la nature constructive des matériaux et les caractéristiques des vides. Son fonctionnement consiste simplement à l'introduire dans des endroits très difficiles à atteindre et à attendre le résultat (أبو الهيجاء, 2011).

5.4.2.5. La pipette de Karsten

Afin d'évaluer l'absorption d'eau des briques, un test très simple peut être effectué. Un tube en verre rempli d'eau est fixé de manière hermétique à la surface de la brique, équipé d'une échelle graduée qui calcule la quantité d'eau qui pénètre en un laps de temps spécifique (Toolkit, 2021).

5.4.2.6. L'humidimètre

Il est possible de mesurer le taux d'humidité (la teneur en eau) des briques en utilisant un humidimètre ou en effectuant un simple test avec une bombe à carbure. Selon (Toolkit, 2021), cette mesure permet d'évaluer la porosité des briques.

5.4.2.7. Le scléromètre à rebond (ou marteau de Schmidt)

Il s'agit d'un dispositif portable qui permet d'évaluer de manière non destructive la résistance et le niveau de dureté de divers matériaux. L'utilisation d'une force d'impact élastique sur le matériau à tester permet de renvoyer et de détecter l'énergie non absorbée. L'utilisation d'abaques ou de courbes de calibrage pour analyser les données permet ainsi de comparer les échantillons à tester (Toolkit, 2021).

5.4.2.8. Le vérin plat

Il arrive parfois que la résistance à la compression in situ soit estimée en utilisant un vérin plat. Il est impératif de saigner dans la maçonnerie au niveau d'un joint de mortier horizontal pour y placer un vérin plat sous pression. Néanmoins, cette méthode n'est pas adaptée à certains types de mortiers et les résultats doivent être interprétés avec prudence par des personnes experts (Toolkit, 2021).

5.4.2.9. Des bandelettes indicatrices de sel

Il sert à identifier et à évaluer la présence de sels solubles (nitrates, chlorures, sulfates) dans les maçonneries (Toolkit, 2021).



Figure 2 13: Quelques outils de teste non destructifs : a) La pipette de Karsten, b) D'un humidimètre, c) Des bandelettes indicatrices de sels, d) Le scléromètre, e) un vérin plat (Toolkit, 2021).

6. REPARATION ET REMPLACEMENT DES PIECES MANQUANTES

Si une réhabilitation ponctuelle des murs en maçonnerie de brique est nécessaire, il est nécessaire de compléter les éléments et pièces manquants, il est important de prendre en considération des critères très précis. En considérant que la résistance et d'autres propriétés physiques et mécaniques de la brique de rechange sont similaires à celles de l'ancienne brique en état sec. Afin d'y parvenir, il y a deux possibilités que nous allons explorer dans les ponits qui suivent :

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

6.1. Le remplacement par des briques anciennes récupérées

Les briques recyclées provenant de la démolition des anciennes constructions peuvent être récupérées et réemployées dans des projets de réhabilitation. Cette procédure est extrêmement complexe et il est primordial de la mener en respectant constamment les normes de sécurité en vigueur sur les sites de démolition. Lors de la sélection, il est recommandé de le vérifier conformément aux normes de conception (EN 1996 : Eurocode 6 pour la conception et le calcul des ouvrages en maçonnerie), les normes nationales et européennes concernant le produit (EN 771-1+A1, etc.), les règles de l'art en vigueur et les normes de mise en conformité, avant de l'utiliser. D'après les règles en vigueur, il faut également tenir compte des exigences sismiques, thermiques et acoustiques, de résistance au feu, d'étanchéité, etc. Des exigences mécaniques sont nécessaires pour intégrer les briques de réemploi dans des maçonneries porteuses. Il est également important de prendre en considération les caractéristiques des briques (porosité, absorption d'eau initiale, taux d'humidité, poids spécifique, adhérence, etc.) ainsi que les exigences de maçonnerie (présence au climat, résistance, etc.) (Toolkit, 2021). Compte tenu du fait que ce principe n'est pas appliqué en Algérie, on se focalise donc sur la fabrication de nouvelles briques adaptées afin de compenser les briques disponibles.

6.2. La substitution par l'élaboration d'une nouvelle brique appropriée

Malgré la présence évidente des restaurations sur le marché de la construction, il est surprenant de constater le manque relatif de normes, de règlements ou d'outils de gestion dans le domaine de la réhabilitation, de l'évaluation et de l'entretien par rapport à celui de la conception et de la construction de nouvelles structures (Bouabdallah & al, 2008; Molez, 2003). En se basant sur tout ce que nous avons pu retenir de l'analyse bibliographique que nous avons effectuée, de nombreux chercheurs ont tenté de modifier la composition de la terre en ajustant le degré de plasticité et la quantité d'eau ou en utilisant des techniques de stabilisation afin d'obtenir des caractéristiques distinctifs et similaires aux briques anciennes ou d'améliorer les propriétés pour obtenir un matériau novateur (Baglioni & al, 2016). Néanmoins, il peut arriver que ces méthodes de modernisation soient à la fois incompatibles et réversibles, ce qui contraint les ingénieurs en structure à trouver des solutions créatives. Plus de recherches ont été menées sur l'utilisation de nouveaux matériaux et les méthodes adéquates pour réparer et réhabiliter les bâtiments. Plus encore de recherches ont été menées sur l'appropriation de nouveaux matériaux et les techniques appropriées pour réparer et réhabiliter les constructeurs et les conclusions ont montré qu'il est envisageable de rétablir les structures de maçonnerie historiques en employant des matériaux composites. Or, plus récemment, des études ont examiné la question de la durabilité des matériaux composites employés pour renforcer les édifices anciens (Corradi & al, 2018). De nouvelles approches ont été mises au point pour avoir le maximum de compatibilité entre l'ancien et le nouveau matériau en optant pour des techniques de caractérisations en laboratoire très avancé. Des résultats très prometteurs et satisfaisants ont été obtenus (Binici & al, 2020). En réhabilitation d'un ancien élément constructif, il est essentiel de prendre en compte la caractérisation mécanique de la maçonnerie afin de penser à une compatibilité comportementale (Silveira & al, 2007). L'analyse de tous les échantillons s'effectue en utilisant diverses méthodes d'analyse en laboratoire (Veiga & al, 2020). La diffraction des rayons X, la microscopie électronique à balayage pour l'observation directe des

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

phases structurelles, ainsi que l'analyse spectroscopique de réflexion de la couleur des céramiques, sont également utilisées (López-Arce & al, 2003; Marengo & al, 2005; Marra & al, 2011; Scalenghe & al, 2015). Le processus repose sur une série d'essais que nous décrirons plus en détail dans la section suivante, pour l'expérimentation des nouvelles briques façonnées afin de remplacer des briques historiques, l'objet de notre étude :

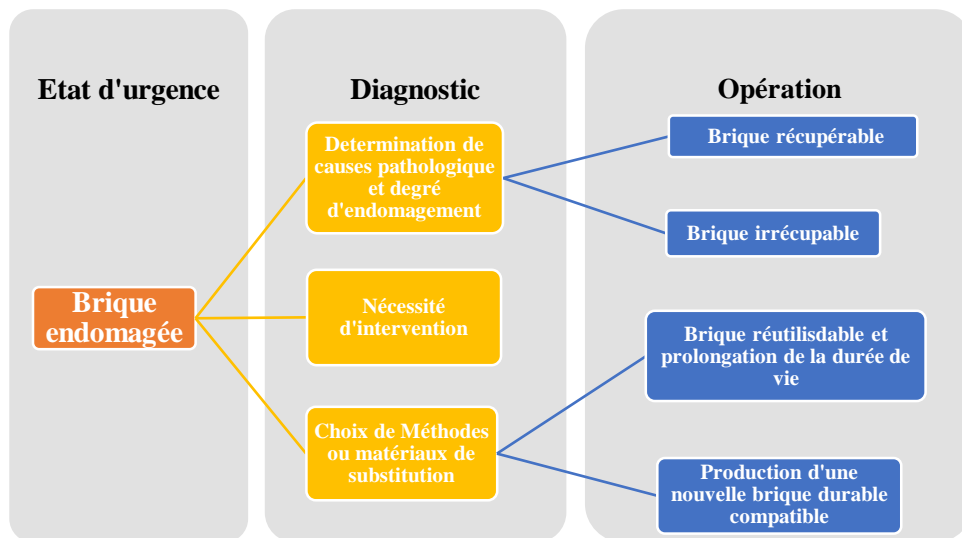


Figure 2 14: Stratégie de réhabilitation écologique des briques cuites historiques.

6.3. Caractérisation des briques cuites anciennes

Avant de passer au laboratoire, il est nécessaire de réaliser une analyse visuelle des échantillons de briques prélevées dans les structures historiques afin d'obtenir des données préliminaires sur les caractéristiques des échantillons de briques. Les surfaces des échantillons de briques sont nettoyées de tous les matériaux incohérents à l'aide d'un compresseur à air. Par la suite, ces briques sont examinées de manière approfondie pour identifier leurs couleurs d'origine et vérifier la présence de fibres naturelles ou d'autres dégraissés intégrés dans la structure des briques solides de cette époque et de cette région (Binici & al, 2020). Afin de pouvoir passer à l'étape de laboratoire par la suite (Binici & al, 2020).

Techniquement parlant, le remplacement des briques fortement dégradées par de nouvelles briques écologique et compatible, exige une considération non seulement des approches esthétiques, texturales et compositionnelles, mais aussi les similitudes de comportement hydrique pour éviter une migration différentielle de l'humidité qui pourrait causer des dommages à d'autres parties du monument (Cultrone & al, 2005). La campagne de caractérisation de la maçonnerie ancienne comme échantillon de référence se concentre donc sur les caractéristiques structurelles, les aspects physico-chimiques et mécaniques, ainsi que sur les caractéristiques intrinsèques des matériaux anciens, phases très peu étudiées dans la littérature. Ce processus permet également de prendre en compte différents paramètres tels que la composition minéralogique, le processus de fabrication, le niveau d'humidité et les conditions

environnementales dominantes, ainsi que de repérer les matériaux pour évaluer le comportement de ces éléments constructifs et aider à prendre des décisions concernant la formulation de mélange de matériaux de substitution. Selon (Cantin & al, 2010), des tests comme le (XRF, TGA et SEM) ne sont indispensables pour identifier la composition géochimique et la résistance des briques anciennes, qui sont soumises à divers types de phénomènes d'altération dans des milieux agressifs. Selon les recherches de (Mishra & al, 2021), cette étape revêt une importance scientifique cruciale pour la restauration et la réhabilitation des monuments historiques en ce qui concerne la durabilité et la longévité de la maçonnerie en briques. Ainsi, dans ce contexte, il peut être extrêmement avantageux de réaliser une analyse technique des matériaux anciens afin de sélectionner les solutions d'éco-réhabilitation les plus adaptées pour garantir un comportement durable des matériaux (Medjelekh & al, 2020). Ainsi, nous nous basons sur ces travaux de recherche pour élaborer notre méthodologie, en utilisant un protocole d'essai complémentaire (Rovero & al, 2009; Saenz & al, 2019; Binici & al, 2020; Medjelekh & al, 2020). Comme indiqué ci-dessous :

6.3.1. Caractérisation Géo-structurale

6.3.1.1. Essai de densité apparente

La densité apparente est calculée en utilisant la norme ASTM C67-17 (ASTM C67/C67M-21, 2015). Une fois que les briques anciennes ont été séchées au four à 110 C° pendant 24 heures, il suffit de mesurer leur poids et leur taille, puis on divise la valeur du volume apparent par la valeur du volume.

6.3.1.2. La porosité ouverte

La porosité ouverte ou accessible à l'eau est évaluée en utilisant la pondération hydrostatique conformément aux normes NF ISO 501 et ASTM C20 (Banchelli & al, 1997) Il faut préalablement sécher les échantillons dans une étuve à une température de 110°C jusqu'à ce qu'ils soient déshydratés. Il convient d'enregistrer le poids sec dans l'air pour chaque échantillon comme M1, de mesurer la masse saturée et en suspension dans l'air comme M2, et en suspension dans l'eau comme M3. Afin d'obtenir le calcul final de la porosité.

6.3.1.3. Absorption d'eau par capillarité

Les propriétés d'humidité sont déterminées par la méthode d'absorption capillaire selon la norme NF EN 771-1+A1/CN (Afnor. NF EN 771-1+A1/CN, 2015). Le test d'absorption d'eau est un test physique qui permet d'obtenir des informations cruciales sur la résistance des briques et joue un rôle essentiel dans leur durabilité. Lorsque l'eau pénètre plus facilement dans la structure des pores, la brique se dégrade plus rapidement en raison des cycles de gel et de dégel répétés. Le principe d'essai consiste à évaluer le poids d'une brique imprégnée d'eau pour évaluer son taux d'absorption d'eau (Samara & al, 2009). L'essai consiste à évaluer le poids d'une brique trempée dans l'eau pour évaluer son taux d'absorption d'eau. Pendant 48 heures,

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

les échantillons sont séchés à une température élevée de 60 °C, puis refroidis dans un dessiccateur. Une fois séchés, le poids des échantillons reste constant. Les poids secs des échantillons sont consignés. Ensuite, les briques sont placées dans de l'eau pendant une période de 48 heures pour évaluer leur poids saturé et sous l'eau (Binici & al, 2020).

6.3.2. Caractérisation mécanique

6.3.2.1. Résistance à la compression

Il est recommandé de procéder à des tests de résistance à la compression pour évaluer la capacité de charge des briques cuites (Uranjek & al, 2015). L'essai de compression uni-axiale avec meulage et collage, effectué sur deux demi-blocs superposés et collés avec un joint de mortier spécial, soumis à une simple compression jusqu'à ce qu'ils se rompent (Gbedema & al, 2019) et EN 771-1/CN (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017).

6.3.2.2. Résistance à la traction

Une caractéristique mécanique qui pourrait être bénéfique pour évaluer le comportement mécanique de la maçonnerie en briques utilisée dans les immeubles historiques et fournir des informations intéressantes sur la vulnérabilité des matériaux (Binici & al, 2020). Elle est mesurée conformément aux normes NR (EN 771-1/CN) (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017) et (XP P 13-901, 2001) à partir de l'essai de traction par fendage (essai brésilien), qu'il s'agit d'une compression des briques cuites le long de deux tiges situées de part et d'autre de l'autre face d'une brique, entraînant une contrainte de traction le long d'une facette verticale passant entre ces deux tiges (Azil & al, 2022; Boubekeur & al, 2022).

6.3.3. Caractérisations minéralogiques et physicochimiques

6.3.3.1. Diffraction des rayons X (DRX)

La composition minéralogique des briques anciennes est déterminée à l'aide de la diffraction des rayons X (DRX) (Elert & al, 2003). Il s'agit d'une technique minéralogique qui permet de caractériser la structure cristalline de l'argile brute et calcinée (Taha, 2017; Medjelekh & al, 2020; Meddah & al, 2020). En utilisant un appareil de diffractomètre X'Pert PRO de PANalytical, muni d'un détecteur X'Celerator et du logiciel HighScore. Les conditions opératoires employées étaient de Cu K α 1 = 1,545Å rayonnement, 40 KV, 30 mA, 2 θ = 3-70°) (ASTM C67/C67M-21, 2015).

6.3.3.2. Analyse thermogravimétrique (ATG)

En outre, on évalue le niveau d'hydrodynamique en utilisant une analyse thermique (DTA-TG) à l'aide d'un analyseur thermogravimétrique (TGA PERKIN ELMER). L'échantillon étudié, est une sorte d'une poudre de matériaux secs. Les fragments des anciennes briques prélevées ont

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

d'abord été broyés et tamisés (Medjelekh & al, 2020). Le principe d'analyse, consiste en évaluer la masse de l'échantillon au fil du temps en fonction de la variation de la température. La rampe de chauffe a été fixée à 5°C/min de la température initiale (20°C) à la température finale (1200°C). La rampe de chauffe a été chauffée à une vitesse de 5°C/min, passant de la température initiale (20°C) à la température finale (120°C). Des informations sur les phénomènes physiques (transitions de phase, absorption et désorption) et chimiques (chimisorption, décomposition thermique et réactions solide-gaz) peuvent être obtenues (Fgaier, 2013). Trois analyses sont incluses dans l'approche : l'analyse thermogravimétrique (ATG), l'analyse thermogravimétrique dérivée (DTGA) et l'analyse thermique différentielle (ATD). Le thermogramme ATG représente la perte de poids causée par les réactions lors de la phase de chauffage, tandis que la DTGA représente les températures où le taux de perte de poids maximal est atteint. L'ATD est une technologie qui permet de détecter les pics exothermiques et endothermiques provoqués par les réactions thermiques (Fabbri & al, 2014). On identifie les pics pour détecter les phases minérales après avoir examiné les fluctuations de masse observées à des températures spécifiques (Taha, 2017).

6.3.3.3. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Les propriétés texturales et microstructurelles, ainsi que l'évolution de la vitrification, le degré de cuisson et même la morphologie de surface des briques anciennes, sont analysées à l'aide de la microscopie électronique à balayage SEM (JCM-5000 NeoScope) (Elert & al, 2003; Taha, 2017), conformément à la norme ISO 22493: 2008 (ISO 22493, 2008), le concept implique l'obtention d'images de haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électron-matière. La métallisation des chutes des échantillons se fait en déposant une fine couche d'or sur ces surfaces pour les rendre conductrices d'électrons. (Achik & al, 2019; Medjelekh & al, 2020).

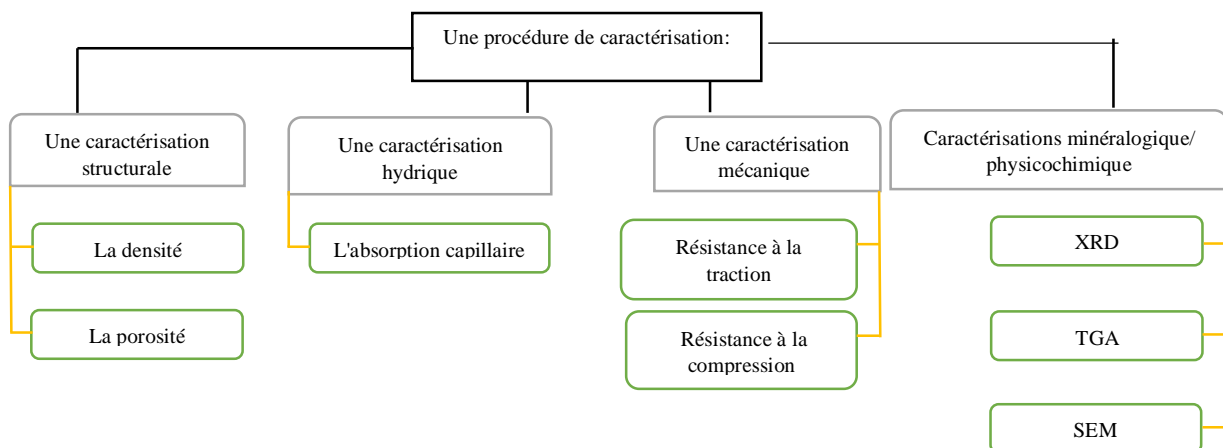


Figure 2 15: Caractérisation des anciennes briques, adoptée dans l'étude.

6.4. Caractérisation des matières premières « terre et ajouts »

D'après les recherches (Elert & al, 2003), les matières premières et les conditions de production ont un impact considérable sur la qualité et la durabilité des briques. Les additifs sont également couramment utilisés et leurs impacts sur les propriétés minéralogiques, texturales et physico-mécaniques des briques pleines cuites utilisées comme matériaux de substitution dans le domaine de la réhabilitation sociale devraient être expérimentées. Les résultats obtenus peuvent donc servir à développer de nouveaux matériaux de construction qui répondent à des critères satisfaisants. Afin de préserver de nombreux monuments construits en briques, il est crucial de choisir les composantes de mélange adéquates pour obtenir des briques de meilleures qualités en tant que matériau de substitution (Cultrone & al, 2005). Ainsi, il est impératif de passer par une phase d'identification à partir de protocole suivant :

6.4.1. Caractérisations minéralogiques et chimiques

6.4.1.1. Teneur en matières organiques

La quantité de matière organique dans les argiles est déterminé selon la norme XP P94-047 (Afnor XP P94-047, 1998), La mesure de la perte de masse préalablement séchée est réalisée après avoir été calcinée dans un four à une température de 450 C°. On peut classer le sol dans l'une de ces quatre catégories : le sol minéral avec un taux inférieur à 3 %, le sol minéral avec une matière organique avec un taux entre 3 % et 15, le sol organique avec un taux entre 15 % et 30 % et le sol hautement organique avec un taux supérieur à 30 % (Alabduljabbar & al, 2021).

6.4.1.2. Teneur en chaux

La concentration en chaux peut être évalué par attaque à l'HCl, conformément à la norme belge NBN 589-209 (Afnor.NF P94-048). Les sulfates se combinent avec le calcaire (CO₃ Ca) et sont obtenus en précipitant les sulfates de baryum dans le filtre après une attaque à chaud avec de l'acide chlorhydrique à une teneur de 10%.

6.4.1.3. Teneur en sel

Selon (Taha, 2017), la présence de sels solubles dans les matières premières entraîne l'apparition de taches blanches sur la surface des produits finaux, ce qui met en péril la durabilité des produits finaux. Il est donc nécessaire d'effectuer une analyse préalable avant de passer à la phase de production. Les sels solubles sont évalués conformément à la norme EN 1744-1 (Afnor. NF EN 1744-1, 1998). L'insoluble résidu est le produit d'une attaque à chaud avec de l'acide chlorhydrique à 10%. Le sable de silice et les éléments silicatés des argiles, sont les éléments concernés.

6.4.1.4. L'analyse au spectromètre fluorescence

Les matières premières sont analysées à l'aide d'un spectromètre à fluorescence X (S2PUMA-BRUKER) (EDXRF) (XRF). Dans un premier temps, il est nécessaire de placer des échantillons

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

dans la zone de mesure où il y a un petit trou dans la chambre d'échantillon. La chambre d'échantillon et l'obturateur protègent le tube à rayons X de l'instrument (S2PUMA) afin d'éviter toute perte de rayons X. Il est capable d'appliquer une tension allant jusqu'à 50 kV à l'aide d'une source de rayons X en Pd et de commuter automatiquement les points focaux de 0,3 à 10 mm de diamètre. La chambre d'échantillon est utilisée avec un détecteur de dérive en silicium, avec une option de vide, N₂, He et atmosphère d'air (PTAPC).

6.4.1.5. Diffraction des rayons X (DRX)

À l'instar des briques cuites anciennes, il est également crucial de déterminer la composition minéralogique des matières premières en utilisant un diffractomètre X'Pert PRO de PANalytical, équipé d'un détecteur X'Celerator et du logiciel HighScore pour l'acquisition et l'interprétation des données dans les conditions opératoires suivantes : CuK $\alpha_1 = 1,545\text{\AA}$ radiation, 40 KV, 30 mA, $2\theta = 3-70^\circ$ (Banchelli & al, 1997) .

6.4.1.6. Analyse thermogravimétrique (ATG)

À l'instar des briques anciennes, on évalue le degré d'hydraulicité des matières premières en utilisant une analyse thermique (DTA-TG). On peut mesurer le degré d'hydraulicité en utilisant un analyseur thermogravimétrique (TGA PERKIN ELMER) pour une détermination précise. Le principe fondamental de l'essai consiste à mesurer la perte de masse d'une substance en fonction de la température ou du temps (Dukuzg, 1990). L'échantillon étudié est en forme d'une poudre de matières sèches. Dans un premier temps, il est recommandé de broyer et de tamiser les échantillons en état dur (Medjelekh & al, 2020). La rampe de chauffe a été réglée à une température de 5°C/min de la température initiale (20°C) à la température finale (1200°C) (Fgaier, 2013). On peut obtenir des données sur les phénomènes physiques et chimiques.

6.4.1.7. Le bleu de Méthylène

La surface spécifique est déterminée par la méthode de l'indice de bleu de méthylène (MBI) selon les normes NF P94-068 (Afnor.NF P.94-068, 1998) et NF ENP 933-9 (Afnor.NF ENP. 933-9, 1999). La capacité d'adsorption ionique d'un sol est évaluée par la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour couvrir la surface totale des particules du sol. On procède en ajoutant des quantités successives de bleu de méthylène et en vérifiant l'adsorption après chaque ajout. Ainsi, on prélève une goutte de la suspension et on la transfère sur un papier filtre, ce qui crée une tache. Un bleu clair persistant se forme autour de la tache lorsque l'adsorption est maximale (Cojean, 2017).

6.4.2. Caractéristiques hydro-géotechniques

6.4.2.1. La densité absolue au pycnomètre

La masse volumique est mesurée au pycnomètre conformément à la norme XP CEN ISO/TS 17892-3 (Afnor. XP CEN ISO/TS 17892-3, 2005). La méthode implique d'évaluer le volume d'une masse connue de sol en fonction du mouvement des fluides. Il s'agit du calcul de la masse volumique en fonction de la masse et du volume du sol. Cela ne concerne que les sols dont la granulométrie est inférieure à 4 mm.

6.4.2.2. La teneur en eau

La teneur en eau est mesurée selon la norme XP CEN ISO/TS 17892-1 (Afnor. XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005) . Il s'agit de déterminer la quantité d'eau éliminée lors du séchage des échantillons dans une étuve à une température de 105°C.

6.4.2.3. L'essai de retrait simplifié (procédure essai de l'Ifsttar)

La limite de retrait selon la norme DIN EN 1015-1 (Ziegert & al, 2013). Pour évaluer la quantité d'eau minimale qui peut saturer le sol. Une « capsule de retrait » est remplie d'un sol bien saturé et mélangé. Après séchage dans un environnement contrôlé (température et humidité), on peut mesurer le poids et le volume apparent lors de la perte d'eau (Cojean, 2017). Le volume se stabilise à un poids donné et trois mesures de masse sont réalisées et le retrait peut être calculé.

6.4.2.4. Caractéristiques de compactage « Essai Proctor »

L'évaluation de la teneur en eau et des conditions de compactage se fait par essai Proctor suivant la norme NF P94-093 17 (NF P94-093,17, 2014). C'est un test dont l'objectif est de déterminer la quantité d'humidité à laquelle la densité sèche maximale du mélange est atteinte pour un certain effort de compactage, afin d'obtenir le taux idéal d'eau de gâchage des briques (Elahi & al, 2020). Le procédé s'appuie sur la préparation d'échantillons de sol avec des niveaux d'humidité graduellement augmentés. L'opération de compactage de sol se fait dans des moules avec des volumes connues et pesés, puis les poids unitaires sont calculés. Les poids unitaires augmenteront au fur et à mesure de l'augmentation des taux d'humidité, pour atteindre une humidité optimale, puis diminueront au-delà de ce niveau. Il est possible de calculer le poids sec unitaire pour chaque cycle de compactage ou « point » en ajustant la concentration d'humidité. Les résultats sont présentés à travers une courbe qui détermine la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale (Mbuyi & al, 2012; Laibi & al, 2017).

6.4.2.5. Analyse granulométrique

La détermination de la distribution granulométrique est réalisée en deux méthodes : par tamisage selon la norme P 18-560 (NF. P.18-560, 1990) , et par analyse de sédimentométrie conformément à la norme XP CEN ISO/TS 17892-4 (Afnor. XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005). En effet, on évalue la granulométrie en séparant les éléments d'un échantillon en fonction de

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

leurs dimensions, en utilisant le tamisage pour les dimensions supérieures à 80 µm. Quant à la technique de sédimentation, elle concerne les dimensions de 1 mm ou 2,38 mm² et la mesure repose sur la division de l'échantillon en suspension liquide selon la loi de Stokes. Des graphiques semi-logarithmiques sont utilisés pour les sols dont les grains ont souvent des dimensions très différentes, et des graphiques linéaires pour les graviers et les pierrailles plus homogènes (Mbuyi & al, 2012).

6.4.2.6. Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont évaluées à l'aide d'un appareil Casagrande, tandis que la limite de plasticité a été établie par essai sur fil laminé, conformément aux normes NF P94-051 (Afnor. NF.P94-051, 1993) et la norme XP CEN ISO/TS 17892-12 (ISO/TS17892-12, 2005). Le Casagrande se compose d'une cuillère remplie de l'échantillon dont on fait une rainure avec un outil standardisé. Il est soulevé et abaissé à l'aide d'une manivelle à laquelle il est fixé. La limite de fluidité correspond à la quantité d'eau nécessaire pour fermer la rainure sur une longueur de 10 mm. La limite de plasticité peut être établie en faisant une série de tiges de 3,2 mm de diamètre sur une plaque de verre rodée et en mesurant la quantité d'eau correspondant au moment où elles commencent à se fissurer. Le résultat correspond à la moyenne trois mesures. En se basant sur les résultats de l'essai, il est possible d'évaluer un indice de plasticité IP, qui correspond à la différence entre la limite de liquidité wL et la limite de plasticité wP. En étant plus élevé, l'attraction entre les particules de sol est plus intense et le sol devient plus argileux, tableau 2 (Mbuyi & al, 2012).

Tableau 2 2: Plasticité en fonction de Ip (Jacques & al, 2002).

<i>Degré de plasticité</i>	<i>Ip</i>
<i>Non plastique</i>	0 à 5
<i>Peu plastique</i>	5 à 15
<i>Plastique</i>	15 à 40
<i>Très plastique</i>	40 t plus

6.4.2.6.1. Diagramme de plasticité

En se basant sur les critères de plasticité des terres. Un diagramme de la plasticité des sols fins en six sections a été réalisé. Le schéma a été réalisé en utilisant une équation de $IP = 0,73 (wL - 20)$ et en traçant deux lignes verticales représentant respectivement $wL = 30\%$ et $wL = 50\%$. Les différents éléments du schéma correspondent à une catégorie de sols ayant des caractéristiques mécaniques particulières (Fgaier, 2013), le diagramme de plasticité est représenté dans la figure 2.27.

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

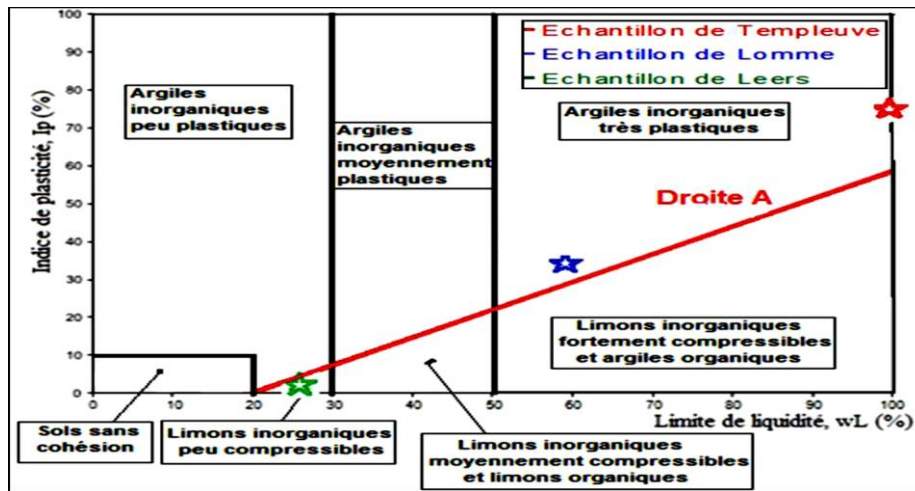


Figure 2 16: Diagramme de plasticité (Fgaier, 2013).

6.4.2.7.L'équivalent de sable

L'équivalent sable est déterminé selon la norme EN 933-8 (Afnor. NF.933-8, 1999). L'analyse est effectuée sur la portion de granulats fins de 0/2mm. La méthode consiste à prélever une quantité de sable de 120gr et à la verser dans une éprouvette graduée en plastique. Ensuite, une solution de lavage au chlorure de calcium est ajoutée à l'éprouvette, jusqu'à ce qu'elle atteigne près de 100 mm de haut. Il est nécessaire de laisser l'éprouvette pendant 10 ± 1 minute pour imbiber le test de goût. Après une période de 10 minutes, l'éprouvette est agitée pendant une durée de 30 ± 1 seconde. Une fois agitée, l'éprouvette est remise en position verticale et une nouvelle solution de chlorure de calcium est ajoutée. L'ajout s'arrête lorsque le niveau de liquide dépasse le seuil de $380 \pm 0,25$ mm. L'échantillon est laissé au repos, sans perturbation et sans vibration, pendant $20 \pm 0,25$ minutes. Avec une règle on mesure la déférence après le repos pour qu'on calcule la valeur équivalente au sable.

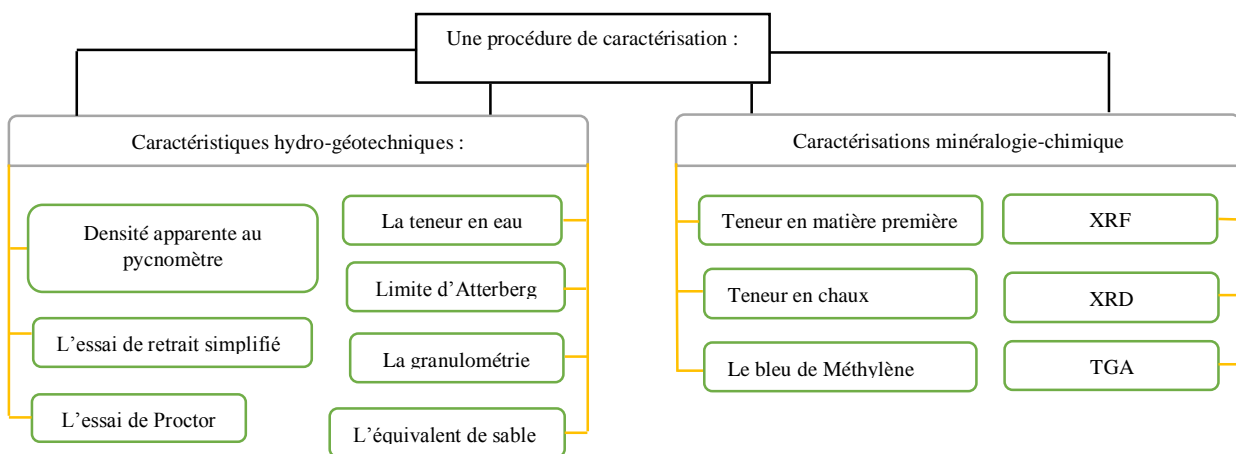


Figure 2 17: Caractérisation des matières premières, adoptée dans l'étude.

6.5. Caractérisation des nouvelles briques de substitution

Il a été démontré que la texture, le comportement mécanique et l'hydrique des échantillons de briques peuvent être largement contrôlés, ce qui permet de fabriquer des briques de substitution pour des fins spécifiques. Pour remplacer les briques historiques et définir les caractéristiques des briques de substitution, il est essentiel de se conformer de manière systématique aux normes actuelles en vigueur dans le domaine de la construction. Il est donc primordial de réaliser des essais sur la structure, la minéralogie, la chimie, le comportement et la résistance des briques confectionnées (Elert & al, 2003). En obtenant ces informations, il sera possible d'évaluer le degré d'homologation des nouveaux matériaux par rapport aux matériaux anciens. Cela aura des répercussions importantes sur la conservation des structures historiques en briques (Cultrone & al, 2004). Les tests suivants ont été sélectionnés pour caractériser les nouvelles briques de réparation et évaluer leur compatibilité avec les briques anciennes :

6.5.1. Caractérisation structurale

6.5.1.1. La densité apparente

La masse volumique apparente a été effectuée conformément à la norme ASTM C67-17 (ASTM C67/C67M-21, 2015). L'essai nécessite un séchage dans un four à 110°C jusqu'à ce que l'humidité soit complètement éliminée. Ensuite, on mesure le poids et on le divise par le volume apparent.

6.5.1.2. La porosité ouverte :

La porosité joue un rôle crucial dans la résistance mécanique et l'absorption d'eau et ainsi que la perméabilité de la brique. Elle varie en fonction de la température de cuisson et des minéraux présents dans les matières premières. Selon (Taha, 2017), la cuisson à une température élevée entraîne une structure plutôt vitreuse et une modification significative du volume (contraction) et de la porosité. En ce qui concerne, la porosité ouverte, elle est déterminée par pesée hydrostatique selon les normes NF ISO 501 et ASTM C20 (Banchelli & al, 1997). Les briques sont séchées dans une étuve à 110°C jusqu'à déshumidification. Une fois que nous avons obtenu la masse initiale (M_0), la masse émergée (M_1) et la masse trempée (M_2) (g), et la porosité ouverte peut être calculée

6.5.1.3. Retrait au séchage et à la cuisson

Le retrait au séchage est causé par la perte d'eau et la réduction de la longueur des briques vertes ou crues lors du séchage à l'air libre. En général, un retrait de 7 % est toléré, mais au-delà, il est recommandé d'ajouter un dégraissant pour la matière première afin de la stabiliser. En ce qui concerne le retrait à la cuisson, il est causé par toutes les transformations physicochimiques qui se produisent lors de la cuisson des briques sèches (Dukuzg, 1990). Le test est réalisé en respectant les recommandations de (Balogun & al, 2021; Achik & al, 2019). Cinq échantillons ont été examinés et leur valeur moyenne a été rapportée. En utilisant un pied à coulisse et une

balance étalonnée, on évalue les poids humides et à la cuisson, ainsi que la longueur initiale (L1), la longueur séchée au four (L2) et la longueur finale (L3) après cuisson. Le retrait au séchage et la perte de poids sont finalement calculés.

6.5.2. Caractérisation hydrique

6.5.2.1. Absorption d'eau par capillarité

Il joue un rôle crucial dans la durabilité des briques. Une faible absorption indique une grande durabilité et une grande résistance aux conditions atmosphériques. De plus, pour garantir une réaction optimale à l'humidité, il est essentiel que la brique puisse absorber une certaine quantité d'eau (Mbuyi & al, 2012). Elle est effectuée en conformité à la norme NF EN 771-1+A1/CN (Afnor. NF EN 771-1+A1/CN). Le procédé nécessite la détermination de l'aire "A", Section immergée dans l'eau en m², puis la différence entre chaque poids M et la masse initiale Mo a été calculée par unité de surface. Cette mesure dépend de la racine carrée du temps de pesée, du coefficient d'absorption d'eau Aw, exprimé en (kg.m².min). La marge de tolérance inférieure à 6 (AW).

6.5.3. Caractérisation mécanique

6.5.3.1. La résistance à la compression

On évalue la résistance à la compression des briques cuites en utilisant une technique de meulage et de collage, suivant les normes EN 1926/1999 (Görhan & al, 2013) et EN 771-1/CN (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017). Les échantillons constitués de deux demi-blocs superposés et collés avec un joint de mortier spécial. Ils sont soumis à une simple compression jusqu'à ce qu'ils se rompent. Le test est effectué en utilisant la machine d'essai hydraulique universelle Tinius Olsen, Super L, pour tester des matériaux critiques jusqu'à 3000 KN.

6.5.3.2. La résistance à la traction

Quant à la résistance à la traction, elle est mesurée selon la norme NR (EN 771-1/CN) (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017), (XP P 13-901, 2001) conformément à l'essai de traction par fendage (essai brésilien) (Azil & al, 2022; Boubekour & al, 2022). Les briques cuites sont soumises à une compression le long de deux tiges situées de part et d'autre de l'autre face d'une brique, ce qui entraîne une contrainte de traction le long d'une facette verticale passant entre ces deux tiges (Azil & al, 2022). Utilisation de la machine d'essai hydraulique universelle Tinius Olsen.

Cinq échantillons ont été testés pour chaque essai, et la moyenne a été considérée comme résultat final.

6.5.4. Caractérisation physicochimique

6.5.4.1. Taux de carbonate de calcium

Le taux de carbonate de calcium est mesuré à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling en respectant la norme NF P 94-048 (Afnor. NF P94-048, 1996). L'essai consiste à évaluer le niveau de CO₂ libéré par l'action d'un excès d'HCl (à des températures et pressions atmosphériques connues) sur un échantillon spécifique. La quantité de CaCO₃ est calculée en fonction du volume de gaz correspondant à l'élévation du niveau du liquide dans la burette (Fgaier, 2013).

6.5.4.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Tout comme pour les briques anciennes, il est crucial d'analyser la morphologie de surface des briques nouvelles cuites à l'aide d'une microscopie électronique (JCM-5000 NeoScope) conformément à la norme ISO 22493 : 2008 (En) (ISO 22493, 2008). Comme on l'a vu plus haut, la technique consiste à faire balayer les surfaces par un faisceau d'électrons et à recueillir l'image qui en résulte. Il est essentiel de procéder à la métallisation à l'or afin d'améliorer la conductivité et donc la qualité de l'image (Achik & al, 2019).

6.5.5. Caractérisation environnementale

6.5.5.1. Test de lixiviation

Afin de terminer la description de nouveaux produits, il est primordial de considérer leur impact sur l'environnement. Il s'agit d'une analyse chimique visant à évaluer si la présence de métaux lourds est significative et peut être préjudiciable à la santé humaine et à l'environnement, ou bien l'inverse, On l'utilise également pour considérer l'efficacité des techniques de stabilisation ou solidification des polluants après traitement (Taha, 2017). La lixiviation des métaux lourds est évaluée à l'aide de la méthode de caractérisation toxique du lixiviat (TCLP) (US-EPA 1311). Les métaux lourds les plus concernés sont le chrome (Cr), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), l'arsenic (As), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb). Les conclusions de l'analyse sont comparés aux limites établies par l'US EPA (1996) concernant la concentration de métaux lourds (Kadir & al, 2018; Dubale & al, 2024). Quant au protocole d'essai, les échantillons sont broyés et tamisés à l'aide d'une fibre de verre de 0,7 µm. Le liquide standard est préparé en utilisant 1 mol de NaOH et de HCl. Ensuite, deux fluides d'extrait doivent être préparés. Il est recommandé que le pH de l'extrait 1 soit de 4,93, puis ajoutez de l'acide acétique glacial et du NaOH à l'eau. En revanche, le pH de l'extrait 2 est de 2,88, puis ajoutez de l'acide acétique glacial avec de l'eau sans NaOH. L'échantillon devrait alors être préparé dans des bouteilles à vis en polyéthylène, lixivé à 1,20, puis agité à 30 tr/min pendant 18 heures. Selon (Kadir & al, 2018), le lixiviat est filtré à l'aide de filtres en fibre de verre de 0,7 µm et analysé à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique PinAAcle 900 H/PerkinElmer afin de déterminer les métaux dissous (Samara & al, 2009).

CHAPITRE II

**LA FABRICATION DES BRIQUES CUITES COMPATIBLES
POUR UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE DE L'ANCIEN
BATI EN MACONNERIE**

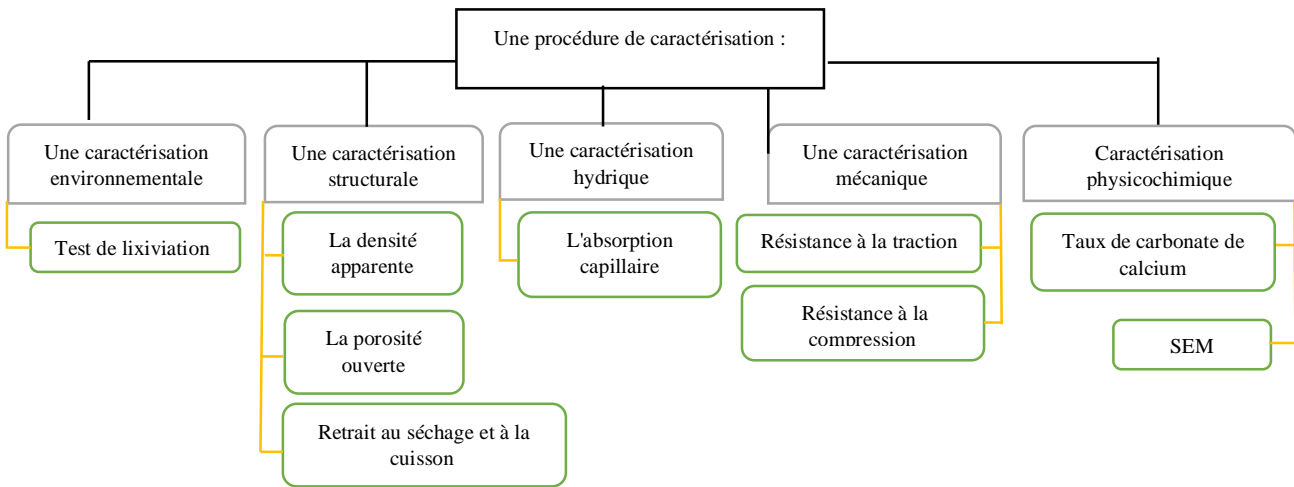


Figure 2 18: Caractérisation des briques nouvelles, adoptée dans l'étude.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, différents problèmes auxquels les maçonneries historiques peuvent être confrontées ont été considérés. Différentes méthodes utilisées pour détecter les dommages in-situ, ainsi que les solutions techniques appropriées proposées pour les réparer. Des techniques d'analyse et des procédés de réhabilitation ont été développés par des chercheurs et des scientifiques spécialisés et la synthèse de leurs retours nous a permis de présenter une nouvelle méthode basée sur la production de briques cuites à partir de terres argileuses et des déchets industriels. La réhabilitation de ce cadre de bâti, revêt une importance capitale pour les générations actuelles et futures, car elle assure la compréhension et la transmission des valeurs culturelles et les moyens de partage des connaissances de l'histoire respective. En dépit de la variété et de la disponibilité des solutions pour la réhabilitation de l'ancien bâti, les matériaux durables proposent une nouvelle voie, peu étudiée, mais qui offre un potentiel important pour résoudre le problème de la dégradation d'un héritage de grande valeur tout en préservant notre environnement. Une méthode peu répandue qui peut être élargie afin d'évaluer son efficacité dans le domaine de la réhabilitation. Cette approche repose sur une série d'essais de caractérisation élaborée, menés par des laboratoires et des centres de recherche expérimentés. Il convient de souligner qu'il n'y a pas de standard et d'approche propre à toutes situations, vu que les causes de la détérioration des briques sont multiples et variées, et chaque situation est unique. Enfin, les enseignements tirés de ce chapitre constitueront une base scientifique pour approfondir notre thématique. Nous avons pour objectif de trouver des solutions de réhabilitation des briques cuites historiques en maçonnerie, notamment celles provenant des immeubles de Didoudche Mourad, situés à Skikda en Algérie.

CHAPITRE III
ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES
PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD,
SKIKDA ».

CHAPITRE III :

**ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES
PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».**

Il s'agit d'un chapitre, évocateur des détails sur les briques en terre cuite prélevées de vieux bâtiments de style colonial de Skikda, sujet de la recherche. Des entretiens, investigations et des diagnostics sont réalisés in-situ, suivis du prélèvement de plusieurs échantillons de briques cuites pleines de site. Les résultats obtenus permettront d'identifier le matériau d'origine, d'explorer son état, sa nature, ses composants et même sa température de cuisson.

1. PRÉAMBULE

La ville de Skikda abrite un héritage architectural, constitue une partie marginale de l'ensemble du cadre bâti et représente un ancrage qui peut empêcher les ruptures historiques et la désulfuration, malgré son état de désorganisation et dégradation alarmante. Il devient donc, nécessaire de reconnaître, une remise à niveau, afin de préserver ce legs en assurant un cadre de vie propice à la santé des citoyens. À cet égard, la Rue Didouche Mourad, sis au centre-ville de Skikda, a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières années afin de mettre en avant un legs bâtis de style colonial. Étant donné que les autorités ont finalement pris la décision de lancer l'opération de réhabilitation et ont mobilisé les fonds requis. Cela n'a cependant pas été suffisant pour résoudre le problème, car un handicap technique important s'est posé. Effectivement, « pour assurer le succès d'un projet de réhabilitation, il faut à la fois offrir une expertise précise et suivre le déroulement de l'opération, et choisir les matériaux adéquats pour ce parc immobilier ». L'originalité de travail, réside dans le choix de l'expérience de réhabilitation des immeubles de la rue Didouche Mourad, en l'occurrence les briques cuites, comme un vieux matériau prélevées de l'immeuble 12 îlots 17. C'est à ce titre que nous poursuivons nos recherches afin d'acquiescer de présenter un outil méthodique qui contribue à l'élaboration d'une stratégie scientifique pour le développement de matériaux respectueux de l'environnement adaptés à la réhabilitation des immeubles anciens de style néoclassique.

Ce troisième chapitre est initié par une présentation significative de ce prestigieux centre historique et culturel, puis un état des lieux mettant en évidence les différentes pathologies dont souffrent les bâtiments, en mettant l'accent sur celles liées à la dislocation des briques d'origine. Ensuite, il convient de recueillir différents échantillons et de les analyser en laboratoire en utilisant une méthodologie de caractérisation. Il s'agit d'identifier la composition des briques d'origine et les facteurs qui l'ont détérioré. La méthodologie de caractérisation des briques de terres cuites et les résultats de cette expertise sont abordés à la fin de ce chapitre, qui se limitera d'ailleurs aux essais de caractérisation de l'ancienne brique, souvent réalisés dans le domaine de la réhabilitation du patrimoine bâti.

2. PRESENTATION DE SITE

2.1. La Ville de Skikda

Les nouvelles briques écologiques sont destinées pour remplacer des briques pleines anciennes prélevées des bâtiments de la rue Didouche Mourad, dans le vieux centre-ville de Skikda. En

premier lieu, il s'agit d'une ville située dans l'Est du littoral algérien, dont la superficie est de 4137,68 km². Carrefour des commerces des villes voisines, point de rencontre des quatre points cardinaux, point de convergence entre l'intérieur de la région et la mer, Skikda Est, a traversé les différentes périodes d'occupation qui s'y sont succédées grâce à son port (confondu à juste titre avec celui de Stora) qui est unique (Tazairt, 2007). C'est dans la vallée du Zeramna que s'est développé le centre ancien (romain et colonial), entouré des collines de Bouyala-Sebâe Biar à l'Ouest et de Skikda-les Mouadde (connue sous le nom de Bouabbaz) à l'Est (Tazairt, 2007). De point de vue climatique, la région est dominée par un climat subtropical caractérisé par un été chaud et sec et un hiver relativement doux et pluvieux. La moyenne annuelle de température est de 13.8°C et 21.5°C, avec une moyenne annuelle de précipitations d'environ de 650 mm à 1800 mm (BOUBELLOUTA F, 2022). Les précipitations sont assez importantes, fluctuantes et irrégulières d'une année à l'autre (Kaouche, 2015; Belhadj, 2017). La direction des vents est orientée d'Ouest en Est, avec une forte humidité au Sud-Ouest. Le vent chaud et sec, le Sirocco, est présent dans les piémonts (Wilaya de Skikda, 2007). En outre, la localisation de la base industrielle pétrochimique en bord de mer a des répercussions néfastes sur l'environnement liées à la pollution de l'air par l'émission de gaz polluants (Boulaksa, 2002).

2.2.La Rue Didouche Mourad

2.2.1. Genèse historique

Notons que le centre-ville de Skikda est un trésor architectural et matériel de diverses périodes historiques : antique, romaine, vandale, arabo-musulmane, coloniale et de l'indépendance (VARIS, 1896; Solal, 1900; Bertrand, 1903). Notamment, la rue principale, connue sous le nom de rue Didouche Mourad. Une artère construite en 1839 par le gouvernement français, selon le style architectural européen repris dans les nouvelles villes du Maghreb. 24 ilots (DUAC, 2016) qui s'étendent sur 28 300 m² et ont été construits pendant plus d'un siècle, à la suite des extensions effectuées par les exploitants (OPGI Skikda, 2016). Ce site est caractérisé par une façade d'arcades homogène et simple, caractérisée par sa structure traditionnelle comprenant des soubassements, des corps décoratifs et de nombreux couronnements, etc. Les études intégrées de réhabilitation d'anciens bâtiments de la ville de Skikda, dont 27 bâtiments de la rue Didouche Mourad, menées par le CTC (Contrôle technique de la construction) Annaba et l'EPSEB-UPC (Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona- Universitat Politècnica de Catalunya) à Barcelone en 2016, ont témoigné que la majorité des murs des bâtiments sont en briques cuites, tandis que les planchers sont constitués de poutres métalliques et de voûtes en briques entièrement cuites ainsi que d'arcs (Ministère du Logement, 2014; OPGI Skikda, 2016). Le rapport révèle encore, qu'une part significative de parc bâtis (70 % de l'ensemble) requiert une intervention immédiate. Étant donné l'émergence d'une série de problèmes, affectant les murs, comme la perte de masse matérielle constitutive ou les fissures profondes, l'arrachement et la décomposition des éléments de briques causés par les agents biologiques et les champignons répandus (OPGI Skikda, 2016). L'humidité, l'eau sulfatée, la pollution de l'air, l'insolation cyclique, la brusque baisse de la température, le vent et l'énergie cinétique sont aussi des facteurs favorables à la désagrégation abrasive (CTC Skikda et BET Aquidos, 2015). L'influence des substances métalliques corrosives qui entraînent la formation de dépôts et les dommages à la maçonnerie a été prise en considération (Attar, 1994; Xavier, 2012). Une situation devant laquelle, les autorités ont mobilisé des fonds

CHAPITRE III : ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».

afin de mettre en œuvre un projet de réhabilitation majeur. Il convient de souligner que plus de la moitié des immeubles ont subi des modifications, des expansions et des transformations au fil du temps. Il est possible de trouver des bâtiments avec une architecture modifiée et éloignés de l'architecture de projet en raison de cette architecture permanente.

Un excellent support pour commencer l'investigation, mais on est focalisés sur un seul matériau traditionnel, précisément la brique en terre cuite, un matériau le plus couramment employé les anciennes bâtisses. Le produit original n'est plus commercialisé et les experts cherchent un substitut pour le remplacer. Ces données suggèrent une véritable base de données scientifique pratique pour la création de matériaux de rechange appropriés et adaptés à l'ancienne brique.

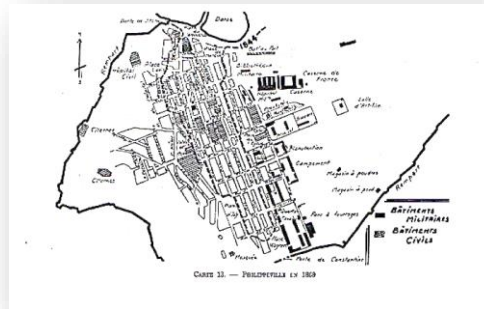


Figure 3 1: Situation de la ville de Skikda (Kaouche, 2015).

Figure 3 2: Carte de Philippe ville et sa région 1837-1870 (Solal, 1900).



Figure 3 3: L'avenue Didouche Mourad datant à l'époque coloniale (<https://www.facebook.com/Skikda.une.ville.une.histoire.>).

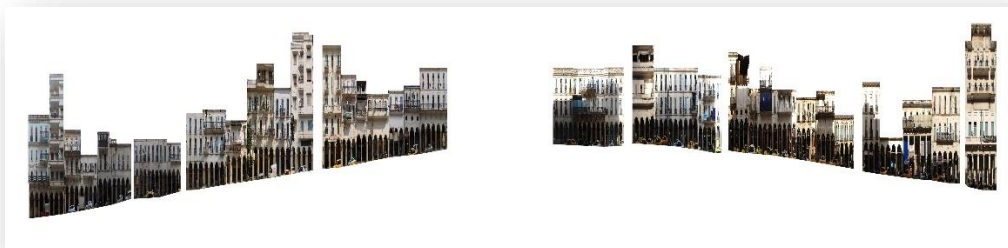


Figure 3 4: Façade de l'artère de la Rue Didouche Mourad (CTC Est, 2012).

CHAPITRE III : ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».



Figure 3 5: Les limites de l'avenue Didouche Mourad. Par rapport aux communes et la position de l'ilot 17 sur la carte (CTC-EST/AQUIDOS).



Figure 3 6: L'ilot 17 à l'ancienne époque (CTC-EST/AQUIDOS). **Figure 3 7:** L'ilot 17 à l'ancienne, actuellement, cliché auteur, 2017.

2.2.2. Description de l'état de lieu, usage et aspects fonctionnel

Les bâtiments sont répartis sur plusieurs niveaux, offrant une vue sur la rue Didouche Mourad. Dans certains cas, il y a des sous-sols, une cour centrale et une mezzanine, ainsi que des locaux au rez-de-chaussée et des toits de plusieurs niveaux, soit en bois avec des tuiles arabes, soit beaucoup plus modernes. Ils sont à usage résidentiel, comprenant des commerces et des bureaux au rez-de-chaussée.

Les locaux sont ouverts sur l'extérieur grâce à des fenêtres et accessibles à la mezzanine par un escalier particulier. Au sous-sol se trouvent des caves qui sont actuellement hors usage et la communication verticale est assurée par un escalier situé à l'entrée principale des immeubles. Il convient de noter la présence d'un débarras communautaire situé sous la cage d'escalier. Les toilettes sont généralement communes à chaque étage. L'immeuble est accessible à l'intérieur par une grande porte principale située au centre d'une de ces façades.



Figure 3 8: Façade urbaine de l'ilot 17, (OPGI Skikda, 2016).

2.2.3. La composition architecturale et l'analyse physico-constructive des bâtiments

Des visites sur place, des prospections visuelles in-situ et des prélèvements d'échantillons pour étude en laboratoire ont été effectués pour analyser les systèmes portiques des immeubles. Un processus expérimental a été mis en place pour recueillir des informations sur les systèmes constructifs visibles et apparents, les matériaux utilisés, ainsi que d'autres informations nécessaires pour un diagnostic approprié. L'exploration a été réalisée en choisissant les endroits les plus adaptés pour saisir et connaître le type de la structure et l'état de conservation. Le système structurel de l'ensemble est exposé ci-dessous :

2.2.4. La structure verticale, horizontale et escalier

Il s'agit de murs porteurs en briques céramiques ou en maçonnerie, avec plusieurs travées parallèles à la façade des arcades et parfois dans le sens longitudinal et transversal de la façade. Les planchers ont été soit en bois avec des poutrelles en bois, soit en céramique avec des profilés métalliques, et parfois en béton armé ou des dalles massives, ou encore en céramique et en béton. De plus, les escaliers sont fabriqués en limons métalliques et en hourdis en céramique recouverts de plâtre.

2.2.5. La description de l'enveloppe

2.2.5.1. Façades

La façade principale est d'ordre classique avec un soubassement, un corps et des couronnements. La base est constituée de plusieurs arcades sur des piliers à base et imposte. Elle se compose de plusieurs niveaux, avec des portes fenêtres réparties de manière régulière et des balcons individuels avec garde-corps et les lignes de corniches qui toujours indiquent le niveau des planchers. La façade est recouverte de mortier à la chaux et peinte en blanc. Toutefois, aujourd'hui, la peinture est légèrement dégradée. Les piliers sont recouverts de mignonette. Les murs mitoyens sont réalisés en utilisant un enduit de ciment et de peinture. Des cheminées qui dépendent de l'orientation du mur. Il s'agit parfois d'ouvertures de dimensions diverses et sans ordre, qui ont probablement été réalisées après la construction initiale des bâtiments.

2.2.5.2. Toiture

Les toitures plates ou à deux, trois ou quatre versants, parfois modifiées. A poutres et pannes en bois, sur lesquelles sont posés des chevrons et des liteaux en bois, et des tuiles en profilés métalliques de couleur verte ou rouge, proches des tuiles marseillaises et même des tuiles arabes. Elle est parfois dotée d'un lanterneau, vitré, qui éclaire une partie inférieure. Ou équipée d'un compartiment appelé lucarne de type coupole, constitué de poutres en béton.

2.2.5.3. Planchers et clôtures en contacts avec le sol

En sous-sol, les murs porteurs sont appuyés sur de grands arcs. Les murs périmétraux sont en concordance avec les façades et sont des murs de soutènement. D'après des documents conservés à la PC, une partie des murs s'étend sur le sol.

2.2.5.4. Menuiseries et serrurerie

La plupart sont construites en bois, avec des volets en bois et peintes au niveau supérieur. Toutefois, dans les parties inférieures, elles sont protégées de grilles métalliques et certaines ont été remplacées par d'autres en aluminium. Les fenêtres ajoutées incluent de la menuiserie de différentes teintes et dimensions, qui ne sont pas en rapport avec l'ensemble.

2.2.5.5. Description de cloisonnement intérieur

Les murs sont en brique pleine et peints de plâtre, la cuisine, les toilettes et les salles de bains sont en faïence. Les faux-plafonds originaux sont constitués de baguettes et de lattis en bois, fixés sur des solives en bois et recouverts de plâtre. À la différence de ceux qui ont été installés ultérieurement, ils sont démontables ou en plaque plâtre.

3. L'ETAT DE CONSERVATION DES IMMEUBLES

3.1. Désordres

L'objectif de cette étape est d'évaluer la condition de conservation du matériel mécanique et de garantir sa pérennité. Le domaine de l'expertise implique l'analyse de la structure mécanique, de la résistance des matériaux, des conditions de fonctionnement, des déformations, de l'humidité, de la perte de section, etc. La description des problèmes associés à l'ensemble est présentée ci-dessous, organisée par système de construction :

3.1.1. Structure de la couverture

Certaines toitures ont été modifiées, ou il faut reprendre leur forme d'origine. Les poutres en bois souffrent de problèmes de pourriture en raison de l'humidité due aux infiltrations, notamment en tête de poutres. Des insectes xylophages, comme des vrillettes de grande taille, sont également présents, ce qui entraîne une diminution de 2 à 3 cm de section et l'apparition de quelques fissures horizontales. Il faut également remplacer les pannes, les chevrons et les liteaux en bois qui supportent les tuiles, car ils sont également abîmés et cassés. Quant aux tuiles, certaines ont été visiblement réparées, avec des feuilles d'étanchéité auto-protégées, ou remplacés par une toiture de profilés métalliques vertes. Néanmoins, les joints ouverts de cette couche d'étanchéité permettent parfois la filtration des eaux, qui sont visibles à l'intérieur des logements. Les éléments de la couverture, modifiés et reconstruits en béton avec des profilés métalliques, sont corrodés au niveau des poutres par des filtrations d'eau.



Figure 3 9: La charpente en tuile est entièrement démolie.



Figure 3 10: La charpente en tuile est entièrement démolie.



Figure 3 11: La structure en tuile en bois est entièrement détruite.



Figure 3 12: Des pannes, et les liteaux en bois, entièrement cassés.



Figure 3 13: Une flamande de type verrière en très mauvais état.



Figure 3 14: Une cheminée en briques endommagées.

3.1.2. Structure verticales

Les piliers des bâtiments ne présentent pas de problèmes majeurs, mais, en termes de sécurité, il faudrait les renforcer de façon structurelle. Les fissures des murs de l'intérieur et de la façade ne sont pas structurelles, elles ont été causées par la corrosion des éléments en fer. On a constaté l'utilisation de briques perforées et d'autres matériaux inappropriés par les habitants lors des travaux d'entretien et de transformation. La durabilité de ces bâtiments est alors mise en doute.



Figure 3 15 : Le mur de séparation en briques est fissuré.



Figure 3 16: Une arcade était fissurée et comblait de ciment.



Figure 3 17: Utilisation de briques perforées pour remplir un mur de séparation.



Figure 3 18: Le mur de la façade est fissuré par l'intérieur.

3.1.3. Structure horizontale

Les planchers sous terrasses sont fabriqués à partir de profilés métalliques avec des hourdés en céramique. Leur déformation entraîne une variation de la distance entre les appuis. Les poutres sont partiellement corrodées, ce qui provoque l'apparition de fissures sur les murs. Les travées devraient être renforcées en réduisant la distance entre les appuis et les poutrelles. Pour les planchers de sous-sol, composés de profilés métalliques et d'hourdis céramiques, qui s'appuient sur les murs de maçonneries et leurs grands arcs en céramiques, à l'exception de quelques paries qui ont été oxydées par condensation et humidité.

En ce qui concerne le toit des arcades, les poutres transversales en bois ont connu une dégradation considérable en raison des infiltrations d'eau. Elles sont endommagées sur toute la longueur de la poutre et dans les appuis, ce qui implique un remplacement complet.



Figure 3 19:Le détachement de la peinture, par l'humidité.

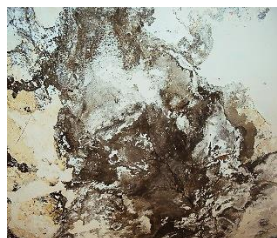


Figure 3 20: Détérioration de l'enduit et formation de salissures à la suite de l'humidité.



Figure 3 21: Destruction totale de la partie inférieure du plancher en bois.



Figure 3 22: L'effondrement partiel du planché et l'apparition de la partie a voûtain.

3.1.4. Fondations et caves

Dans l'étude de l'intérieur et de l'extérieur des murs du rez-de-chaussée, nous n'avons pas trouvé d'anomalies organoleptiques visibles, ce qui pourrait faire penser à une pathologie fondamentale. De leur côté, les caves sont toutes inondées et hors service, et dans certains cas remplies de déchets et de débris.



Figure 3 23:L'accès aux caves est encombré de déchets.



Figure 3 24: Des caves qui servent de débarrât.



Figure 3 25: Des caves encombrées de débris.



Figure 3 26:Une caves inondé par les eaux d'assainissement et les eaux sous terraines.

3.1.5. Escaliers

Les escaliers en profilés métalliques et en hourdis en céramiques ne sont pas, en général, touchés par le désordre structurel, contrairement à ceux qui sont fortement modifiés, en réduisant la largeur de leurs passages. Les limons des escaliers sont parfois oxydés et le revêtement des sols est en mauvais état, mais l'escalier est facile à réparer. Les dimensions initiales de l'escalier doivent donc être reproduites. Par ailleurs, Il est également impératif de récupérer les garde-corps d'origine et de substituer les segments de briques endommagés par des briques adéquates. Les profilés métalliques sont irrécupérables en raison de la corrosion excessive provoquée par l'eau de pluie de la cour.

CHAPITRE III : ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».



Figure 3 27: Une marche en partie endommagée.



Figure 3 28: Déconstruction de la partie inférieure de la cage d'escalier.



Figure 3 29: Palier de la cage d'escalier entièrement détruit.



Figure 3 30: La partie inférieure de la cage d'escalier et complètement arraché.

3.1.6. Façade

Certaines façades montrent l'émergence des fissures importantes, depuis les ouvertures des portes balcons jusqu'aux couronnements. En outre, les revêtements, les corniches et les couronnements sont très dégradés. Avec des taches de peinture et de saleté. Certaines moulures ont eu un détachement de masse matérielle, de matière constitutive.

Il est nécessaire de réparer la menuiserie, ainsi que les éléments en bois. Il est également essentiel de nettoyer les éléments en fer de garde-corps, notamment leurs points d'ancrage. Malgré l'ajout de persiennes et de vitrines dans les magasins, les portes d'entrée sont originales. Les balcons présentent fréquemment des taches d'humidité due aux filtrations d'eau. En outre, due à la corrosion des armatures, la couche de recouvrement en béton s'est détachée, laissant les armatures en plein air.



Figure 3 31: Une console endommagée.



Figure 3 32: Corniche endommagée.



Figure 3 33: Les barreaudages en armatures sont corrodés.



Figure 3 34: Un mur porteur, latéral, présente de profondes fissures.



Figure 3 35: L'arcade est entièrement décapée.



Figure 3 36: La façade est entièrement vieillie.



Figure 3 37: L'altération de la peinture et l'apparition de moisissures.



Figure 3 38: Décollement des couches d'enduits de la façade.



Figure 3 39: Les efflorescences et la poussée de la végétation sur la façade.



Figure 3 40: Des fissures et détérioration des murs porteurs.



Figure 3 41: Utilisation de briques perforées pour remplir une partie de la paroi.



Figure 3 42: La porte fenêtre a complètement disparu.

4. CARACTERISATION ET EVALUATION, DES MATERIAUX ET ANALYSE CHROMATIQUE

4.1. La caractérisation de différents matériaux

Dans ce projet, une identification et une analyse collective des systèmes constructifs et matériaux a été réalisées, sans chercher à les identifier de façon spécifique et unique pour chaque bâtiment. Les données collectées donnent une vue d'ensemble des matériaux en terre cuite, qui ont été recueillies lors d'une campagne d'inspection qui a impliqué la collecte d'échantillons et l'analyse des résultats dans deux laboratoires, à savoir celui de Skikda et un autre laboratoire de matériaux, l'EPSEB-UPC (OPGI Skikda, 2016).

4.1.1. Caractérisation des mortiers

Quatre échantillons de mortier ont été prélevés et analysés, et ils sont classés en quatre catégories en fonction de leur porosité : mortier très poreux, mortier de ciment, mortier à la chaux et mortier peu poreux.

4.1.2. Caractéristiques des briques cuites

À partir de vingt-cinq échantillons de briques cuites, classés visuellement et par microscopie optique, ainsi que par leurs similitudes extérieures, cinq types ont été repérés :

4.1.2.1. Caractéristique des briques type A

Ces briques présentent une grande porosité ouverte, avec des rayons de pores visibles à l'œil nu. Il y a également une porosité orientée et une grande quantité de porosité non orientée, ce qui suggère qu'elles sont des briques naturelles. Le dégraissage se compose essentiellement de quartz angulaire (de 1 à 5 mm) et de fragments de roches métamorphiques tubulaires de 1 à 8 mm de diamètre. Leur couleur est d'un rouge intense.

4.1.2.2. Caractéristique des briques type B

Elles sont peu poreuses dans les ports grands, tandis que celles observées à l'œil nu sont microporeuses orientées. C'est pourquoi on les qualifie de brique creuse. Le dégraissage est extrêmement petit, on peut observer des fragments de roches métamorphiques (phyllithes)

angulaires de 1 mm de taille et des petits grains de quartz de 0.2 mm. Elles sont d'une couleur rouge clair orangé.

4.1.2.3. Caractéristique des briques type C

En raison de leur porosité arrondie et de leur pâte mal mélangée, il est impossible de dire que ces briques soient creuses. Elles sont essentiellement siliceuses, mais elles renferment également une faible quantité de carbonates. Le processus de dégraissage implique l'utilisation de grains de quartz angulaire de 1 à 3 mm de taille, ainsi que de grumeaux d'argile mal cuite. C'est précisément ces grumeaux qui ont brisé et divisé la pâte. Leur couleur est d'un rouge-marron.

4.1.2.4. Caractéristique des briques type D

Les briques sont creuses en raison de leur microporosité et de leurs pores arrondis plus grands (millimétriques) orientés de manière directe. Il y a un nombre considérable de nodules brûlés, noirs et fins. On trouve aussi des nodules blancs de 0,5 mm, plus ou moins arrondis, qui ne sont ni calcaires ni quartzeux. Les fragments de roches métamorphiques de type « Phyllithe » sont également présents, mais pas en quantité importante. Leur couleur est rouge-marron.

4.1.2.5. Caractéristique des briques type E

Ce sont des briques beaucoup plus poreuses (avec des fissures macro et micro), mais il n'est pas clair qu'elles soient creuses. Le processus de dégraissage est constitué d'un grand nombre de nodules blancs, de 0,5 mm ou moins, arrondis. On peut également observer des roches métamorphiques de type phyllithe de 8 mm. On retrouve aussi des échantillons de roches métamorphiques de type phyllithe de 8 mm. De plus, des couches de sable rouge plus épaisses sont présentes. Par ailleurs, les grains de quartz sont très fins (0.2 mm). Ils ont une couleur rouge-marron, similaire à celle d'un type D.

Tableau 3 1: Les valeurs des tensions et porosités de briques, effectuées au laboratoire UPC.

Nombre de briques	Tension de brique corrigée (N/mm ²)	Porosité %
4	Inférieur à 10	29-45
11	10-19 Brique normale, selon « SE, fabrica »	(Moyenne 23)
10	brique bonne, selon « SE, fabrica »	

4.1.3. Type et épaisseur de joint

L'évaluation organoleptique doit être réalisée à l'aide d'un objet métallique tel qu'un canif, une clé, etc., pour gratter le joint. Si le joint se détache facilement, on le désigne comme « mauvais ». Alors qu'en cas de désagrège total, il se considère comme parfait. Les situations intermédiaires sont considérées comme passables.

CHAPITRE III : ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».



Figure 3 43: Le groupe AQUIDOS, lors d'une inspection sur site.



Figure 3 44: Des outils d'inspection.



Figure 3 45: Échantillonnage sur planché.



Figure 3 46: Prélèvement sur les colonnes des arcades.



Figure 3 47: Des échantillons de matériaux déferents.



Figure 3 48: Préparation des échantillons en vue de l'analyse.

4.2. L'étude géo-technique

Il a été réalisé par le laboratoire de l'habitat et de la construction de l'unité EST de Skikda. Le laboratoire a opté pour des sondages carottés, avec prélèvement d'échantillons intacts ou modifiés. On a sélectionné les résultats obtenus pour l'ilot de prélèvement de briques, à savoir : Question n°07 : Ilot 17 :

Le sol est composé d'un bitume de 0,20 m et d'un remblai de corps de chaussée de 0,5 m. La couche de remblais d'environ 6 m d'épaisseur est suivie d'un alluvion récent consolidé d'argile schisteuse, d'un brun rougeâtre à un grisâtre, jusqu'à 10 m de profondeur.

Il présente une densité légèrement humide et une compression modérée. Il est composée d'un mélange argilo-limono-sableux avec l'ajout de gravier, ce qui lui confère une granulométrie étalée, un angle de frottement de 20-22 et une cohésion de 0.20 à 0.23 bars. D'un point de vue chimique, il ne contient que des résidus de sulfates SO_4 , 0.20% de carbonates $CaCO_3$ et « 0.21-0.24 » de chlorures (Cl^-), ainsi qu'une absence totale de matière organique, et une agressivité de sol vis-à-vis le béton est nul, conformément au standard NF P 18-011 du 06/92.



Figure 3 49: Les points de sondage.



Figure 3 50: La réalisation des carottes.

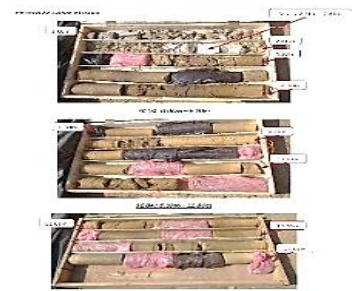


Figure 3 51: Les carottes.

4.3. La synthèse

D'après nos observations, nous sommes persuadés que cette situation de dégradation est le résultat de plusieurs années de négligence, ce qui a conduit à l'élaboration de cette initiative de réhabilitation de ce parc bâti. L'étude de cette expérience a mis en évidence un ensemble de principes indispensables à son succès. En effet, une communication inadéquate entre les différentes parties concernées peut mettre en péril la réussite de l'opération. En outre, du point de vue technique, ce domaine demande une grande vigilance dans le choix du groupe « architectes, entreprise, artisans », nécessairement capable de satisfaire aux exigences du cahier des charges et de réaliser les travaux. Conditions que les autorités concernés ont cherché à respecter au maximum en optant pour un bureau d'études étranger avec de grandes compétences, mais ce dernier n'a pas réussi à trouver les solutions économiques les plus appropriées. Ainsi, on est encore très loin de la maîtrise d'une opération de réhabilitation tant sur le plan technique que méthodologique.

Enfin, il est clair que le succès du projet dépend de la transparence et de l'implication des habitants des quartiers, mais aussi du savoir-faire, de la pluridisciplinarité et de la coopération entre les différents intervenants. Il s'agit aussi de sélectionner les matériaux adéquats, de tenir compte des désirs et des attentes des résidents, couronnés par une politique efficace pour la réhabilitation du vieux bâti.



Figure 3 52: Les étapes de réhabilitation d'une terrasse.

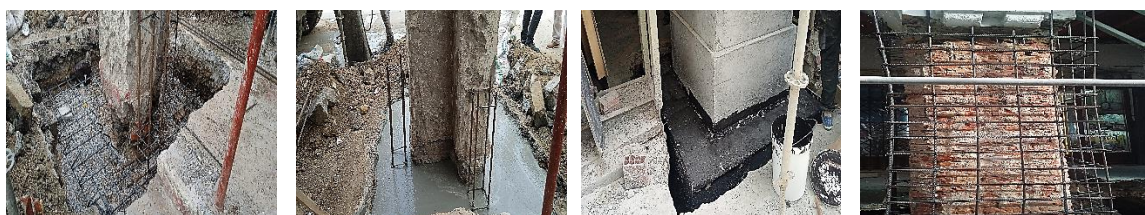


Figure 3 53: Chemisage des piliers et renforcement des fondations a tria-soudés.



Figure 3 54:
Reconstruction des murs
en briques cuites
perforées.



Figure 3 55: Façade avant
la réhabilitation.

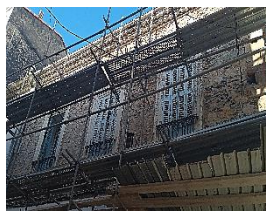


Figure 3 56: Façade au
cours des travaux de
réhabilitation.



Figure 3 57: Façade après la
réhabilitation.

5. L'ETUDE DE BRIQUES CUITES PRELEVEES DES IMMEUBLES DE LA RUE DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA

5.1.La provenance des briques

Lors des travaux de réhabilitation de la Rue Didouche Mourad, une ouverture a été créée dans un mur porteur pour permettre l'accès à un espace de charpente et un échantillonnage a été réalisé en collectant des briques de référence utilisées dans notre étude, en particulier du bâtiment 4, situé dans le 17ème ilot, comme le montre la figure 3 58. Lors du contrôle visuel in situ, on constate que les briques sont pleines, parallélépipèdes, mesurant 22*11*5 cm d'une couleur rouge clair ou orange.



Figure 3 58: Les briques prélevées d'un mur de la terrasse de l'immeuble n.4, ilots 17, prise d'auteur, cliché auteur.

5.2.Investigation

D'un point de vue méthodologique, un procédé archéologique utilisé pour expérimenter l'histoire des briques cuites, utilisées dans la construction de l'immeuble 4, Ilot 17, ainsi que les accidents qui en ont marqué l'existence. Certaines briques sont datées de manière directe, non destructive et absolue en combinant des dimensions matérielles, des sources écrites et historiques, ainsi que des données statistiquement collectées à partir des enquêtes et des recherches scientifiques, pour une compréhension approfondie (Puttaluga, 2009; Pittaluga, 2009). Comme évoqué auparavant, le prélèvement a été exécuté en immeuble n°4, ilot 17, construit en 1907, dans niveau de certaines zones homogènes à l'intérieur des parties structurelles, qu'on a pu atteindre lors d'une opération de reconstitution. Une étape effectuée dans le cadre d'un projet de réhabilitation à petite échelle, en suivant le processus classique de prise de connaissance des briques anciennes (Brás, 2016) et de détermination des outils, des techniques et des instruments nécessaires pour les réhabiliter ou remplacer (RéhabiMed, 2008; Assia, 2019).

Un entretien avec des anciens employés de l'ancienne briqueterie de Skikda et des spécialistes du domaine nous a informés que les terres utilisées pour la fabrication des briques à cette époque sont des terres de couleur "noire et jaune" de type maigre, souvent stabilisées avec de la poussière de la céramique. Le procédé de fabrication impliquait l'extraction manuelle de la terre à l'aide de pioches et de pelles, puis à la transporter sur des bêtes vers l'espace de stockage. La préparation implique un broyage, un laminage et un moulage réalisés à l'aide de machines,

CHAPITRE III :
**ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES
 PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».**

suivis d'un séchage à l'air libre, avant de finir dans un four, généralement du type Hoffman (Bertrand, 2013).

In situ, le rapport effectué sur place par l'Office de Promotion et de Gestion Immobilière Skikda. OPGI Skikda. Groupement CTC, Aquidos Arquitectes Tecnicos et Gestion S.L.P. a mis en évidence cinq types de briques en terre cuite : les briques rouges à porosité élevée de type ouvert, les briques orange clair et creuses, les briques rouges marron à porosité arrondie, les briques creuses rouge marron et enfin les briques rouges marron à porosité macro et microvisuel (OPGI Skikda, 2016).

5.3. Résultat de l'investigation

Les résultats obtenus suggèrent que les briques sont proches de celles du XIXe siècle, c'est-à-dire de la période 1850-1910. Ces dernières sont plus petites que les plus récentes, avec des dimensions d'environ 22*11*5. D'une part, le témoignages des anciens artisans en maçonneries à Skikda et les anciens plans de l'extension des constructions du centre-ville à l'époque française (Bertrand, 2013), qu'ont été reliés à un plan d'une briqueterie ancienne existante à l'époque coloniale, propriété des Français « Josèphe Bajavon » et « Monti », située à 200 mètres du gisement d'argile « Sissel » utilisé à l'époque pour la construction des immeubles de la rue Didouche Mourad (Figure 3 60). En contrepartie, des informations extraites des archives de l'APC indiquent que la majorité des toitures du quartier sont en tuiles marseillaises, sachant que Séon de Saint-André de Marseille est vraiment développée en 1853 et que le nouveau port du Joliet est inauguré et que Marseille devient dans la même période l'un des grands ports de la Méditerranée (Louiette, 2012; Vialle, 2013; Brunet Marceline, 2018; Daumalin, 2021). Il est donc présumé que les briques proviennent d'une des briqueteries de Marseille ou qu'elles sont produites localement dans la briqueterie de Sissel.



Figure 3 59: L'ancien gisement, sis au Sissel, cliché hauteur.

Figure 3 60: Un ancien Plan de l'ancienne briqueterie, sis au Sissel, (archives de la mairie de la Wilaya de Skikda).

Tableau 3 2: Les formats les plus courantes en France au XIX siècle (Thibaut, 1991).

Les formats les plus courantes en France au XIX siècle	
Briques pleines ou perforées	22 x 10,5 x 4
	22 x 10,5 x 5,5
	22 x 10,5 x 6
	33 x 10,5 x 5,5

5.4. La brique de Skikda, brique témoin

5.4.1. Réparation des pièces manquantes

Comme prévu, l'objectif principal de notre étude est de substituer les pièces en briques cuites manquantes par des briques nouvelles compatibles. Afin d'y parvenir, il est essentiel de se conformer à des critères particuliers, à savoir : la dureté de la brique qu'on veut changer doit s'adapter à la rigidité de matériau de rechange en état sec, ainsi que la même couleur, les mêmes dimensions et la même nature de matériaux. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'analyse géotechnique et minéralogique et chimique des anciennes briques prélevées du centre-ville de Skikda. Une personnalisation détaillée des briques de Skikda, a été exécutée au laboratoire, comme suit :

5.4.2. Caractérisation des briques cuites anciennes de Skikda

5.4.2.1. Caractérisation Géo-structurale

5.4.2.1.1. Essai de densité apparente

La densité apparente des anciennes briques de Skikda a été mesurée conformément à la norme ASTM C67-17 (C67/C67M-21, 2014). Après avoir séché les briques anciennes dans un four à 110 °C pendant 24 heures, leur poids et leur taille ont été mesurés. Ensuite, on a divisé la valeur du volume apparent par la valeur du volume et on a obtenu un résultat de $1.74 \pm 0.02 \gamma_s$ (g/cm³) (Tableau 3.3), une valeur qui correspond aux normes citées par (Achik M, 2019).

5.4.2.1.2. La porosité ouverte, Absorption d'eau par capillarité

La porosité ouverte des briques anciennes de Skikda a été évaluée à l'Institut des Sciences du Patrimoine (CNR-ISPC), Florence (Italie), en utilisant la pondération hydrostatique, conformément aux normes NF ISO 501 et ASTM C20 (Banchelli & al, 1997). Les échantillons ont été séchés au préalable dans une étuve à 110°C jusqu'à leur déshydratation. Le poids sec dans l'air de chaque échantillon est enregistré comme M1, la masse saturée et en suspension dans l'air est mesurée comme M2, la masse saturée en suspension dans l'eau est mesurée comme M3, et enfin, la porosité est calculée.

Les propriétés d'humidité, ont été déterminées par la méthode d'absorption capillaire selon la norme NF EN 771-1+1A/CN (NF EN 771-1+A1/CN, 2015). Tout d'abord, on évalue le poids d'une brique trempée dans l'eau afin d'évaluer son taux d'absorption d'hydratation. Les échantillons sont séchés pendant 48 heures à une température élevée de 60 °C, puis refroidis dans un dessiccateur. Une fois séchés et le poids des échantillons demeurent invariables, on enregistre les poids secs. Par la suite, les briques sont immergées dans de l'eau pendant 48 heures afin d'évaluer leur poids saturé et sous l'eau, puis on calcule l'absorption d'eau (Binici & al, 2020).

Le tableau 3.3, présente les caractéristiques physiques des briques cuites anciennes de Skikda. Un pourcentage de porosité de 31 % et une absorption d'eau de 8,79 kg/m² par min. Des valeurs qui sont conformes aux normes NF EN 771-1+A1/CN (Achik M, 2019), et qui ne dépassent pas les limites d'absorption d'eau et de porosité autorisées (Samara & al, 2009). Il est important de souligner que la valeur de la porosité correspond aux résultats obtenus lors de l'étude intégrée de réhabilitation des bâtiments anciens de la commune de Skikda, y compris 27 immeubles situés rue Didouche Mourad (OPGI Skikda, 2016), menée par le CTC (Contrôle Technique des Constructions) Annaba et l'EPSEB-UPC (Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona- Universitat Politècnica de Catalunya) à Barcelone en 2016.

5.4.2.2. Caractérisation mécanique

5.4.2.2.1. Résistance à la compression et à la traction

Afin d'évaluer la capacité de charge des briques cuites (Uranjek & al, 2015). Des essais de compression et de traction ont été effectués au Laboratoire de Mécanique des Sols et des Structures -LMSS- Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et Techniques. Université Constantine. L'essai de compression uni-axiale avec meulage et collage, il a été effectué sur deux demi-blocs superposés et collés avec un joint de mortier spécial, soumis à une simple compression jusqu'à écrasement total (Gbedema & al, 4 juillet 2019) et EN 771-1/CN (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017) (Figure.3.61). Aussi, la résistance à la traction des briques a été évaluée (Binici & al, 2020). On l'a effectuée conformément aux normes NR (EN 771-1/CN) (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017) et (XP P 13-901, 2001) à partir de l'essai de traction par fendage(essai brésilien)(Figure.3.62), qu'il s'agit d'une compression des briques cuites le long de deux tiges situées de part et d'autre de l'autre face d'une brique, entraînant une contrainte de traction le long d'une facette verticale passant entre ces deux tiges (Azil & al, 2022; Boubekeur & al, 2022). Dans le tableau 3.3, les caractéristiques mécaniques des briques cuites anciennes de Skikda sont reportées. La résistance à la compression est de 4,3 MPa et la résistance à la traction de 1,7 MPa. Contrairement aux valeurs de densité, porosité et absorption d'eau. Les résultats de comportement mécaniques, révèlent que les briques cuites de Skikda sont trop fragiles et ne répondent pas aux exigences des normes NR EN 771-1/CN (Achik M, 2019). Cela peut être dû aux effets de la dégradation subie par les briques au fil du temps, sinon, les briques cuites n'étaient utilisées que pour le remplissage "non porteur".

Quant à la résistance à la compression, elle est inférieure aux valeurs de l'étude intégrée de réhabilitation des bâtiments anciens de la commune de Skikda, incluant 27 immeubles situés rue Didouche Mourad (OPGI Skikda, 2016), réalisée par le CTC (Contrôle Technique des Constructions) Annaba et l'EPSEB-UPC (Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona- Universitat Politècnica de Catalunya) à Barcelone en 2016. Cela implique que d'autres types de briques, utilisées dans la construction de quartiers, restent encore méconnus.

CHAPITRE III :
ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES
PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».

Tableau 3 3: Caractéristiques physiques et mécaniques des briques cuites anciennes de Skikda.

Échantillon	γ_s (g/cm ³)	AW (kg/m ² .min)	P (%)	T résistance (MPa)	C résistance (MPa)
SOFB	1.74±0.02	8.79 ±0.36	31.0±0.1	1.7±0.3	4.3±0.4

Note: (SOFB = briques cuites anciennes de Skikda ; γ_s (g/cm³) = masse volumique apparente ; AW (kg/m².min) = absorption d'eau ; P (%) = porosité ouverte ; T résistance (MPa) = résistance à la traction ; C résistance (MPa) = résistance à la compression);



Figure 3 61: Essai de compression uni-axiale sur une brique ancienne de Skikda.



Figure 3 62: Essai de traction indirecte sur une brique ancienne de Skikda.

5.4.2.3. Caractérisations minéralogiques et physicochimiques

5.4.2.3.1. Diffraction des rayons X (DRX)

La composition minéralogique des briques anciennes a été déterminée à l'aide de la diffraction des rayons X (DRX) (Elert, et al., 2003). L'essai a été effectué à l'Institut des Sciences du Patrimoine (CNR-ISPC), Florence (Italie). Il s'agit d'une technique minéralogique qui permet de caractériser la structure cristalline de l'argile brute et calcinée (Taha, 2017; Medjelekh, et al., 2020; Meddah, et al., 2020). En utilisant un appareil de diffractomètre X'Pert PRO de PANalytical, muni d'un détecteur X'Celerator et du logiciel HighScore. Les conditions opératoires employées étaient de Cu K α 1= 1,545Å rayonnement, 40 KV, 30 mA, 2 θ = 3-70°) (C67/C67M-21, 2014).

Le diagramme de diffraction des rayons X des anciennes briques cuites de Skikda, a révélé la présence de quartz, de microcline, de mullite et d'hématite (Figure 3.63). Ces deux derniers minéraux se forment lors de la cuisson d'une argile pauvre en carbonate de calcium. Leur présence suggère une température de cuisson comprise entre 800 et 900 °C (Cardiano P, 2004).

CHAPITRE III :

**ÉTUDE DE CAS « IDENTIFICATION DES BRIQUES CUITES
PRELEVEES, DE LA RUE, DIDOUCHE MOURAD, SKIKDA ».**

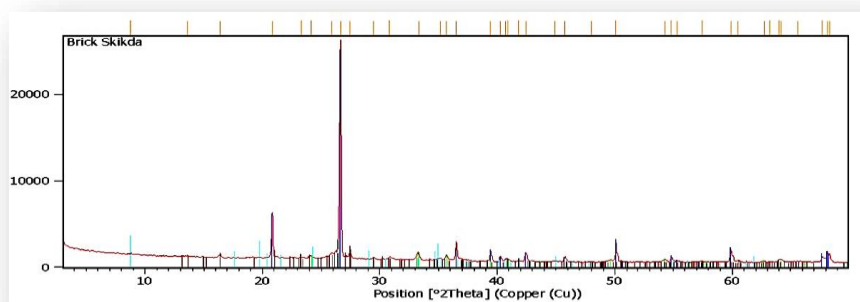


Figure 3 63: X-ray Diagrammes de diffraction des rayons X des anciennes briques cuites de Skikda.

5.4.2.3.2. Taux de carbonate de calcium

Le taux de carbonate de calcium dans les briques de Skikda a été mesuré à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling en accord avec la norme NF P 94-048 (Afnor. NF P94-048, 1996). L'étude a été réalisée à l'Institut des Sciences du Patrimoine (CNR-ISPC), Florence, Italie. Il s'agit d'évaluer la quantité de CO₂ libérée par l'action d'un excès d'HCl (à des températures et pressions atmosphériques connues) sur un échantillon donné. La quantité de CaCO₃ est calculée en fonction du volume de gaz correspondant à l'élévation du niveau du liquide dans la burette (Fgaier, 2013). Les résultats ont indiqué une valeur quasiment négligeable, ce qui confirme les résultats de DRX, qui ont été corroborés par l'absence de la phase calcique sur le diagramme.

5.4.2.3.3. Analyse thermogravimétrique (ATG)

Le niveau d'hydrodynamique des anciennes briques de Skikda a également été évalué en utilisant une analyse thermique (DTA-TG) à l'aide d'un analyseur thermogravimétrique (TGA PERKIN ELMER) à l'unité de recherche de l'université Ferhat Abbas, Sétif 1. L'échantillon étudié, est une sorte d'une poudre de matériaux secs. Les fragments des anciennes briques prélevées ont d'abord été broyés et tamisés (Medjelekh, et al., 2020). Le principe d'analyse, consiste en évaluer la masse de l'échantillon au fil du temps en fonction de la variation de la température. La rampe de chauffe a été fixée à 5°C/min de la température initiale (20°C) à la température finale (1200°C). Le thermogramme ATG représente la perte de poids causée par les réactions lors de la phase de chauffage, tandis que la DTGA représente les températures où le taux de perte de poids maximal est atteint. L'ATD est une technologie qui permet de détecter les pics exothermiques et endothermiques provoqués par les réactions thermiques (Fabbri & al, 2014). On identifie les pics pour détecter les phases minérales après avoir examiné les fluctuations de masse observées à des températures spécifiques (Taha, 2017).

La courbe ATG des briques cuites de Skikda (Figure 3.64), a montré une perte de poids de 11% , ce qui peut être attribué à la perte d'humidité à 110°C, la perte d'eau « liée » à 200–250 °C, puis la dihydroxylation d'autres minéraux comme la muscovite (Cardiano, et al., 2004; Moropoulou, et al., 1995). 87,93% de la totalité du poids n'a pas été décomposé. Les résultats confirment l'exposition de l'échantillon à une grande chaleur, "cuisson".

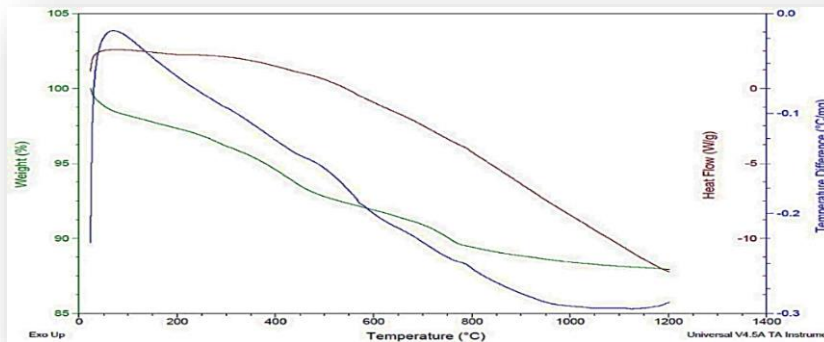


Figure 3 64: Analyse thermogravimétrique des anciennes briques cuites de Skikda.

5.4.2.3.4. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Les propriétés texturales et microstructurelles, ainsi que l'évolution de la vitrification, le degré de cuisson et même la morphologie de surface des briques anciennes, ont été analysées à l'aide de la microscopie électronique à balayage SEM (JCM-5000 NeoScope) (Elert, et al., 2003; Taha, 2017), conformément à la norme ISO 22493: 2008 (ISO 2249, 2008). La phase de la métallisation a été effectuée au laboratoire de Physique, Faculté des Sciences Exactes, Université des Frères Mentouri Constantin I et la lecture au MEB, a été réalisée au Centre de Recherche en Technologie Industrielle CRTI, à l'Unité de Développement des Couches Minces et des Applications de l'UDCMA, à l'Entreprise Nationale des Produits Electrotechniques ENPEC, dans la Zone Industrielle à Sétif. En optant pour l'obtention d'images de haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électromatière. La métallisation des chutes des échantillons se fait en déposant une fine couche d'or sur ces surfaces pour les rendre conductrices d'électrons (Achik, et al., 2019; Medjelekh, et al., 2020).

Les illustrations obtenues suite à cet essai (Figure 3.65), ont démontré que les anciennes briques cuites de Skikda présentent une texture plutôt compacte, dense et lisse, avec une porosité serrée et presque pure par des particules visibles.

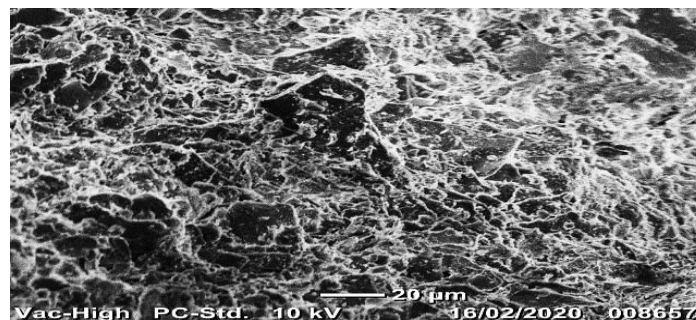


Figure 3 65: Micrographie obtenue par MEB des chutes des briques anciennes de Skikda à 900 °C, au grossissement de 20 µm.

6. CONCLUSION

Une méthode pluridisciplinaire a été mise au point afin de rétablir le cadre historique du centre-ville de Skikda, en prenant en considération la complexité du processus de réhabilitation dans toutes ses dimensions. D'après les conclusions de l'expertise technique menée par des experts du domaine. Le diagnostic préliminaire et l'examen visuel des immeubles ont permis de repérer les principales affections affectant les éléments structuraux des parcs bâtis et les facteurs clés qui contribuent à la détérioration avancée des bâtiments sont l'humidité, le vieillissement des bâtisses, la surexploitation par les usagers, l'extension et la surélévation, la pollution atmosphérique et trafic routier, les catastrophes naturelles et le manque d'entretien, entraînant l'apparition de moisissures, de végétation, de salpêtres, de pourriture du bois, de salissures et de rouille profonde des solives métalliques et même la perte des éléments constructifs et même métalliques. La détection des différentes pathologies ne permet pas de faire un diagnostic fiable et parfaitement crédible. Une analyse en laboratoire était donc nécessaire afin de déterminer les caractéristiques et l'état des matériaux d'origine.

Ce chapitre présente le processus utilisé pour établir une méthode technique de production des matériaux adaptés à la réhabilitation. On a opté pour deux étapes, l'une historique et l'autre technique. Sur le plan historique, les briques cuites examinées remontent à la période coloniale, en 1907. Elles sont issues de la région ou importées par la ville de Marseille. Quant au point de vue technique, les résultats des tests physico-chimiques et des analyses de comportement physiques et mécaniques, ainsi que de la DRX, de l'ATG et de la MEB, ont permis de déterminer les composants utilisés dans la fabrication des différentes briques anciennes cuites de Skikda. La résistance mécanique des briques cuites anciennes de Skikda est inférieure à la norme requise. Le résultat est peut être dû à la détérioration qu'elles ont subie au fil du temps. L'étude minéralogique a mis en évidence la présence de mullite et d'hématite, des minéraux de néoformation qui suggèrent une température de cuisson allant de 800 à 900 °C. Ce genre de minéraux se développe dans des terres contenant peu de carbonate de calcium, ce qui a été confirmé lors de l'essai de taux de calcination. Les résultats et les informations obtenus serviront à évaluer le genre d'opération et à identifier les actions à entreprendre pour chaque situation et lieu. Dans les prochaines étapes, nous allons évaluer si nos décisions d'addition sont justifiées et fondées.

CHAPITRE IV
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS :
CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE
LA PRODUCTION DES NOUVELLES BRIQUES

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

Le quatrième chapitre est dédié à l'identification de matières premières utilisées dans la fabrication de briques nouvelles pour substituer les anciennes, lors de la réhabilitation des anciens bâtiments en maçonnerie. Le Protocole utilisé pour caractériser les briques de rechange obtenues est exposé de manière exhaustive et approfondie.

1. PRÉAMBULE

Dans ce quatrième chapitre, nous exposons les diverses étapes que nous avons suivies lors de notre travail, en mettant l'accent sur la production de briques cuites novatrices et compatibles obtenues par l'incorporation de déchets industriels à des matériaux argileux, qui seront employées pour la réhabilitation des structures historiques en maçonnerie. Pour ce faire, une approche expérimentale d'évaluation des performances a été mise en œuvre en laboratoire en utilisant des analyses de composition, de physique et de mécanique afin d'analyser les réactions entre les additifs et la matière première argileuse. Ces quatre déchets, déjà testés en stabilisation céramique, sont donc expérimentés en complément de l'argile de Mila de l'Est algérien : le sable calcaire, la poudre de marbre (MP), la sciure de bois (WS) et la limaille d'acier (SF). Par la suite, il convient de créer et de fabriquer des échantillons, ainsi que d'évaluer les produits finis, avant de conclure par l'explication de l'essai lixiviation (TCLP) (US-EPA 1311), qui permet d'évaluer les conséquences environnementales des additifs de déchets sélectionnés sur les briques cuites.

2. MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1. Matière première « l'argile de Mila »

L'argile utilisée pour produire les nouvelles briques cuites a été extraite d'une carrière sise à Mila, une ville du nord-est de l'Algérie. Géologiquement, le site est caractérisé par une formation schisteuse datant du Miocène au Quaternaire, Le type de climat qui y règne accélère le développement de ce type d'argile par la dessiccation et le déficit d'eau du schiste argileux. Le bassin de Mila est intégré dans le domaine externe de la chaîne des maghrébines, avec des dépôts laguno-continentaux d'âge Mio-Plio-Quaternaire tels que les argiles, le sable, le gypse et le sel gemme (Athmania & al, 2009). Il convient de souligner que la grande unité primaire (carrière) a été sélectionnée en tenant compte des indicateurs d'utilisation. L'argile est largement utilisée par les artisans et les briquetiers de l'est algérien pour la fabrication de briques et de poterie. L'Agence nationale des activités minières a nommé le gisement d'argile Ch.D.Ch.W.D.M.M (ش.د.ش.و.د.م.م) pour l'extrait de l'argile. Société de Briques Bou doudou. Permis d'exploitation : pxc. 5976. 09/02/2009 ». Il se trouve sur la route nationale à quelques kilomètres de l'ancienne briqueterie, située dans la vieille ville de Mila. . Les échantillons ont été prélevés à des profondeurs de 50 cm et plus, extraits à l'aide d'une

CHAPITRE IV :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES NOUVELLES BRIQUES

excavatrice mécanique (Figure 4.1:). L'argile naturelle renferme une certaine humidité (selon la saison et les conditions climatiques) et se compose de trois fractions non mélangées de couleur différente, rouge, grise et brune (Figure 4.2). Les analyses ont eu lieu sur un échantillon d'argile choisie par quartage, une méthode employée lorsqu'il y a une grande quantité de matière impliquée (Afnor. P94-202, XP, 1995.)



Figure 4 1: L'extraction de l'argile à l'aide d'une pelle. **Figure 4 2:** Texture naturelle de l'argile de Mila.

2.2. Additifs des déchets

2.2.1. Méthodologie d'échantillonnage

L'échantillonnage reste une étape préliminaire effectuée avant de caractériser et de valoriser les déchets en point de vue physico-chimique et environnemental. D'importantes quantités de déchets ont été recueillies ou achetées. Afin de préserver la teneur initiale en humidité des produits, ils ont été conservés dans des sacs étanches. Par la suite, ils ont subi un séchage dans une étuve à une température de 60°C jusqu'à ce qu'ils atteignent une masse constante. C'est une température qui maintient la composition minéralogique initiale et la matière organique MO. S'ensuit une étape de préparation mécanique, plus précisément une étape de tamisage, pour récupérer la partie indispensable à notre utilisation, qui est conservée dans des sacs spéciaux étanches de laboratoire. Suivant des méthodes et des plans d'expériences standardisés, une première partie fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique et minéralogique. Le reste est destiné à être utilisé pour fabriquer le produit final. Cela signifie qu'il existe deux méthodes différentes pour partager un échantillon : pour les quantités importantes, il est réalisé par quartage ou fractionnement manuel, sinon à l'aide de diviseurs appelés "échantillonneurs", qui séparent en parties égales une quantité de matière spécifique pour l'échantillon destiné à la caractérisation du produit en laboratoire (NF. P.18-560).

2.2.2. La poudre de marbre

La poudre de marbre provient de roches métamorphiques carbonatées, disponibles en Algérie en énormes quantités (Oorkalan & al, 2020). Comme toutes les roches carbonatées, sous la forme de CaCO_3 et MgCO_3 , elle s'associe aux composés de l'argile pour créer des silico-

CHAPITRE IV :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES NOUVELLES BRIQUES

aluminates de chaux stables (Achik & al, 2021). En raison d'une bonne cohésion en phase liquide, les particules d'argile et de poudre de marbre présentent une croissance adéquate lors du tir. En outre, l'utilisation de Cao en tant que fondant favorise la vitrification de la céramique de brique lors de la cuisson (Ngayakamo & al, 2020). Deux granulométries ont été utilisées, la poudre de marbre fine (FMP) et la poudre de marbre très fine (VFMP) afin d'étudier l'effet de la granulométrie sur les briques. Ces poudres de marbre sont disponibles commercialement auprès de la Zone d'Activité de Bir Slam (Béjaia, Algérie). Une poudre de marbre standardisée, fréquemment employée lors de travaux de restauration. La fiche technique indique la composition suivante : impuretés de calcite et de quartz, de feldspath et de mica (Figure 4. 3, Figure 4. 4).

2.2.3. Le sable

Le sable provient des carrières de Sigus situées dans la wilaya d'Oum El Bouaghi, à l'est de l'Algérie (Figure 4. 5). Il fut choisi au hasard et acheté à un prix symbolique, car il était destiné aux travaux de remblayage, auprès des fournisseurs de matériaux de construction. Étant donné son absence de normalisation, il a été examiné en laboratoire où il a été ajusté en maintenant une fraction de 0,16 à 2 mm de diamètre. Il convient de souligner que 10 % de la masse de l'argile ont été substitués par du sable, utilisé comme dégraissant, afin de tester l'impact des grosses particules de calcite sur le comportement des nouvelles briques (Guzlėna & al, 2017).

2.2.4. La sciure de bois

En raison de son abondance, la sciure de bois est une matière première précieuse dans divers secteurs industriels (Jannat & al, 2021). Il est probable que son emploi dans les applications géotechniques soit une solution plus efficace. (Butt & al, 2016; Jannat & al, 2021). Ses caractéristiques de l'eau mettent en évidence la capacité de la terre cuite à réguler l'atmosphère à l'intérieur d'une construction (Laou & al, 2017). Étant donné qu'il ne se redresse pas sous la chaleur, le bois améliore le comportement des briques par son faible retrait. Le bois scié (WS) a été récupéré dans les ateliers de menuiserie et utilisé à l'état brut sans traitement, après tamisage, en maintenant les dimensions de 5 à 10 mm (Figure 4. 6).

2.2.5. La limaille d'acier

La limaille d'acier (SF) a été prélevée dans les déchets des ateliers de forge (Shaqour & al). Le matériau a été tamisé pour ne garder que les particules entre 1 et 2 mm, et l'utiliser à son état naturel, sans aucune correction ou modification. La littérature autorise le recyclage jusqu'à 20 % en poids de poussière d'acier, en concédant que la réalisation de la céramique rouge par compression est technologiquement faisable (Dominguez & al, 1996; Karayannis, 2016). En général les briques en céramique à base de la poussière d'acier se caractérisent par un fond noir, un poids et une densité élevée vu qu'elle caractérisée par une densité élevée par rapport aux autres déchets (Alonso-Santurde & al, 2012) (Figure 4. 7).

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**



Figure 4 3 : Poudre de marbre très fine.



Figure 4 4 : Poudre de marbre fine.



Figure 4 5 : Le sable de Sigus.



Figure 4 6: La sciure de bois.



Figure 4 7: La limaille d'acier.

3. FABRICATION D'ÉCHANTILLONS DES BRIQUES

Cette section aborde la méthode de production des briques de rechange. L'argile a été préparée par déshumidification, homogénéisation et broyage. Ensuite, elle a été scellée dans des sacs en plastique jusqu'à son utilisation ultérieure, conformément à XP P94-202 (Afnor. P94-202, XP, 1995). Les briques cuites témoins (CMB) ont été fabriquées selon un protocole classique avec un pourcentage d'eau de 43 % en poids de l'argile, comme le montre le Tableau 4.1, un pourcentage qui, une fois ajouté au mélange, entraîne une plasticité élevée, ce qui facilitera la manipulation du mélange, mais entraînera un retrait important lors de la cuisson (Figure 4. 13). Afin d'évaluer l'effet des déchets sur les caractéristiques des nouveaux spécimens, un échantillon de briques de référence non stabilisées a été préparé. La production des briques d'argile stabilisées a nécessité l'ajout de la quantité minimale d'eau possible lors du pétrissage, une méthode testée par Laibi et al. (Laibi & al, 2017) et Stazi et al. (Stazi & al, 2016), afin de diminuer l'absorption d'eau par le mélange. Après avoir mélangé avec un malaxeur électrique pendant 10 minutes, le mélange argileux a été laissé fermenter pendant quelques jours. Lors du façonnage, l'argile humide a été pressée dans le moule en utilisant un marteau en caoutchouc pour la compacter. Le démoulage a été réalisé sur du papier abrasif afin d'éviter une fissuration prématurée lors du processus de séchage. Le procédé de séchage a été réalisé à température ambiante jusqu'à ce que le poids reste constant (Stazi & al, 2016). Par la suite, les éprouvettes sont restées dans un séchoir électrique à 105 °C jusqu'à poids constant. Elles ont ensuite été cuites dans un four à moufle (Nabertherm©) à 900 °C pendant 36 heures (Figure 4. 18) (Samara & al, 2009). La phase de la cuisson a eu lieu à la briqueterie SARL SAF CER Didouche Mourad

CHAPITRE IV :
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES

à Constantine, comme le montre le graphique ci-dessus (Figure 4. 19). Toutes les éprouvettes de briques ont ensuite été testées en laboratoire.

<p>Les étapes d'un procédé traditionnel de fabrication de la série de briques cuites non stabilisées :</p>				
	<p>Figure 4 8: Tamisage.</p>	<p>Figure 4 9: Humidification.</p>	<p>Figure 4 10: Malaxage.</p>	
				
	<p>Figure 4 11: Moulage.</p>	<p>Figure 4 12: Séchage.</p>	<p>Figure 4 13: Cuisson.</p>	
	<p>Fabrication des briques cuites stabilisées après tamisage, mélange de l'additif et étapes d'humidification :</p>			
		<p>Figure 4 14: Malaxage mécanique.</p>	<p>Figure 4 15: Moulage par compactage à l'aide d'un marteau en caoutchouc.</p>	<p>Figure 4 16: Démoulage effectué sur papier abrasif.</p>
				
<p>Figure 4 17: Séchage électrique.</p>		<p>Figure 4 18: Cuisson.</p>	<p>Figure 4 19: Des briques stabilisées après cuisson.</p>	

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

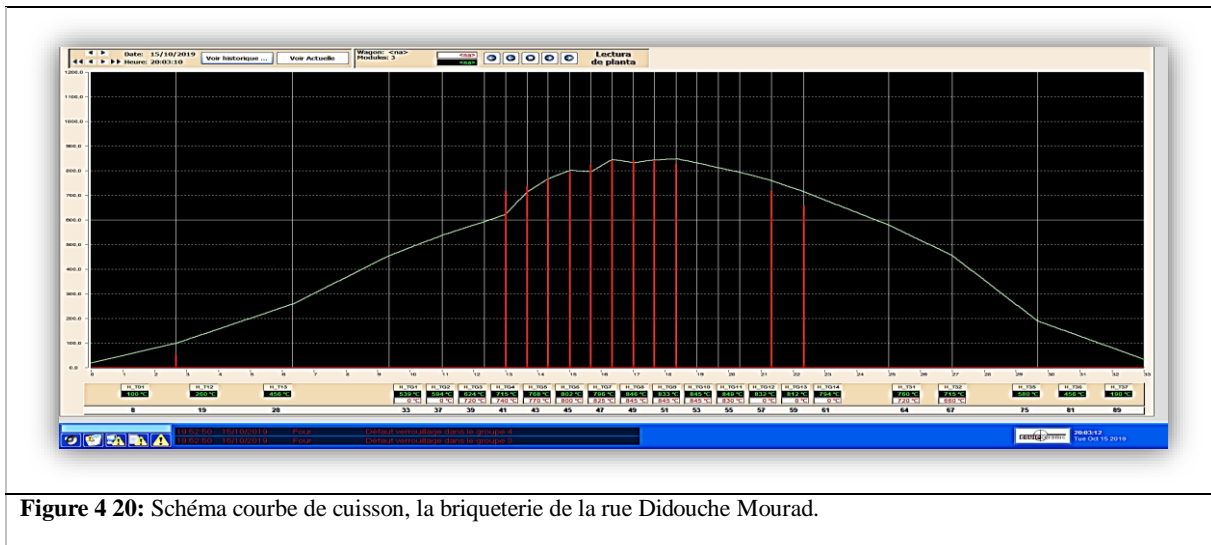


Figure 4 20: Schéma courbe de cuisson, la briqueterie de la rue Didouche Mourad.

4. COMBINAISON DE DIVERSES BRIQUES CUITES

Tableau 4. 1 présente la proportion de mélange des différentes briques cuites. Il convient de noter que la quantité d'eau augmente avec l'ajout de 5 % de sciure, un déchets qui accroît la quantité d'eau requise pour obtenir une plasticité optimale, en raison de la forte capacité d'absorption des composants organiques (Kizinievič & al, 2018).

Tableau 4 1: Proportion de mélange des différents mélanges de terre (%).

Mélanges	Les constituants					pour 100 % du poids du mélange	
	Mila argile	Sable	FMP	VFMP	SF	WS	Eau
CMB	100	00	00	00	00	00	43
FMPB	70	10	20	00	00	00	25
VFMPB	70	10	0	20	0	0	24
SFB	70	10	0	0	20	0	23
WSB	85	10	0	0	0	5	28

CMB = Briques cuites de contrôle ; FMPB = Briques cuites avec poudre de marbre fine ; VFMPB = Briques cuites avec poudre de marbre très fine ; SFB = Briques cuites avec limaille d'acier ; WSB = Briques cuites avec de la sciure de bois ;

5. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES « TERRE ET DECHETS »

La qualité et la durabilité des briques sont influencées par les matières premières. Les additifs influencent aussi leurs caractéristiques minéralogiques, texturales et physico-mécaniques. Il est donc impératif de procéder à une étape d'identification conformément au protocole suivant :

5.1. Caractérisations minéralogiques et chimiques

5.1.1. Teneur en matières organiques

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

La quantité de matière organique dans l'argile de Mila a été déterminée selon la norme XP P94-047 (Afnor.XP P94-047, 1998), au laboratoire chimique de CTC Est, Constantine. Une fois la phase de la calcination dans un four à une température de 450 C° est achevée. On mesure la masse des grains solides secs (Md, en g) et la quantité de matières organiques contenue dans l'échantillon (Mo, en g). Enfin, la teneur en matières organiques est calculée selon la formule suivante (1) :

$$\text{La teneur en matières organiques: } To(\%) = \frac{Mo \times 100}{md} \quad (1)$$



Figure 4 21:Essai de la teneur en matières organiques, cliché auteur.

5.1.2. Détermination de la chaux

Les teneurs en chaux dans la matière première et les déchets ont été mesurées à l'aide du calcimètre dietrich-fruhling, en respectant la norme belge NBN 589-209 (Afnor.NF P94-048). La démarche a été effectuée dans les laboratoires de chimie LTP EST Constantine en Algérie et celui de l'institut des Sciences du Patrimoine (CNR-ISPC), Florence (Italie). Pour l'analyse, il est requis d'utiliser un thermomètre à chlorhydrique concentré avec une densité de 1,19 et de poudre de carbonate de calcium pur. Les sulfates se combinent avec le calcaire (CO₃ Ca) et sont obtenus en précipitant les sulfates de baryum dans le filtre après une attaque à chaud avec de l'acide chlorhydrique à 10%. Le calcul a été réalisé en utilisant l'équation (2) :

Vt : volume de référence.

$$\%CaCO_3 = \frac{V_b}{V_t} \times 100 \quad (2).$$



Figure 4 22: Détermination de la chaux.

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

5.1.3. Teneur en sel et de Gypse

Étant donné le danger de la présence de sels solubles dans les matières premières, en engendrant l'apparition de taches blanches sur la surface des briques, ce qui compromet la durabilité des produits finis. Ainsi, une analyse préliminaire a été requise avant de passer à la phase de production. Les sels solubles ont été évalués conformément à la norme EN 1744-1 (Afnor. NF EN 1744-1, 1998), au niveau de laboratoire chimique de CTC Est Constantine. Le résidu insoluble est le résultat d'une attaque à chaud avec de l'acide chlorhydrique à une teneur de 10%. Les éléments en question sont le sable de silice et les éléments silicatés présents dans les argiles. La quantité des insolubles a été déterminée en utilisant les formules (3), (4):

$$P = P2 - P1 \quad (3).$$

$$\% \text{ insoluble} = P \times 100 \quad (4).$$

P1 : poids de papier filtre vide.

La détermination du gypse a également été effectuée selon la formule (5):

$$\% \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = P \times 184.5 \quad (5).$$

Étant donné que le dosage des chlorures est effectué en utilisant l'équation (6) :

$$\% \text{NaCl} = V \times 0.585 \quad (6).$$



Figure 4 23: Teneur en sel et de Gypse.

5.1.4. L'analyse au spectromètre fluorescence

L'étude de la matière première et les différents déchets a été réalisée à l'aide d'un spectromètre à fluorescence X (S2PUMA-BRUKER) (EDXRF) (XRF). Au niveau du laboratoire de la société Hadjar Soud Cement et le Centre d'Analyses Physico-chimiques du Laboratoire de Recherche Scientifique et Technique (CRAPC) à Laghouat, Algérie. Tout d'abord, des échantillons doivent être placés dans la zone de mesure où il existe un petit trou dans la chambre d'échantillon. Le tube à rayons X de l'instrument (S2PUMA) est protégé par la chambre d'échantillon et l'obturateur pour éviter toute perte de rayons X. Il peut utiliser une source de rayons X en Pd pour appliquer une tension allant jusqu'à 50 kV et commuter automatiquement les points focaux de 0,3 à 10 mm de diamètre. La chambre d'échantillon est utilisée avec un

CHAPITRE IV :
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES

détecteur de dérive en silicium, avec une option de vide, N₂, He et atmosphère d'air (PTAPC Laghouat, s.d.).



Figure 4 24: Le spectromètre à fluorescence X (S2PUMA-BRUKER) (EDXRF) (XRF).

5.1.5. Diffraction des rayons X (DRX)

Le processus a également exigé une évaluation de la composition minéralogique de la matière première. Ainsi, la terre de Mila a été identifiée minéralogiquement dans le laboratoire de l'institut des Sciences du Patrimoine (CNR-ISPC), à Florence (Italie). En utilisant un diffractomètre X'Pert PRO de PANalytical, équipé d'un détecteur X'Celerator et du logiciel HighScore pour l'acquisition et l'interprétation des données dans les conditions opératoires suivantes : CuK $\alpha_1 = 1,545\text{\AA}$ radiation, 40 KV, 30 mA, $2\theta = 3-70^\circ$), en suivant les méthodes de Cipriani (Banchelli & al, 1997) .

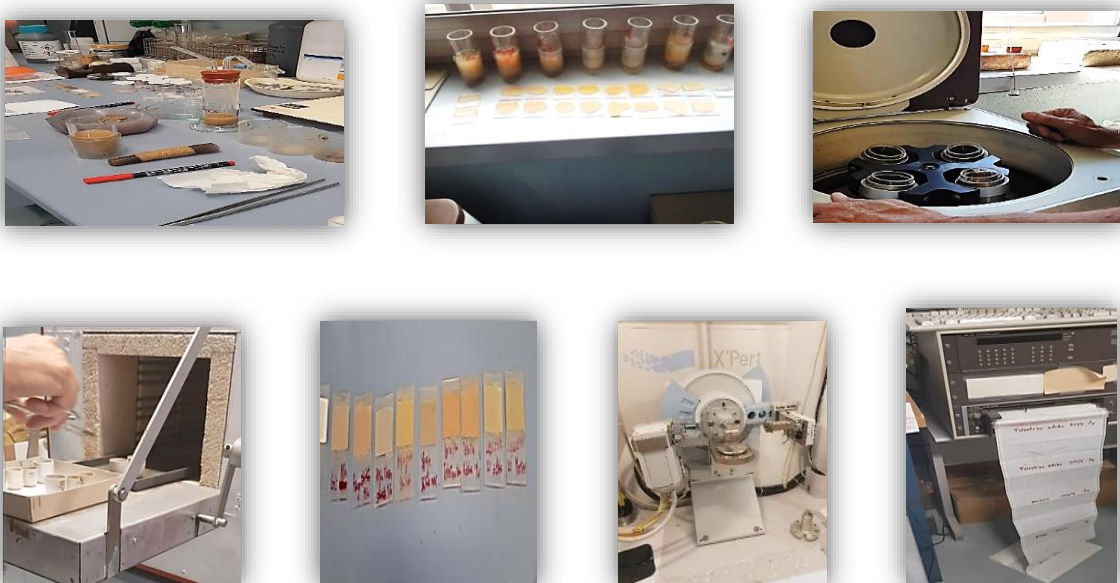


Figure 4 25: Diffraction des rayons X (DRX).

5.1.6. Analyse thermogravimétrique (ATG)

Une analyse thermique (DTA-TG) a été réalisée pour évaluer le degré d'hydraulicité de la terre de Mila et du sable de Sigüés, à l'Unité de Recherche sur les Matériaux Emergents, Université Ferhat Abbas, Sétif 1. À l'aide d'un analyseur thermogravimétrique (TGA PERKIN ELMER), afin d'obtenir une détermination précise. Selon (Dukuzg, 1990), le principe essentiel de l'essai est de mesurer la diminution de masse d'une substance en fonction de la température ou du temps. Dans un premier temps, les échantillons en état dur devraient être broyés et tamisés (Medjelekh & al, 2020). Selon (Fgaier, 2013), la température de la rampe de chauffe a été ajustée à 5°C/min, passant de la température initiale (20°C) à la température finale (1200°C). Des données concernant les phénomènes physiques et chimiques ont été recueillies.



Figure 4 26: L'appareillage de l'essai DSC-TGA.

5.1.7. Le bleu de Méthylène

Au laboratoire de chimie de CTC Est, Constantine, on a mesuré la surface spécifique de la terre de Mila et du sable de Sigus en utilisant la méthode de l'indice de bleu de méthylène (MBI) conformément aux normes NF P94-068 (Afnor.NF P.94-068, 1998) NF ENP 933-9 (Afnor.NF ENP. 933-9, 1999). La capacité d'adsorption ionique d'un sol est mesurée en fonction de la quantité de bleu de méthylène requise pour recouvrir la surface totale des particules du sol. La méthode consiste à ajouter des quantités successives de bleu de méthylène et à vérifier l'adsorption après chaque ajout. Par conséquent, une goutte de la suspension est prélevée et transférée sur un papier filtre, ce qui entraîne la formation d'une tache. Autour de la tache se développe un bleu clair persistant lorsque l'adsorption est maximale (Cojean, 2017). De cette manière, la valeur d'absorption VB (valeur bleue) varie en fonction de la quantité de minéraux argileux ainsi que de la charge de particules argileuses (maximum pour la smectite et minimum pour la kaolinite). Afin de déterminer la surface spécifique de la terre de Mila, nous avons employé l'équation (7), tandis que pour le sable de Sigüés, nous avons choisi l'équation (8):

$$VBs \text{ (g/100g)} = \frac{B}{m_0} \times 100 \quad (7).$$

$$MB \left(\frac{g}{kg} \right) = \frac{V1}{M1} \times 10 \quad (8).$$



Figure 4 27: L'essai de bleu de Méthylène.

5.2. Caractéristiques hydro-géotechniques

5.2.1. La densité absolue au pycnomètre

La mesure de la masse volumique de la terre de Mila, du sable de Sigus et des poudres de marbres a été réalisée à l'aide d'un pycnomètre conformément à la norme XP CEN ISO/TS 17892-3 (Afnor. XP CEN ISO/TS 17892-3, 2005), au niveau du laboratoire de mécanique des sols et des structures -LMSS- du département de génie civil de l'université Constantine1. Ce procédé consiste à mesurer le volume d'une masse connue de sol en fonction du mouvement des fluides. Il s'agit du calcul de la masse volumique en fonction de la masse et du volume du sol. Seuls les sols dont la granulométrie est inférieure à 4 mm sont concernés. En outre, il est nécessaire d'employer un liquide parfaitement dégazé, qui soit compatible avec le matériau solide et, surtout, qui ne cause pas de gonflement ou de désagrégation du matériau (Pinet, 2015).



Figure 4 28:La mesure de la densité apparente au pycnomètre.

5.2.2. La teneur en eau

La quantité d'eau présente dans les matériaux a été évaluée en utilisant la norme XP CEN ISO/TS 17892-1 (Afnor.XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005) toujours au sein du laboratoire de mécanique des sols et des structures -LMSS- du département de génie civil de l'université

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

Constantine1. On a mesuré la quantité d'eau évacuée pendant le séchage des échantillons dans une étuve à une température de 105°C. Le calcul a été réalisé à l'aide de l'équation (9) :

$$\% \text{ Perte de poids} = (\text{la masse d'eau} / \text{la masse de l'éprouvette de sol sec}) \times 100 \quad (9).$$



Figure 4 29: La mesure des teneurs en eau.

5.2.3. L'essai de retrait simplifié (procédure essai de l'Ifsttar)

L'évaluation de la limite de retrait pour la terre de Mila a été réalisée en respectant la norme DIN EN 1015-1 (Ziegert & al, 2013), au laboratoire de mécanique des sols et des structures - LMSS- du département de génie civil de l'université Constantine1. Afin de déterminer la quantité minimale d'eau capable de saturer le sol. Un sol bien saturé et mélangé est rempli dans une « capsule de retrait ». Une fois que le séchage a été effectué dans un environnement contrôlé (température et humidité), il faut mesurer le poids et le volume apparent lors de la perte d'eau (Cojean, 2017). Le volume est maintenu à un poids donné et trois mesures de masse sont réalisées. Un retrait peut être calculé en se basant sur l'équation (10) :

$$R\% = ((L0 - L1) / (L0)) \times 100 \quad (10)$$

Où : L0 – distance entre les marques sur l'échantillon saturé, (mm).

L1 – distance entre les marques sur l'échantillon sec ou cuit, (mm).



Figure 4 30: Le principe de l'essai de retrait simplifié.

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

5.2.4. Caractéristiques de compactage « Essai Proctor »

Le niveau d'eau et les conditions de compactage de la terre de Mila ont été évalués à l'aide de l'essai Proctor, conformément à la norme NF P94-093 17 (NF P94-093,17, 2014), au laboratoire CTC Est, à Constantine. L'objectif est de définir la quantité d'eau idéale pour la terre de Mila et les conditions de compactage établies afin d'obtenir le meilleur compactage possible et une capacité portante maximale. Ce taux optimal est celui de l'eau de gâchage utilisée dans la fabrication des briques cuites de l'étude (Elahi & al, 2020). L'étape initiale consiste à préparer des échantillons de sol avec des niveaux d'humidité progressivement augmentés. Les poids unitaires sont calculés en utilisant un moule avec un volume connu et pesé pour effectuer l'opération de compactage. Il est important de noter que ces poids unitaires augmenteront à mesure que les taux d'humidité augmentent, jusqu'à atteindre une humidité optimale, puis diminueront au-delà de ce niveau. Les résultats sont illustrés par une courbe qui établit la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale (Mbuyi & al, 2012; Laibi & al, 2017). Le calcul est effectué en utilisant l'équation (11)

$$(Pd/PW) = ((100 \times mh) / (L \times l \times h \times (100 + W))) \quad (11)$$



Figure 4 31: Le Protocol de « l'Essai Proctor ».

5.2.5. Analyse granulométrique

La granulométrie de la terre de Mila, du sable de Sigus et des poudres de marbres est établie à l'aide de deux techniques distinctes. Le processus a débuté par une analyse de tamisage conformément à la norme P 18-560 (NF. P.18-560, 1990), puis a été étendu à une analyse de sédiments conformément à la norme XP CEN ISO/TS 17892-4 (Afnor.XP CEN ISO/TS 17892-

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

4, 2005). Les analyses ont été effectuées au laboratoire de mécanique des sols et des structures (LMSS) du département de génie civil de l'université Constantine1. La granulométrie des échantillons est en effet mesurée par la division des éléments d'un échantillon en fonction de leurs dimensions, à l'aide d'une série de tamis pour les dimensions supérieures à 80 µm. Quant à la technique de sédimentation, elle concerne les dimensions de 1 mm ou 2,38 mm² et elle est mesurée en divisant l'échantillon en suspension liquide selon la loi de Stokes. On utilise des graphiques semi-logarithmiques pour les sols dont les grains présentent souvent des dimensions très différentes, tandis que des graphiques linéaires sont utilisés pour les graviers et les pierrailles plus homogènes (Mbuyi & al, 2012).



Figure 4 32: L'essai de la granulométrie par tamisage et par sédimentométrie.

5.2.6. Les limites d'Atterberg

On évalue les limites d'Atterberg pour la terre de Mila en utilisant un appareil Casagrande, tandis que la limite de plasticité a été déterminée par essai sur fil laminé, conformément aux normes NF P94-051 (Afnor. NF.P94-051, 1993) et à la norme XP CEN ISO/TS 17892-12 (ISO/TS17892-12, 2005). Les essais ont été effectués dans le laboratoire de mécanique des sols et des structures (LMSS) du département de génie civil de l'université Constantine1. Le Casagrande, comme illustré dans la (Figure 4. 33), est constitué d'une cuillère remplie de l'échantillon, dont on effectue une coupe à l'aide d'un outil standardisé.

Il est soulevé et descendu à l'aide d'une manivelle à laquelle il est attaché. La limite de fluidité est définie comme la quantité d'eau requise pour fermer la rainure sur une longueur de 10 mm. On peut déterminer la limite de plasticité en faisant une série de tiges de 3,2 mm de diamètre sur une plaque de verre rodée et en mesurant la quantité d'eau correspondant au moment où elles commencent à se fissurer. Le résultat correspond à la moyenne des trois mesures. Les résultats de l'essai permettent de déterminer un indice de plasticité IP, qui correspond à la différence entre la limite de liquidité w_L et la limite de plasticité w_P . En étant plus élevé, l'attraction entre les particules de sol est plus intense et le sol devient plus argileux (Mbuyi & al, 2012). Le calcul est effectué en utilisant l'équation (12), aussi l'identification de degré d'activité des argiles, se fait à partir de la formule :

$$IP = w_L - w_P \quad (12)$$

Ca : pour identifier le degré d'activité des argiles, nous utilisons la formule :

CHAPITRE IV :
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES

$$Ca = \frac{IP}{\% \text{ d'argile } \phi < 2\mu} [4] \dots\dots\dots (13)$$



Figure 4 33: Le protocole des limites d'Atterberg.

5.2.7. L'équivalent de sable

Quant à l'évaluation de l'équivalent sable, elle a été réalisée au laboratoire de Travaux Publics de l'Est « L.T.P-Est » à Constantine, conformément à la norme EN 933-8 (Afnor. NF.933-8, 1999). Les granulats fins de 0/2mm sont utilisés pour l'étude de propreté des granulats. Une quantité de 120gr de sable doit être prélevée et versée dans une éprouvette graduée en plastique utilisée pour cette technique. Une solution de lavage au chlorure de calcium est ensuite ajoutée à l'éprouvette, jusqu'à ce qu'elle atteigne environ 100 mm de haut. L'éprouvette doit être laissée pendant 10 ± 1 minute afin d'imbiber le test de goût. Une fois 10 minutes passées, l'éprouvette est agitée pendant 30 ± 1 seconde. Après agitation, l'éprouvette est remise en position verticale et une nouvelle solution de chlorure de calcium est ajoutée. L'ajout s'arrête lorsque le niveau de liquide dépasse le seuil de $380 \pm 0,25$ mm. Pendant une période de $20 \pm 0,25$ minutes, l'échantillon est laissé au repos, sans perturbation et sans vibration. La valeur équivalente du sable est déterminée par l'équation (14) :

$$SE = (hs/hc) \times 100 \quad (14).$$



Figure 4 34: L'essai de l'équivalent de sable.

6. CARACTERISATION DES NOUVELLES BRIQUES DE SUBSTITUTION

Il est évident que le remplacement des briques historiques et la définition de leurs caractéristiques nécessitent une conformité systématique aux normes actuelles en vigueur dans le domaine de la construction. Les essais sur la structure, la minéralogie, la chimie, le comportement et la résistance des briques fabriquées sont donc essentiels (Elert & al, 2003). L'acquisition de ces données permettra d'évaluer le niveau d'homologation des nouveaux matériaux par rapport aux matériaux anciens (Cultrone & al, 2004). Les tests sont nombreux, mais en fonction de la disponibilité, ces tests pour évaluer la caractéristique des nouvelles briques de réparation et évaluer leur compatibilité avec les briques anciennes sont suffisants pour obtenir les informations requises :

6.1. Caractérisation structurale

6.1.1. La densité apparente

La mesure de la masse volumique apparente des briques de substitution a été réalisée, conformément à la norme ASTM C67-17 (ASTM C67/C67M-21, 2015), au sein du laboratoire de mécanique des sols et des structures (LMSS) du département de génie civil de l'université Constantine1. Il est nécessaire de procéder à un séchage dans une étuve à 110°C jusqu'à ce que l'humidité soit bien éliminée. Le poids est ensuite mesuré et divisé par le volume apparent. La densité apparente est calculée en utilisant l'équation (15).

$$\text{Bulk Density} \left(\frac{g}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M}{V} \quad [15].$$

6.1.2. La porosité ouverte

Étant donné le rôle que peut jouer la porosité dans la résistance mécanique, l'absorption d'eau et la perméabilité de la brique. Au laboratoire de l'institut des Sciences du Patrimoine (CNR-ISPC), à Florence (Italie), les porosités ouvertes des nouvelles briques ont été mesurées à l'aide d'une pesée hydrostatique conformément aux normes NF ISO 501 et ASTM C20 (Banchelli & al, 1997). Les briques sont placées dans une étuve à une température de 110°C jusqu'à ce qu'elles soient déshydratées. Une fois que la masse initiale (M0), la masse émergée (M1) et la masse trempée (M2) (g) ont été déterminées, les porosités ouvertes ont été calculées selon l'équation (16).

$$\% \text{ Porosity} = \left(\frac{M2 - M0}{M2 - M1} \right) \times 100 \quad (16).$$

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

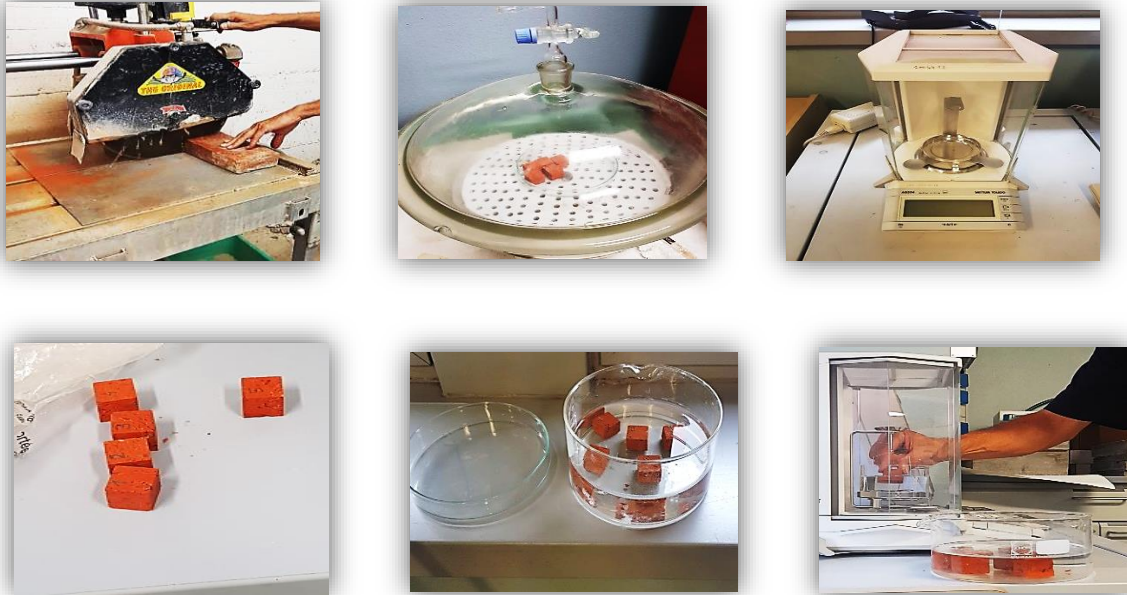


Figure 4 35: La porosité ouverte par Hydrostatique balance méthode.

6.1.3. Retrait au séchage et à la cuisson :

Une fois que les briques de substitution et de contrôle ont été cuites dans le four de la briqueterie SAFCER, située à Didouche Mourad, Constantine. Les variations physicochimiques qui se produisent lors de la cuisson des briques sèches sont responsables de l'apparition de retraits au séchage (Dukuzg, 1990), et un test a été réalisé pour évaluer ces retraits en respectant les recommandations de (Achik & al, 2019; Balogun & al, 2021). En effet, on a analysé cinq échantillons et on a rapporté leur valeur moyenne. On mesure les poids humides et à la cuisson à l'aide d'un pied à coulisse et d'une balance étalonnée, ainsi que la longueur initiale (L1), la longueur séchée au four (L2) et la longueur finale (L3) du produit après cuisson. Les équations (17), (18), (19), (20) ont été utilisées pour calculer le retrait au séchage et la perte de poids :

$$\text{Firing shrinkage (F)} = \frac{L2 - L3}{L2} \times 100 \quad (17).$$

$$\text{Dry shrinkage (D)} = \frac{L1 - L2}{L1} \times 100 \quad (18).$$

$$\text{Total linear shrinkage (R\%)} = D + F \quad (19).$$

$$\text{WL\% Weight loss} = \left(\frac{\text{Original Weight} - \text{Fired Weight}}{\text{Original Weight}} \right) \times 100 \quad (20).$$

6.2. Caractérisation hydrique

6.2.1. Absorption d'eau par capillarité

Un élément clé qui joue un rôle essentiel dans la durabilité des briques (Mbuyi & al, 2012). La raison pour laquelle un test d'évaluation des taux d'absorption d'eau par capillarité a été réalisé dans le laboratoire de la briqueterie SAFCER, située à Didouche Mourad, Constantine,

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

conformément à la norme NF EN 771-1+1A/CN (Afnor. NF EN 771-1+A1/CN). Il a été requis de déterminer l'aire "A", une section immergée dans l'eau en m², puis de calculer la différence entre chaque poids M et la masse initiale M₀ par unité de surface, selon l'équation (21):

$$DM = ((M - M_0)/A) \times 100 \quad (21).$$

Cette mesure dépend de la racine carrée du temps de pesée, du coefficient d'absorption d'eau A_w, exprimé en (kg.m².min). La marge de tolérance inférieure à 6 (A_w) a été calculée en utilisant l'équation (22):

$$AW \text{ (kg. m}^2\text{. min)} = \left(\frac{\Delta M t - \Delta M_0}{\sqrt{t}} \right) \quad (22).$$

6.3. Caractérisation mécanique

6.3.1. La résistance à la compression

Au laboratoire de mécanique des sols et des structures (LMSS) du département de génie civil de l'université Constantine1, les résistances à la compression des briques cuites nouvelles et celles de contrôle ont été évaluées en utilisant une méthode de meulage et de collage, conformément aux normes EN 1926/1999 (Görhan & al, 2013) et EN 771-1/CN (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017). Les échantillons constitués de deux demi-briques superposés et collés avec un joint de mortier spécial. Elles sont soumises à une simple compression jusqu'à l'écrasement. Le test est effectué en utilisant la machine d'essai hydraulique universelle Tinius Olsen, Super L, pour tester des matériaux critiques jusqu'à 3000 KN. La résistance à la compression (F, MPa) a été déterminée en utilisant l'équation (23) :

$$C \text{ strength (MPa)} = \left(\frac{F}{A} \right) \quad (23).$$



Figure 4 36: Une compresse hydraulique universelle Tinius Olsen, Super, et étuve.

6.3.2. La résistance à la traction:

Quant à la résistance à la traction, elle a également été évaluée dans le laboratoire de mécanique des sols et des structures (LMSS) du département de génie civil de l'université Constantine1. Le test a été réalisé en respectant les normes NR (NF EN 771-1 et NF EN 998-2, 2017) et de l'essai de traction par fendage (essai brésilien) (Azil & al, 2022; Boubekeur & al, 2022).

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

Les briques cuites ont été comprimées le long de deux tiges localisées de part et d'autre de l'autre face d'une brique, ce qui a entraîné une contrainte de traction le long d'une facette verticale qui passe entre ces deux tiges (Azil & al, 2022). On est opté pour machine d'essai hydraulique universelle Tinius Olsen, et la résistance à la traction (F, MPa) des échantillons cuits a été calculée en utilisant l'équation (24) ci-dessous :

$$T \text{ strength (MPa)} = 0.9 \times \left(\frac{2F}{\pi \times l \times h} \right) \quad (24).$$

Cinq échantillons ont été testés pour chaque essai, et la moyenne a été considérée comme résultat final.

6.4. Caractérisation physicochimique

6.4.1. Taux de carbonate de calcium

La mesure des concentrations de carbonate de calcium a également été réalisée à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling (Figure 4. 22), conformément à la norme NF P 94-048 (Afnor. NF P94-048, 1996). L'expérience a été réalisée dans le laboratoire de chimie du CTC Est à Constantine. Il implique d'évaluer la quantité de CO₂ libérée par l'effet d'un excès d'HCl (à des températures et pressions atmosphériques connues) sur un échantillon donné. La quantité de CaCO₃ est déterminée en fonction du volume de gaz correspondant à l'augmentation du niveau du liquide dans la burette, selon (Fgaier, 2013).

6.4.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La morphologie des surfaces des briques cuites réalisées a été analysées au Centre de Recherche en Technologie Industrielle CRTI, à l'Unité de Développement des Couches Minces et des Applications de l'UDCMA, Zone Industrielle, Sétif, à l'aide d'une microscopie électronique (JCM-5000 NeoScope) conformément à la norme ISO 22493 : 2008 (En)(ISO 2. , 2008). Cette technique consiste à faire balayer les surfaces par un faisceau d'électrons et à recueillir l'image qui en résulte. Il a été essentiel de réaliser la métallisation à l'or au laboratoire de Physique, Faculté des Sciences Exactes, Université des Frères Mentouri Constantin I, dans le but d'améliorer la conductivité et donc la qualité de l'image (Achik & al, 2019).



Figure 4 37: L'appareillage de l'analyse Microscopie électronique à balayage (MEB).

6.5. Caractérisation environnementale

6.5.1. Test de lixiviation

À la fin de la description des nouvelles briques cuites, à base de déchets industriels, il fallait tenir compte de leur influence sur l'environnement. Cette analyse chimique a pour objectif d'évaluer si la quantité de métaux lourds est importante, car elle peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement, ou bien l'inverse (Taha, 2017). La lixiviation des métaux lourds a donc été évaluée au sein de la société Nationale des Produits Electriques ENPEC, située dans la Zone Industrielle de Sétif, en utilisant la méthode de caractérisation toxique du lixiviat (TCLP) (US-EPA 1311). Les métaux lourds concernés sont le chrome (Cr), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), l'arsenic (As), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb). Les conclusions de l'analyse ont été comparés aux limites établies par l'US EPA (1996) concernant la concentration de métaux lourds (Kadir & al, 2018; Dubale & al, 2024). Quant au protocole d'essai, les échantillons sont simplement broyés et ensuite tamisés à l'aide d'une fibre de verre de 0,7 μm .

Le liquide standard a été préparé en utilisant 1 mol de NaOH et de HCl. Il convient ensuite de préparer deux fluides d'extrait. Le pH de l'extrait 1 devrait être de 4,93, puis ajoutez de l'acide acétique glacial et du NaOH à l'eau. En revanche, le pH de l'extrait 2 est de 2,88, puis ajoutez de l'acide acétique glacial avec de l'eau sans NaOH. L'échantillon devrait alors être préparé dans des bouteilles à vis en polyéthylène, lixivé à 1,20, puis agité à 30 tr/min pendant 18 heures. Le lixiviat a été filtré à l'aide de filtres en fibre de verre de 0,7 μm et analysé en flamme à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique PinAAcle 900 H/PerkinElmer pour identifier les métaux dissous (Figure 4. 38) (Samara & al, 2009; Kadir & al, 2018)

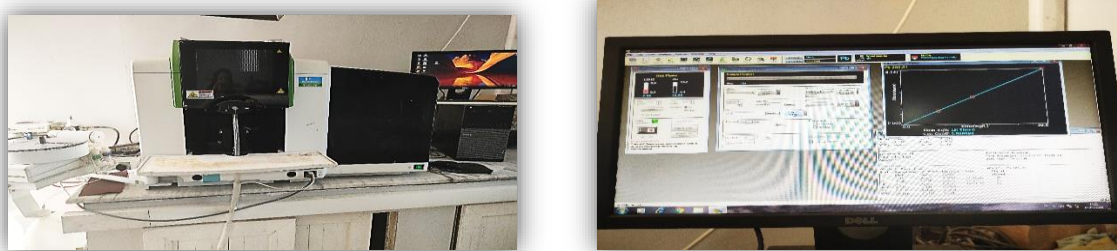


Figure 4 38: Atomic absorption spectrometer PinAAcle 900 H / PerkinElmer.

7. CONCLUSION

Dans le but d'obtenir des matériaux compatibles de meilleure qualité dans un cadre de la réhabilitation des immeubles de la Rue Didouche Mourad, Skikda. L'apport de quatre déchets industriels, utilisées en tant qu'additifs pour diverses briques cuites a été profondément expérimenté. Il était impératif de procéder à une analyse physico-chimique et minéralogique de la terre qui servait de matière première dans cette étude. En outre, on a mis l'accent sur les quatre déchets employés : la poudre de marbre fine, la poudre de marbre très fine, l'email d'acier

CHAPITRE IV :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX ET PROCESSUS DE LA PRODUCTION DES
NOUVELLES BRIQUES**

et le scieur de bois, ainsi que sur leurs caractéristiques. Ces paramètres jouent une importance capitale dans la future formulation des briques. Ensuite, les mélanges des boues d'étude ont été formulés et cinq produits sont fabriqués à partir de la terre de Mila, de la poudre de marbre fine, la poudre de marbre très fine, l'émail d'acier et la sciure de bois. Des briques ont ensuite été analysées et évalués après la cuisson. Des analyses compositionnelles, physiques et mécaniques, ainsi que l'analyse environnementale ont été réalisées en laboratoire afin d'étudier les réactions entre les additifs et la matière première argileuse. Le travail veut démontrer la complexité et la complémentarité des tests disponibles pour tester les briques en terres cuites destinées à la réhabilitation des site historiques. Une combinaison adéquate d'analyses en laboratoire permet de repérer les problèmes et les lacunes liés à la minéralogie et à la structure des briques. En effet, la disponibilité des méthodes d'analyse comme la DRX (diffraction des rayons X) ou l'analyse thermique (DTA-TG), la spectrométrie à fluorescence X (XRF), les tests de la composition minéralogique et chimique sont devenus plus faciles et la collecte d'informations est accélérée. La méthode SEM permet aussi de repérer la structure de la surface des briques. Les mesures des propriétés mécaniques comme la résistance à la traction-compression, les propriétés physiques comme la porosité accessible à l'eau et les propriétés hydriques comme l'absorption par capillarité sont de plus en plus élaborées à l'échelle du laboratoire, ce qui permet de mieux appréhender la nature hétérogène du matériau de brique. Pour évaluer les effets environnementaux, il faut opter pour une lixiviation des métaux lourds, en utilisant la méthode de caractérisation de la toxicité des lixiviats. Enfin, les avancées scientifiques permettent aux chercheurs en conservation et aux restaurateurs de créer de nouveaux matériaux de meilleure qualité. Les matériaux de nouvelle génération sont donc de plus en plus compatibles avec les briques indigènes des bâtiments anciens.

CHAPITRE V
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS :
IDENTICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET
L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

Le cinquième et dernier chapitre, fait l'objet d'une analyse des performances physico-mécaniques et du risque environnemental des briques en terre cuite de substitution. Afin d'évaluer les répercussions de l'utilisation des quatre déchets choisis comme éléments dégraissants dans la fabrication de briques cuites de rechange et leur compatibilité avec les anciennes bâtisses en maçonnerie.

1. PRÉAMBULE

Les trois premiers chapitres, riches en portées des recherches scientifiques, confirment que la valorisation des déchets industriels offre une excellente option pour fabriquer des briques cuites de rechange, présentant un bon comportement mécanique et écologique. Le cinquième chapitre étudie donc la possibilité de recycler les déchets de sciure (WS), de limaille d'acier (SF), de sable de carrière et de poudre de marbre fine (FMP) et très fine (VFMP) comme substitut partiel d'une matière première naturelle dans les briques cuites à des fins de réhabilitation des bâtiments historiques. La rue Didouche Mourad a été sélectionnée comme cas d'étude en raison de son état de vulnérabilité et sa dégradation et de la nécessité d'utiliser des matériaux de substitution adaptés lors de sa réhabilitation. Des briques cuites ont été extraites des constructions et analysées de point de vue, minéralogique, chimique et physico-mécanique. Il s'agit donc d'analyser les briques obtenues en remplaçant un pourcentage d'argile par 10% de sable et en utilisant des proportions optimales de WS, FMP, VFMP, SF, avec des taux de substitution de 5 %, 20 %, 20 %, 20 % respectivement, pour une température de cuisson optimale de 900°C. Les caractéristiques physico-mécaniques et le niveau de risque environnemental des briques en terre cuite sont abordés. Dans le but de mesurer les conséquences de l'emploi des quatre déchets comme agents dégraissants dans la production de briques cuites de rechange et leur compatibilité avec les anciens bâtiments en maçonnerie. Enfin, l'étude des différents résultats obtenus permettra de choisir la formulation la plus appropriée, la mieux adaptée et la plus adéquate pour la réhabilitation des immeubles en question.

2. RÉSULTATS DES MATIERES PREMIERES ET DECHETS

2.1. La terre de Mila

2.1.1. Caractéristiques chimiques

La terre de Mila a été analysée chimiquement à l'aide d'un spectromètre à fluorescence X (S2PUMA-BRUKER) (EDXRF) (XRF). Il a été démontré que la composition des éléments majeurs (Tableau 5.1), est marquée par une forte présence de CaO et une quantité considérable de SiO₂. Des traces de chlorure de sodium et de potassium ont été identifiées, des éléments susceptibles d'améliorer le comportement mécanique du matériau en favorisant les phénomènes de fusion (Khitab, et al., 2021). Quant aux métaux lourds, on a constaté une présence considérable dans la terre de Mila, trouvée avec différentes proportions selon les déchets. La composition est dominée par le cuivre (Cu), puis par le nickel (Ni), le rubidium (Rb) et le

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

strontium (Sr), le zinc (Zn), le chrome (Cr), le zirconium (Zr) et le manganèse (Mn) avec respectivement 0,022 %, 0,03 %, 0,03 %, 0,037 %, 0,05 %, 0,07 %, 0,08 %, 0,15 %. Les métaux lourds, tels que l'arsenic (As), n'ont pas été détectés. Une attention particulière doit être portée aux métaux lourds, il est important que la concentration observée ne dépasse pas les normes de l'EPA américaine (Dubale, et al., 2024). Ces résultats mettent donc en évidence une argile calcaire très réfractaire, souvent utilisée dans la production de briques de terre cuite (Kaouche, et al., 2024).

Tableau 5 1: Résultats de l'analyse chimique de l'argile de Mila.

Sample	CaO%	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	MgO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	Cl-%	SO ₃ %	
MC	24.76	16.00	16.48	50.20	1.96	1.36	2.94	0.04	0.33	
Sample	Mn %	Ni %	Cu %	Zn %	Rb %	Sr %	Cr %	Zr %	V %	Pb%
MC	0.15	0.03	0.02	0.05	0.03	0.37	0.07	0.08	0.08	0.03

MC= L'argile de Mila;

2.1.2. Caractéristiques minéralogiques

La composition minéralogique a été établie en utilisant un diffractomètre X'Pert PRO de PANalytical, équipé d'un détecteur X'Celerator et du logiciel HighScore, afin d'obtenir et d'interpréter les données dans les conditions suivantes : rayonnement de CuK $\alpha_1 = 1,545 \text{ \AA}$, 50 KV, 30 mA, $2\theta = 3-70^\circ$ (Banchelli, et al., 1997). La (Figure 5.1), le (Tableau 5.2) et le (Tableau 5.3) ont illustré la composition minéralogique principale et la composition minéralogique de la fraction des minéraux argileux (moins de $2\mu\text{m}$). Un sol composé de quartz (SiO₂), d'argile (kaolinite, illite, illite-smectite, smectite, chlorite) et de calcite (CaCO₃). Selon Athmania et al. (2009), l'argile est considérée comme une argile marneuse en raison de la présence de calcite entre 15 et 20% (Athmania, et al., 2009). Ce minéral se transforme en oxyde de calcium (CaO) lors de la cuisson à 750-800 °C (Fgaier, 2013) et réagit avec la silice et l'alumine issues de la destruction du réseau des minéraux argileux pour former des silicates et des aluminates de calcium (Moropoulou, et al., 1995). Des traces de dolomite et de plagioclase sont aussi présentes. Quant aux minéraux argileux, la kaolinite est la plus abondante. Ces minéraux non gonflants, avec un retrait linéaire au séchage d'environ 3 à 10 %, sont avantageux pour les briques de terre. Cependant, une présence de minéraux argileux gonflants (smectite et illite-smectite) avec un retrait linéaire au séchage d'environ 4 % à 11 % peut donner des problèmes de retrait lors du séchage. La raison pour laquelle cette argile requiert une correction granulométrique adéquate en ajoutant des dégraissers appropriés pour sa composition et en prenant soin spécifique pendant le processus de production des briques (Shakir, et al., 2013; Kaouche, et al., 2024).

Tableau 5 2: Composition minéralogique principale de l'argile de Mila (données semi-quantitatives).

Portion	Calcite	Quartz	Plagioclase	Dolomite	Clay minerals
MC	18	20	tr	tr	62

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

Tableau 5 3: Composition minéralogique de la partie argileuse (données semi-quantitatives).

Portion	Kaolinite	Illite	Illite-smectite	Smectite	Chlorite
MC	45	10	20	15	10

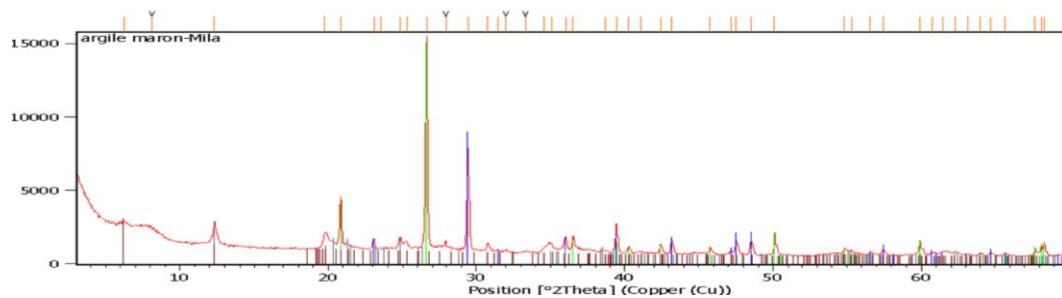


Figure 5 1: Diagrammes de diffraction des rayons X de l'argile de Mila.

2.1.3. Caractéristiques physico-chimique de la terre de Mila

Dans le cadre de nos études, nous avons réalisé une analyse physico-chimique de la terre de Mila. La répartition des granulométries a été déterminée par tamisage selon la norme P 18-560 (NF. P.18-560, 1990) et par sédimentométrie selon la norme XP CEN ISO/TS 17892-4 (XP CEN ISO/TS 17892-4, 2005). L'évaluation des limites d'Atterberg a été réalisée en utilisant la norme NF P94-051 (NF.P94-051, Mars 1993, 1993) et XP CEN ISO/TS 17892-12 (XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005). La mesure de la masse volumique a été réalisée à l'aide d'un pycnomètre conformément à la norme XP CEN ISO/TS 17892-3 (XP CEN ISO/TS 17892-3, 2005). La teneur en eau a été évaluée conformément à la norme XP CEN ISO/TS 17892-1 (XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005). La quantité de matière organique a été déterminée conformément à la norme XP P94-047 (XP P94-047, 1998) et la limite de retrait a été établie conformément à la norme DIN EN 1015-1 (Rohlen, et al., 2013). Les conditions de compactage optimales et la teneur en eau ont été évaluées en utilisant l'essai Proctor conformément à la norme NF P94-093 17 (NF P94-093,17, 2014) . Le MBI a été calculé en respectant les normes NF P94-068 (NF P.94-068, 1998), et les sels solubles ont été évalués en respectant la norme EN 1744-1 (NF EN 1744-1, 1998). En outre, on a évalué la concentration en chaux en utilisant une attaque à l'HCl, conformément à la norme belge NBN 589-209 (NF P94-048, 1996). Les propriétés physico-chimiques de la terre de Mila ont été identifiées dans le (Tableau 5.4), (Figure 5.2) et le (Figure 5.3). L'indice de plasticité est de 23,4, ce qui correspond à une plasticité moyenne (Taha, 2017; Meddah, et al., 2020). La répartition granulométrique révèle la présence de 50 % de minéraux argileux, ce qui suggère une terre avec excessivement argileuse. Le taux de retrait est élevé, atteignant 7,7 %. La valeur de MBV=5,13 confirme que l'argile est cohésive, collante, présentant une texture modulaire à l'état humide. Ces données indiquent que la répartition granulométrique doit être améliorée pour la fabrication des briques (Guzlëna, et al., 2017; Sutcu, et al., 2015). D'autre part, la concentration en matière organique et la quantité de sels solubles ne sont pas néfastes, comme le confirme (Rohlen, et al., 2013). Selon le test Proctor Normal, l'argile Mila présente une forte teneur en minéraux argileux, avec une masse volumique sèche égale à 1,73 t/m³ et une teneur en eau optimale de 12,16 % (Figure 5.4) (Houben, et al.,

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

2006). Ces données délimitent la quantité d'eau à utiliser lors de la préparation du mélange d'argile, afin d'obtenir la masse volumique maximale pour la quantité minimale d'eau (Laibi, et al., 2017). La présence de 20 % de CaCO₃ dans la terre de Mila indique que le calice de Mila renferme déjà une importante quantité de calcite, qui est encore renforcée par des additifs (Kaouche, et al., 2024).

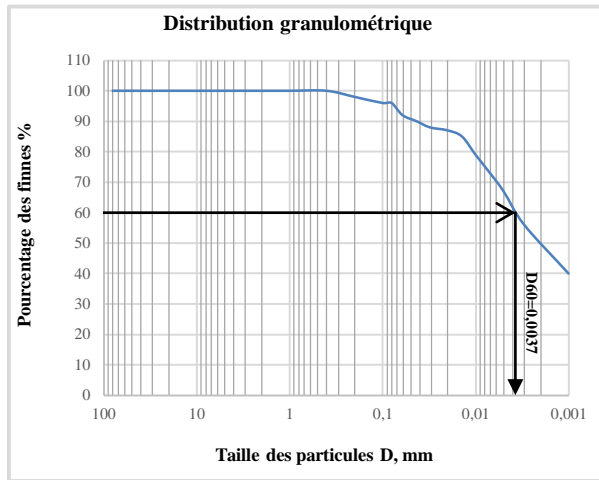


Figure 5 2: Distribution granulométrique.

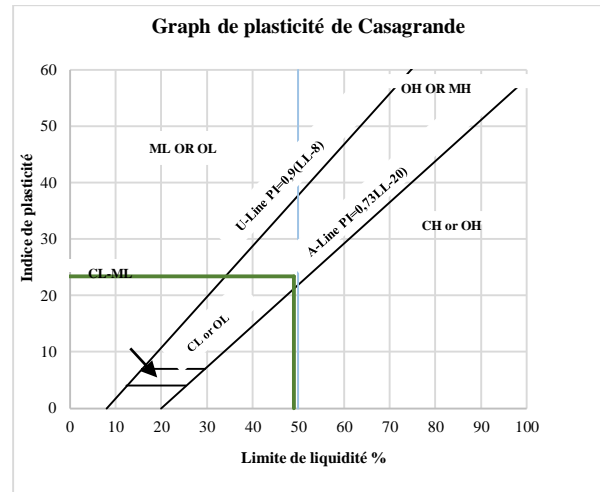


Figure 5 3: Graph de plasticité.

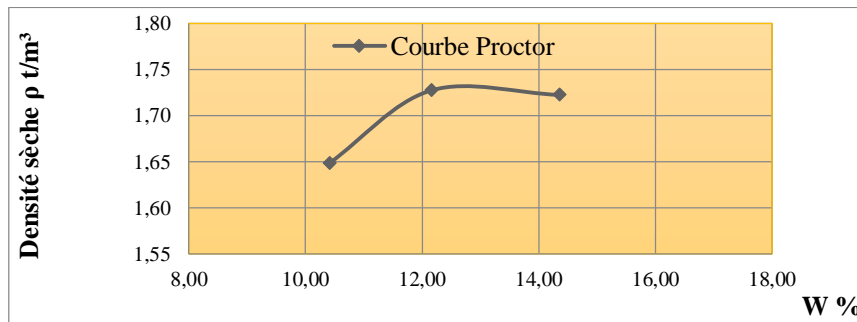


Figure 5 4: La courbe Proctor.

Tableau 5 4 : Caractéristiques physiques, distribution granulométrique, sels solubles.

Échantillon	L'argile de Mila
Limite de liquidité (%) :	LL= 48.98
Limite de plasticité (%) :	PL= 25.58
Indice de plasticité :	PI= 23.4
Granulométrie (%) :	14 (sable), 36 (limon), 50 (argile)
Valeurs du bleu de méthylène :	5.13
Teneur en eau (%) :	4
Densité : kg/m ³ (%) :	25.15
CaCO ₃ %	20.00
Indissoluble %	63.20
Teneur en matière organique (%) :	5
Teneur en sel, LCTP/% Groupe de gypse Procédure (Ca SO ₄ , 2H ₂ O) (%) :	0.92

CHAPITRE V :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES
DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS**

Chloride (%):	0.18
Linear shrinkage (%):	R= 7.7
Proctor Normal Test: $Y_{d\ Max}$ (t/m^3), $\% W_{opt}$ (%).	$Y_{d\ Max}=1.73$, $W_{opt} = 12.16$

2.1.4. L'Analyse thermogravimétrique de la terre argile de Mila

L'analyse thermique (ATD-TG) a permis de mesurer le degré d'hydraulicité de la terre de Mila. Dans la (Figure 5.5), la courbe thermogravimétrique de la terre de Mila indique une diminution totale de poids de la matière première estimée à 18,57 %, ce qui indique que 83 % de la terre n'a pas été décomposée. Les valeurs maximales sont observées à 110 °C, avec une diminution de 2,97 % en raison de l'humidité. Un deuxième pic a été observé entre 200 et 250 °C, en raison de la perte d'eau "liée" ou de la perte de cations intercalés "hydratés" (comme dans le gonflement des minéraux argileux). Le gypse présente également des effets endothermiques dans la plage de température de 120 à 160 °C (Moropoulou, et al., 1995; Cardiano, et al., 2004). Un troisième pic de perte de poids de 1,96 % a été observé entre 550 et 650 °C, ce qui est lié à la diminution de la matière organique. C'est aussi la zone de température où les minéraux argileux kaolinitiques peuvent être repérés grâce à leur activité endothermique assez élevée (Sutcu, 2015; Achik, et al., 2019). Enfin, un quatrième pic explique la diminution de masse de 7,3 % à une température comprise entre 750 °C et 850 °C en raison de la décomposition du CaCO₃ bien cristallisé (Sutcu, et al., 2015; Kizinievič, et al., 2018; Achik, et al., 2019; Kaouche, et al., 2024).

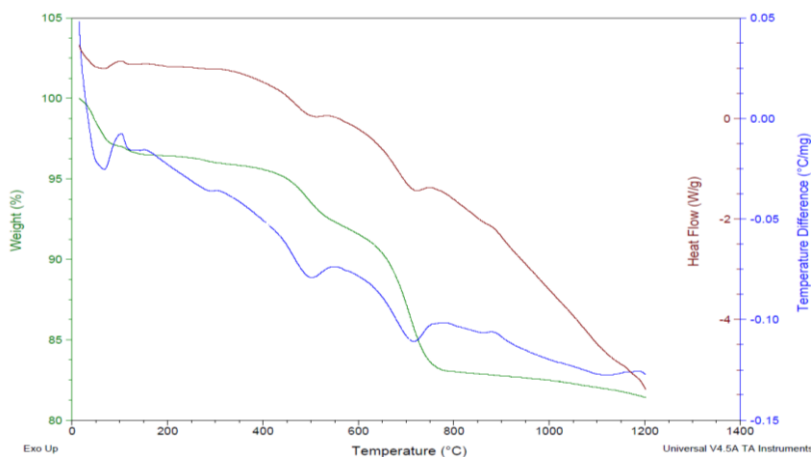


Figure 5 5: Analyse thermogravimétrique de la terre de Mila.

2.2. Les déchets

2.2.1. Caractéristiques chimiques des additifs

Les différents déchets ont été analysés en utilisant la fluorescence X (XRF). Les résultats sont présentés dans le (Tableau 5. 5). Les principaux constituants de la poudre de marbre et du sable

CHAPITRE V :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES
DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS**

sont le calcium (Ca) avec respectivement 95,96 et 96,27 %, suivi de l'aluminium (Al) avec environ 3,50 % en poids et du fer (Fe) avec 0,30 % et 0,13 % en poids, tout en notant la présence de traces de (Si) dans le sable. Bien que la présence de calcium (Ca) puisse présenter des bénéfices lors de la cuisson, tels que la création de briques solides, elle peut également compromettre la porosité des briques (Fabbri, 2014).

Le composant principal de la limaille d'acier est le fer (81,31 %), suivi par l'aluminium (9,70 %), le calcium (4,92 %), le silicium (1,99 %) et des traces de K (1,99 %). Deux éléments fondamentaux des briques cuites d'argile sont le silicium et l'aluminium. L'ajout de 10 % de fer est aussi avantageux pour la production de briques cuites. D'après (Hashim, et al., 2022), une augmentation de la concentration en fer, pourrait entraîner des efflorescences, une décoloration et la formation d'un noyau noir lors de la cuisson dans une atmosphère nuancée.

Les éléments Ca, Al, K, Si et Fe sont peu présents dans la sciure de bois, avec 0,56 %, 0,70 %, 0,27 %, 0,22 % et 0,03 % de poids. Par ailleurs, le tableau 5. 5 montre que les déchets contiennent des quantités très faibles de métaux lourds (Cr), (Mn), (Ni), (Cu), (Zn), (As), (Rb) et (Pb). Toutefois, la transformation de phase et la volatilisation des métaux lourds sont fortement influencées par des concentrations élevées d'oxyde de calcium (CaO). En outre, à une température élevée, il peut provoquer l'oxydation du Cr (III) en Cr (IV). Cela offre des avantages au CaO pour stabiliser les métaux lourds. Dans ces déchets, la plupart des métaux ne seraient pas transformés en un état instable. La lixiviation des métaux toxiques est diminuée (Hashim, et al., 2022; Kaouche, et al., 2024).

Tableau 5 5: Caractéristiques chimiques des additifs.

Sample	Si %	Al %	S %	Cl %	K %	Ca %	Fe %	Mn %	Cr %
FMP, VFMP	0.00	3.70	0.00	0.00	0.00	95.96	0.30	0.02	0.00
Sand	0.05	3.50	0.00	0.00	0.00	96.27	0.13	0.01	0.00
SF	1.99	9.70	1.07	0.05	0.09	4.92	81.31	0.43	0.05
WS	0.22	0.70	0.02	0.00	0.27	0.56	0.03	0.03	0.00

Sample	Co %	Ni %	Cu %	Zn %	As %	Rb %	Sr %	Zr %	Mo %	Pb %
FMP, VFMP	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Sand	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
SF	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WS	0.22	0.70	0.02	0.00	0.27	0.56	0.00	0.03	0.03	0.03

2.2.2. Caractéristiques physiques, sels solubles et analyse thermogravimétrique des additifs

L'analyse physico-chimique du sable et de la poudre de marbre fine ainsi que de la poudre de marbre très fine a été effectuée. Il a été procédé à l'évaluation des granulométries en utilisant le tamisage conformément à la norme (P 18-560,1990) (P 18-560, 1990). La norme NF NF.933-8 (NF.933-8, 1999), a été employée pour le calcul du MBI, tandis que la norme EN 1744-1

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

(NF EN 1744-1, 1998) a été utilisée pour l'évaluation des sels solubles. Par ailleurs, la teneur en chaux a été évaluée par l'attaque à l'HCl, selon la norme belge NBN 589-209 (NF P94-048, 1996). L'équivalent de sable a été calculé, conformément à la norme NF ENP. 933-9 (NF ENP. 933-9, 1999).

La distribution granulométrique est illustrée dans (Figure 5.6), tandis que les données de granulométrie et la valeur du bleu de méthylène sont rapportées dans Tableau 5.6. La répartition granulométrique de la poudre de marbre est trop étroite pour une fraction fine supérieure à 70 % pour le FMP et pour une fraction fine supérieure à 86 % pour le VFMP. Cette différence peut avoir un impact sur le comportement des échantillons. Cette différence peut influencer le comportement des échantillons. L'équivalent de sable (SE) du sable de Sigues est de 57,2 % et toute la fraction fine a été éliminée, en ne laissant que la partie supérieure à 0,16 et inférieure à 2 mm. La valeur de 0,75 (g/kg) du MBV confirme qu'il est insensible à l'eau Tableau 5. 2. (NF.933-8, 1999). La concentration en CaCO₃ est de 87,7 % pour le sable de Sigues et de 90,4 % pour la poudre de marbre très fine et fine. Cela indique que les additions renferment une quantité significative de calcite (Kaouche, et al., 2024).

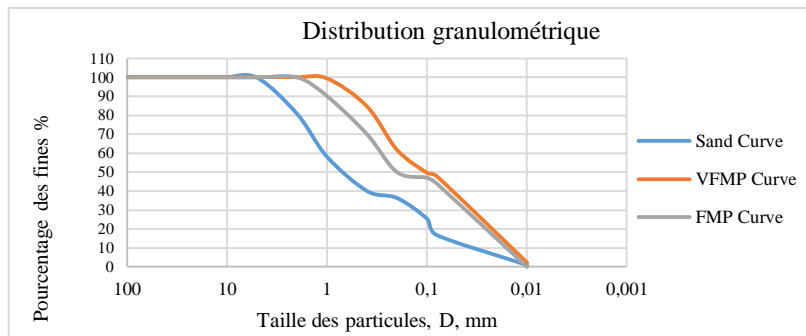


Figure 5 6: Répartition granulométrique du sable, FMP et VFMP.

Tableau 5 6: Analyse physico-chimique des additifs.

Test	Sable			FMP			VFMP		
	0.080-0.315	0.315-1.25	1.25-5.00	0.080-0.315	0.315-1.25	1.25-5.00	0.080-0.315	0.315-1.25	1.25-5.00
Taille des mailles du tamis (mm)	0.080-0.315	0.315-1.25	1.25-5.00	0.080-0.315	0.315-1.25	1.25-5.00	0.080-0.315	0.315-1.25	1.25-5.00
Résultats (%)	40	20	40	70	26	4	86	14	0
CaCO ₃ %	87.70			90.40			90.40		
Inssoluble %	0.66			5.30			4.90		
L'équivalent de sable :	SE % 57,2 % : cela signifie qu'un sable assez propre (NF ENP. 933-9, 1999).								
Bleu de méthylène, sable :	MB= (VI/M1)*1 (g/kg)			0,75			: la terre est insensible à l'eau (NF.933-8, 1999).		

2.2.3. L'Analyse thermogravimétrique du sable de Sigues

La courbe de thermogravimétrie du sable de Sigues (Figure 5.7), montre un pic unique de perte de masse entre 700 et 850 °C, de l'ordre de 44,5 %, correspondant à la décomposition de la calcite (Moropoulou, et al., 1995; Achik, et al., 2019). Au-delà de la température de

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

décarbonatation, la calcite se décompose en libérant du CO₂ et en formant de la chaux (CaO), qui absorbe l'humidité atmosphérique pour former de l'hydroxyde de calcium [Ca(OH)₂]. Ce dernier réagit lentement avec le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique pour cristalliser à nouveau en calcite (Fabbri, 2014; Kaouche, et al., 2024).

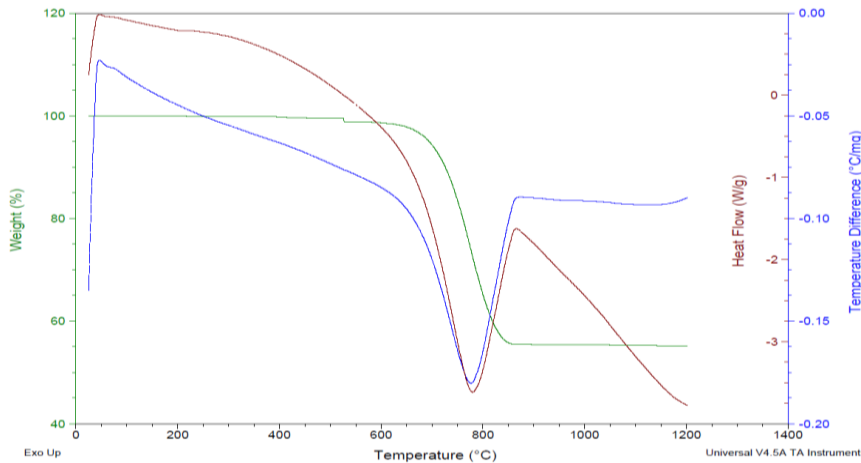


Figure 5 7: Analyse thermogravimétrique du sable de Sigues.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Couleur des briques cuites

La couleur des briques cuites varie en fonction de la composition minéralogique et chimique de la matière première et ajouts, ainsi que de la température de cuisson. (Figure 5.8) les briques cuites avec l'ajout de SF présentent une couleur plus foncée en raison de la présence importante de fer sous forme de Fe₂O₃ (Alonso-Santurde, et al., 2012; Ntouala, et al., 2024). D'autre part, l'incorporation de poudre de marbre a donné lieu à une couleur claire en raison de la phase de néoformation causée par la réaction de CaO avec la silice (Ahmad, et al., 2021; Thalmaier, et al., 2022; Kaouche, et al., 2024).

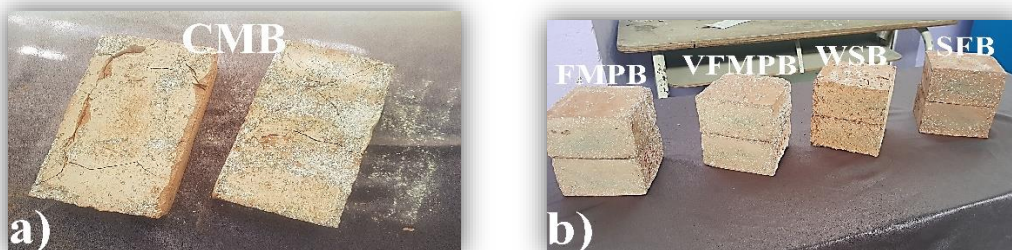


Figure 5 8: de droite à gauche, a) briques cuites sans ajouts (CMC) ; b) briques cuites avec ajouts.

3.2. Caractéristiques physiques

3.2.1. Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes des briques cuites fabriquées ont été déterminées, selon la norme ASTM C67-17 (ASTM C67/C67M-21, 2014). Le (Tableau 5.7) montre que les briques avec ajout de VFMP et de FMP présentent des masses volumiques apparentes de 1,60 g/cm³ et 1,64 g/cm³ respectivement, ce qui est inférieur aux briques cuites témoins (CMB) (1,69 g/cm³). La réduction peut être attribuée à la décomposition des particules de calcite de plus de 0,5 mm à haute température de cuisson, ce qui entraîne l'émergence de pores, de fissures et une diminution du poids liée au dégagement de CO₂. Ces résultats sont en accord avec les recherches antérieures (Oorkalan, et al., 2020; Ahmad, et al., 2021). L'ajout de 5% WS, entraîne une baisse importante de la masse volumique apparente (1,35 g/cm³) en raison de l'augmentation de la porosité causée par la combustion de la sciure. La densité des briques additionnées de SF est la plus élevée (1,87 g/cm³) en raison de la densité élevée de la limaille d'acier (Alonso-Santurde, et al., 2012). À la différence des briques cuites WSB, toutes les briques sont conformes aux normes identifiées par (Khitab, et al., 2021; Kaouche, et al., 2024).

3.2.2. Retrait à la cuisson, et perte de poids

Le retrait à la cuisson et la perte de poids ont été mesurés en utilisant le processus présenté par (Achik, et al., 2019; Balogun, et al., 2021). Les résultats montrent que le type d'ajouts joue un rôle crucial dans le retrait et la perte de poids des briques, comme le montre le (Tableau 5.7). En raison de la grande plasticité de l'argile de Mila, le retrait augmente pour atteindre un maximum de 11,3 % pour la brique de référence CMB, ce qui entraîne une augmentation de 41,75 % de la perte de poids. Cela favorise les phases vitreuses, réduisant la porosité et augmentant la densité et la résistance (Ntouala, et al., 2024). De plus, une diminution modérée du retrait est observée pour VFMPB et FMPB de 6,9 % et 6,4 %, respectivement, favorisée par la bonne cohésion inter-particulaire dans la phase liquide pendant le processus de vieillissement, tandis qu'une perte de masse reste évidente, en raison de la décomposition des grains de calcite (Moropoulou, et al., 1995; Ngayakamo, et al., 2020). L'apparition de pores secondaires dans la structure, en raison de la libération de CO₂ lors de la calcination de CaCO₃, est la principale raison de la différence de taille du FMP par rapport au VFMP (Ntouala, et al., 2024). Pour le SFB, l'augmentation modérée de 5,5 % s'explique principalement par la perte d'eau ajoutée au mélange. Toutefois, le SF demeure également un élément inactif lors du traitement thermique, comme en témoigne la perte de masse la plus faible de 25,85 % (Vieira, et al., 2018). L'échantillon de brique cuite WSB présente le retrait le plus faible de 4,7 %, car le bois ne se rétrécit pas lors de la cuisson. En revanche, la diminution du poids atteint son niveau maximal de 38,82 %, car le bois brûle sous l'influence de la chaleur (Ntouala, et al., 2024), ce qui entraîne la formation d'un matériau plus léger, plus poreux et moins résistant.

CHAPITRE V :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES
DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS**

Tous les retraits sont conformes aux normes ASTM (CTTB, 1998; Prabhu, et al., 2019; Kaouche, et al., 2024).

3.2.3. Porosité accessible à l'eau et absorption d'eau capillaire

La porosité ouverte a été déterminée selon les normes NF ISO 501 et ASTM C20 (Banchelli, et al., 1997), ainsi que l'absorption par capillarité a été évalué selon la norme NF EN 771-1+1A/CN (NF EN 771-1+1A/CN, 2015). Les briques sans ajouts présentent une porosité accessible à l'eau de 27,2 % et une absorption d'eau de 0,72 (kg/m².min) respectivement, comme le montre le (Tableau 5.7).

Les briques cuites VFMB montrent une augmentation significative de la porosité et de l'absorption d'eau (30,2 % et 0,90 (kg/m².min) respectivement) en raison de la décomposition du CaCO₃ pendant la cuisson, qui se transforme en oxyde de calcium, entraînant une augmentation de la porosité liée au dégagement de CO₂. En revanche, une augmentation modérée de la porosité et de l'absorption d'eau est observée pour les briques cuites VFMPB (29,3 %, 0,79 (kg/m².min) respectivement). Cette augmentation modérée de la porosité (par rapport aux briques ajoutées avec VFM) peut s'expliquer par la plus grande facilité des petits granules de CaO à réagir avec la silice. En outre, l'incorporation de SF favorise une augmentation de la porosité et de l'absorption (33,5 %, 1,12 (kg/m².min)), en raison de la forte dilatation thermique du métal par rapport à la matrice de briques cuites, ce qui entraîne des contraintes dans le matériau (Alonso-Santurde, et al., 2012; Vieira, et al., 2018; Shaqour, et al., 2021). En incorporant 5 % de WS, on observe une absorption de 8,72 kg/m².min et une porosité de 44,6 % (Stulz, et al., 1997; Darweesh, 2021). Il convient également de noter que l'ajout de sable aux briques cuites WCB et SFB accroît encore le taux de porosité.

La porosité modérée des briques permet d'améliorer leurs caractéristiques d'isolation thermique en maintenant des températures agréables à l'intérieur du bâtiment, ce qui permet également de diminuer la consommation d'énergie. Inversement, une porosité extrêmement élevée peut engendrer des dommages (Ntouala, et al., 2024). En conclusion, malgré l'augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau, les briques cuites additionnées de SF, VFMP et FMP respectent toujours les normes NF EN 771-1+1A/CN (NF EN 771-1+1A/CN, 2015), contrairement à celles additionnées de WS, qui dépassent l'absorption d'eau et la porosité autorisées (Khitab, et al., 2021; Darweesh, 2021; Kaouche, et al., 2024).

Tableau 5 7: Propriétés physiques et mécaniques des briques cuites.

Echantillon	WSB	SFB	FMPB	VFMPB	CMB	SOFB
γ_s (g/cm ³)	1,35 ±0.03	1,87±0.02	1.60 ±0.01	1.64 ±0.03	1.69 ±0.02	1.74±0.02
R (%)	4.7±0.4	5.5±0.5	6.4±0.7	6.9±0.4	11.3±0.4	/
W _L (%)	38.82 ±0.14	25.85±0.50	36.11 ±0.40	32.65 ±0.23	41.75 ±0.30	/
(AW)(kg/m ² .min)	8.72 ±0.45	1.12 ±0.80	0.90 ±0.70	0.79 ±0.60	0.72 ±0.90	8.79 ±0.40
P (%)	44.6±0.1	33.5±0.1	30.3±0.0	29.3±0.0	27.2±0.1	31.0±0.1

Note: (WSB = briques cuites avec sciure de bois ; SFB = briques cuites avec limaille d'acier ; FMPB = briques cuites avec poudre de marbre fine ; VFMPB = briques cuites avec poudre de marbre très fine ; CMB = briques cuites témoins ; SOFB = briques cuites de Skikda ; γ_s (g/cm³) = masse volumique apparente ; R% = retrait à la cuisson ; W_L (%) = perte de poids ; AW (kg/m².min) = absorption d'eau ; P (%) = porosité ouverte totale) ;

3.3. Caractérisation mécanique :

3.3.1. Résistance à la compression

Les caractéristiques mécaniques des briques cuites ont été mesurées en utilisant un essai de compression uniaxiale avec la méthode de meulage et de collage conformément aux normes EN 1926/1999 (Kodjo DG, 2019) et EN 771-1/CN (CSTB 2017). Les résistances à la compression des briques cuites avec les divers ajouts sont illustrées dans les (Tableaux 5.8) et (Figure 5.9). Les résultats indiquent une légère hausse de la résistance de 4,6 MPa pour les briques cuites témoins (CMB) par rapport aux briques cuites de Skikda de 4,3 MPa. Les propriétés mécaniques des briques cuites avec VFMP sont les plus élevées, avec une résistance à la compression de 11,7 MPa. D'après les travaux de Thalmaier et al. (Thalmaier, et al., 2022), Darweesh (Darweesh, 2021) et Muñoz et al. (Muñoz, et al., 2016), la dégradation des grains fins de marbre entraîne la création de pores fins et la production de silicates et d'aluminates de calcium, ce qui accroît la résistance de la brique cuite lors de la cuisson. Quant aux briques cuites à base de FMP et de SF, elles sont présentées avec des résistances de 9,7 MPa et 9,6 MPa respectivement. Quant au FMP, Achik et al. (Achik, et al., 2019), et Sutcu et al. (Sutcu, et al., 2015), soulignent que l'implémentation de calcite grossière peut comporter des dangers car les particules grossières d'oxyde de calcium produites lors de la cuisson ne réagissent pas avec la silice, mais s'hydratent et se carbonatent dans la maçonnerie, ce qui entraîne des contraintes altérant les caractéristiques mécaniques des briques cuites. Selon des recherches menées par (Ahmad, et al., 2021), il est démontré que la poudre de marbre grossière de plus de 0,5 mm rend les propriétés mécaniques plus fragiles en raison d'une porosité accrue. On désigne ce phénomène sous le nom de « soufflage de chaux » (Elert, et al., 2003; Cultrone, et al., 2005). Quant à l'incorporation de SF, l'augmentation de la résistance à la compression peut être expliquée par le comportement inerte pendant la cuisson et par l'augmentation de la masse volumique apparente, comme il a été souligné dans des études antérieures (Elert, et al., 2003; Vieira, et al., 2018). Par contre, l'incorporation de WS est préjudiciable aux propriétés mécaniques en raison de l'augmentation significative de la porosité causée par la combustion des particules de bois lors de la cuisson (Achik, et al., 2019;). Selon les normes EN 771-1/CN et ASTM C-67, le VFMP, le FMP et le SF sont considérés comme appropriés pour les murs extérieurs et intérieurs (NR EN 771-1/CN, 2008; Khan, et al., 2021; Achik, et al., 2021) à la différence du WS (Sutcu, et al., 2015; Kizinievič, et al., 2018; Kaouche, et al., 2024).



CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS



Figure 5 9: Essai de compression uni-axiale sur des échantillons représentatifs : (a) SOFB; (b) CMB; (c) WSB; (d) SFB; (e) VFMPB; (f) FMPB.

Tableau 5 8: Essai de compression uni-axiale (MPa).

	<i>Résistance à la compression (MPa)</i>
SOFB	4.3±0.4
CMB	4.6±0.5
WSB	2.2±0.2
SFB	9.6±0.6
FMPB	9.7±0.5
VFMPB	11.7±0.4

3.3.2. Résistance à la traction

La mesure de la résistance à la traction a été réalisée en utilisant la norme NR (EN 771-1/CN) (CSTB 2017), (XP P 13-901, 2001) en se basant sur le test de traction par fente (test brésilien) (Boubekeur, et al., 2021; Azil, et al., 2022). Le (Tableau 5. 9) et la (Figure 5.10) illustrent la résistance à la traction des briques cuites en fonction des ajouts. À la différence de la résistance à la compression, la brique cuite témoin de la terre de Mila a une résistance à la traction inférieure de 1,5 MPa par rapport à celle de la brique cuite de Skikda de 1,7 MPa. Cette diminution est due à la fissuration des briques cuites témoins CMB, compte tenu de la teneur élevée en argile. Les performances les plus satisfaisants sont obtenues pour VFMPB à 2,7 MPa Ahmad (Ahmad, et al., 2021) et Elert et al. (Elert, et al., 2003) ont montré qu'une telle augmentation peut être attribuée à la présence d'une quantité significative de grains fins de marbre, ce qui entraîne la formation de minéraux de néoformation (comme rapporté précédemment), réduisant les zones faibles des briques cuites frittées et améliorant la résistance à la traction. Quant aux briques cuites FMPB, la résistance obtenue est inférieure à 2,6 MPa, ce qui démontre l'effet de la décomposition de la calcite grossière sous l'effet de la chaleur, ce qui entraîne des contraintes qui affectent la résistance à la tension des briques cuites (Moropoulou, et al., 1995; Elert, et al., 2003; Rasool, et al., 2022). Par ailleurs, l'incorporation de SF donne une résistance de 1,6 MPa, inférieure à celle des briques avec FMP, principalement en raison de l'augmentation de la porosité.

Effectivement, l'utilisation de limailles d'acier diminue la plasticité et la capacité de liaison des particules. En outre, l'environnement alcalin prévient la conversion des métaux lourds en une phase minérale stable à haute température, ce qui réduit la résistance à la traction, comme le

CHAPITRE V :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

rapportent d'autres chercheurs tels que Dai et al. (Vieira, et al., 2018; Zhuqing., et al., 2019). La résistance la plus basse de la brique cuite avec l'ajout de WS est due à la réduction de la connexion entre les particules et à l'augmentation de la porosité après réduction. Les résultats confirment que l'augmentation de la porosité a un impact sur la résistance à la traction, qui est à son tour influencée par la perte de masse et les caractéristiques microstructurales des briques cuites. L'apparition de grains de calcite a été observée dans toutes les briques, mais à des degrés différents. Cela suggère que la réaction est sans doute causée par des particules de sable ayant un diamètre supérieur à 0,5 mm (Kaouche, et al., 2024).



Figure 5 10: Essai de traction indirecte sur un échantillon représentatif : a) a) SOFB; b) CMB; c) WSB; d) SFB; e) VFMPB; f) FMPB.

Tableau 5 9: Essai de traction indirecte (MPa).

	<i>Résistance à la traction (MPa)</i>
<i>SOFB</i>	1.7±0.3
<i>CMB</i>	1.5±0.4
<i>WSB</i>	0.6±0.2
<i>SFB</i>	1.9±0.2
<i>VFMPB</i>	2.7±0.4
<i>FMPB</i>	2.6±0.3

CHAPITRE V :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES
DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS**

3.4. Menaces pesant sur l'état de conservation

3.4.1. Quantité de calcite dans les briques cuites de Mila et toutes les briques cuites

Afin de déterminer la quantité et la nature de la calcite présente dans les briques cuites après cuisson. Le carbonate de calcium a été mesuré à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling conformément à la norme NF P 94-048 (NF P94-048 , 1996). La concentration de CaCO₃ dans les briques cuites après cuisson est indiquée dans le (Tableau 5. 10). Le taux de 0,81% est observé dans CMB, 2,84% pour SFB, 3,45% pour WSB, 4,06 pour VFMPB et 7,52 pour FMPB. Cette calcite est le résultat de l'hydratation et de la carbonatation du CaO produit pendant lors cuisson. Elle peut être soit primaire, préalablement présente dans la matière première, soit obtenue en ajoutant du sable et de la poudre de marbre (Kaouche, et al., 2024).

Tableau 5 10: Teneur en CaCO₃ des briques cuites.

Sample designation	FMPB	VFMPB	SFB	WSB	CMB
CaCO ₃ %	7.52	4.06	2.84	3.45	0.81

3.4.2. Comparaison des micrographies MEB des briques cuites au grossissement de 20 µm :

Les surfaces de diverses briques ont été analysées à l'aide d'une microscopie électronique (JCM-5000 NeoScope) conformément à la norme ISO 22493: 2008 (En) (ISO.22493, 2008). L'essai a été réalisé sur des échantillons métallisés à l'or, une étape cruciale pour améliorer la conductivité et améliorer la qualification de l'image (Achik, et al., 2019). On a évalué les briques cuites contenant divers déchets et comparées aux briques cuites de Skikda. Il est démontré dans la (Figure 5. 11-a) que les briques cuites de Skikda présentent une texture plutôt compacte, dense et lisse, avec une porosité serrée.

- La brique témoin de Mila CMB (Figure 5. 11-b) présente une texture ouverte composée de feuillets aléatoirement orientés, ce qui laisse place à des pores à la fois ouverts et non connectés (Izemouren, 2016). Des cristaux de calcite sont également visibles, formés à la suite de la décomposition de la calcite d'origine (Samara, et al., 2009; Mattone, et al., 2016).

- Les briques cuites VFMPB (Figure 5. 11-c) présentent une texture plus homogène, offrant une microporosité remarquable, ainsi que la présence de petits grains de calcite et même de quelques gros. La décomposition du carbonate de calcium semble présenter quelques réactions potentielles, les nouvelles phases de silicate de calcium étant très fines. En outre, il est possible d'observer la formation de petits pores lors de la décomposition de grains fins de calcite grâce à des microfissures qui se forment lors de l'expansion due à l'hydratation et à la carbonatation du CaO provenant de gros grains de calcite (Martirena, et al., 2006; Izemouren, 2016).

- La texture FMPB (Figure 5. 11-d) présente de larges pores phénomène lié à la décomposition de la poudre de marbre et du sable carbonaté avec un diamètre supérieur à 0,5 mm (Samara, et al., 2009; Fabbri, et al., 2014). Par ailleurs, de grandes particules de calcite sont formées par

CHAPITRE V :

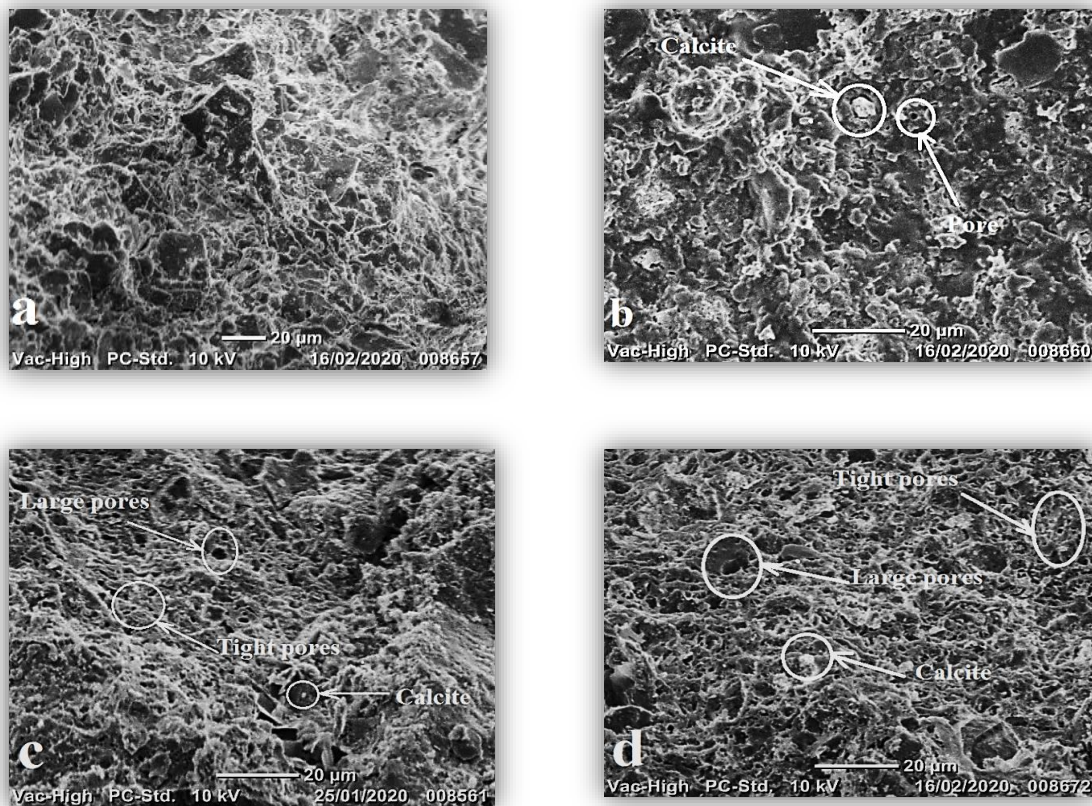
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

l'hydratation et la carbonatation du CaO. La cristallisation peut provoquer des microfissures dans un espace confiné (Martirena, et al., 2006; Allegretta, et al., 2016).

- (Figure 5. 11-e) présente l'échantillon avec une concentration de 5% de WS, qui semble être rugueux et irrégulier (Izemmouren, 2016). La fragilité des briques cuites est expliquée par les images de la surface qui s'effrite. La multiplicité des grains, qui mettent en évidence des fissures, ainsi que l'émergence de particules lâches et de microfissures sont des indices évidents d'altération. La grosseur des particules de calcite est due à la carbonatation du CaO issu des particules grossières de calcite du sol et du sable. En outre, la porosité après combustion du bois est très importante.

- (Figure 5. 11-f) illustre la structure du SFB, ce qui témoigne d'une structure moins compacte et d'une organisation moins homogène des grains. La présence de fractures et de micro-fissures est un signe évident d'une altération physique, car les limailles d'acier diminuent la plasticité et la capacité de liaison entre les particules, comme le confirme (Izemmouren, 2016; Dai, et al., 2019). De grands pores sont également observés en raison de la dégradation des particules de sable carbonaté lors de la cuisson (Vieira, et al., 2018).

Finalement, à une température de 900 °C, la morphologie et les signes de vitrification ne sont que partiellement observés (Kaouche, et al., 2024).



RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE SUBSTITUTIONS

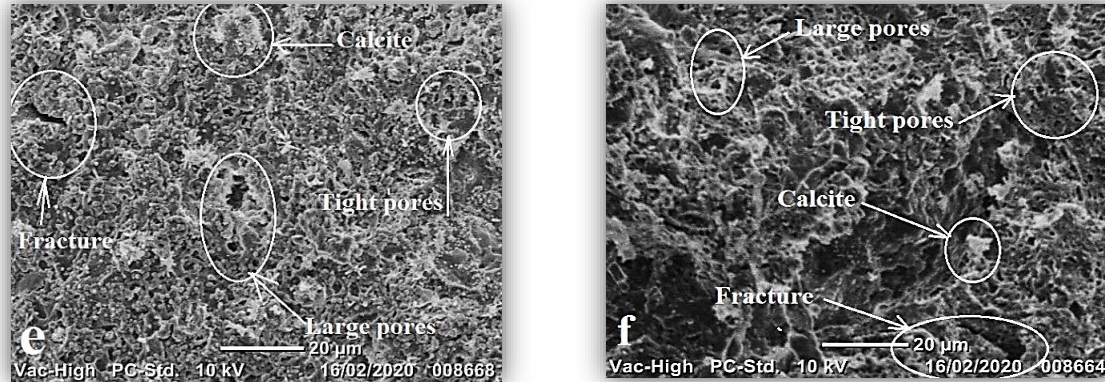


Figure 5 11: Micrographie obtenue par MEB des briques frittées à 900 °C : a) SOFB; b) MCB; c) VFMPB; d) FMPB; e) WSB; f) SFB; at magnification of 20 µm.

3.5. Aspect environnemental

3.5.1. Test de lixiviation

Les nouvelles briques cuites contenant les déchets industriels étudiés ont été soumises à un test de lixiviation afin d'évaluer leur impact sur l'environnement. Le test a été réalisé conformément à la méthode USEPA 1311. Le (Tableau 5. 11) présentes les résultats cumulés de lixiviation.

Les métaux lourds concernée par l'étude, constitué de (Cu), (Pb), (Zn), (Mn), (Ni), (Cr), (Fe), (As) et (Cd). Les briques MCB, FMPB, VFMPB, SFB, WSB ont enregistré des concentrations maximales de chrome (Cr), manganèse (Mn), nickel (Ni), cuivre (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), plomb (Pb), argent (Ag) de 2,92 ppm, 3,94 ppm, 0,33 ppm, 1,36 ppm, 1,69 ppm, 0,05 ppm, 0,24 ppm, 0,91 ppm respectivement. il a été constaté que la lixiviation cumulative de tous les métaux lourds est négligeable car elle est nettement inférieure aux limites maximales de lixiviation établies par l'Agence américaine de protection de l'environnement (US EPA, 1996) (Hashim, et al., 2022).

Les briques cuites, notamment celles contenant de la sciure, ont été observées avec une lixiviation plus faible de (Cr), As et Pb. Cela laisse entendre que la lixiviation de certains métaux lourds pourrait être diminuée en incorporant des bio-solides dans les briques cuites (Ukwatta, et al., 2017). En outre, les résultats indiquent que les concentrations de (Cr) et (Pb) dans les briques témoins sont supérieures à celles des briques stabilisées en raison de l'oxydation des métaux lourds lors de la cuisson à haute température. Alternativement, la teneur élevée en silice de l'argile pourrait améliorer la liaison entre les particules dans les briques réduisant la lixiviation des métaux lourds présents dans la matière première (Hasan, et al., 2022; Dubale, et al., 2024). De plus, l'oxyde de fer peut également contribuer à la stabilité et la formation du réseau, notamment en lixiviation. Par ailleurs (comme indiqué précédemment), des recherches ont démontré que la phase d'évaporation des métaux lourds est conditionnée par des concentrations élevées d'oxyde de calcium (CaO). En effet, une chaleur élevée induit l'oxydation du Cr (III) en Cr (IV), ce qui rend le CaO bénéfique en stabilisant les métaux lourds,

CHAPITRE V :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES
DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS**

et en général la majorité des métaux présents dans ces déchets qui ne seraient pas transformés en conditions instables, Ainsi, cette stabilisation diminue la lixiviation des métaux toxiques (Hashim, et al., 2022). Cette étude montre un résultat positif concernant la lixiviation possible de métaux lourds lors de l'utilisation de déchets comme solution partielle pour remplacer la terre argileuse. Cela suggère que les briques contenant des déchets pourraient être employées comme matériau de construction sans nécessiter de traitement et sans avoir d'impact sur l'environnement. Cela permettra aussi de diminuer la pollution engendrée par le bois, le marbre et l'acier usagés. Les résultats de l'analyse de la toxicité des lixiviats (TCLP) (US-EPA 1311) sont présentés dans le tableau 5. 7- ci-dessous (Samara, et al., 2009; Kadir, et al., 2018; Hashim, et al., 2022; Dubale, et al., 2024; Kaouche, et al., 2024).

Tableau 5 11: Les résultats de la caractérisation de la toxicité des lixiviats (TCLP) (US-EPA 1311).

Métaux lourds	Limite de concentration (mg/l) (USEPA, 1996)	Concentration (mg/l)				
		<i>FMPB(ppm)</i>	<i>VFMPB(ppm)</i>	<i>WSB (ppm)</i>	<i>SFB(ppm)</i>	<i>CMB (ppm)</i>
Chrome (Cr)	20	0,44	0,38	0,26	0,28	0,92
Manganèse (Mn)	260	1,62	1,82	1,18	3,94	1,52
Nickel (Ni)	8	0,28	0,24	0,20	0,33	0,19
Cuivre (Cu)	2	0,23	0,25	0,18	1,36	0,18
Zinc (Zn)	1200	1,69	0,85	0,65	0,61	0,43
Arsenic (As)	2.8	0.00	0.00	0.00	0,05	0.00
Cadmium (Cd)	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Plomb (Pb)	5	0,03	0,04	0,03	0,01	0,24
Argent (Ag)	5	0,19	0,09	0,09	0,10	0,08

4. CONCLUSION

L'objectif principal de ce dernier chapitre est de suggérer des solutions adaptées et respectueuses de l'environnement pour la réhabilitation des anciens murs en maçonnerie des immeubles de la Rue Didouche Mourad, à Skikda. La terre de Mila offre une alternative très intéressante, tout comme les déchets industriels (sable de Sigus, poudre de marbre, email d'acier, sciure de bois). Au terme d'une série d'essais visant à évaluer le degré de compatibilité avec les briques témoins, les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

- Historiquement, les briques de Skikda sont fabriquées entre 1900 et 1920 et peuvent être produites localement ou importées de la ville de Marseille pendant la période coloniale. Elles ont démontré une résistance mécanique inférieure à la norme requise. Cela peut être attribué à la dégradation qu'elles ont subie au fil des ans. D'après l'analyse minéralogique, on a pu observer la présence de mullite et d'hématite, des minéraux de néoformation qui suggèrent une température de cuisson allant de 800 à 900 °C. Ces minéraux se forment dans des sols contenant

CHAPITRE V :

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : IDENTIFICATIONS DES COMPOSANTES
DE MELANGE ET L'ETUDE DES PERFORMANCES DES BRIQUES DE
SUBSTITUTIONS**

du carbonate de calcium. Il faut souligner que ces briques ne figurent pas sur la liste fournie par le groupe Aquidos et CTC_annaba, dans leur étude sur le projet de rénovation du site.

- La terre de Mila est perçue comme étant appropriée pour la fabrication de briques cuites. Toutefois, ses propriétés de gonflement qui favorisent un retrait très élevé exigent une correction appropriée de la granulométrie. Il convient de souligner qu'elle est riche en calcite, et que la terre est carbonatée. Il est donc primordial de faire preuve d'une grande précision dans le choix des dégraisseurs lors de son utilisation.

Les briques cuites contenant 20% de la poudre de marbre très fine "VFMP" ont démontré une des meilleures résistances à la compression. Les fines particules de marbre se décomposent, créant des pores fins et des minéraux de silicate de calcium, assurant ainsi une cohésion optimale.

- Par ailleurs, les briques cuites contenant 20% de la poudre de marbre fine « FMP » ont été confrontées à une réduction de la résistance et à une augmentation de la porosité, en raison de la dégradation des gros grains de calcite et des contraintes impliquées par l'hydratation et à la carbonatation du marbre.

- Le recours à 20% de limaille d'acier (SF) amélioré les performances mécaniques des briques, réduit la plasticité du mélange et le retrait, et augmente la densité. Néanmoins, la porosité et l'absorption d'eau ont également augmenté.

- Lors de la cuisson, la sciure (WS) se brûle, ce qui entraîne la formation de larges pores et réduit le nombre de connexions entre les grains d'argile. En favorisant la capacité d'absorption accrue et réduit la résistance. Par ailleurs, cela contribue considérablement la légèreté du matériau.

- Il a été confirmé par les résultats que le sable de Sigues ne peut pas servir de dégraissant en raison de la grande granulométrie de la calcite. Le broyer très finement est nécessaire pour l'adapter ;

- En outre, les concentrations de métaux lixiviés pour les différentes briques sont conformes aux normes de l'USEPA. Les quatre déchets offrent donc un potentiel intéressant pour une utilisation appropriée, durable et sécurisée en tant que matières premières dans la fabrication de briques.

- La principale conclusion de ce travail est que la limaille d'acier et la poudre de marbre très fine semblent être des déchets satisfaisants et bon marché pour la correction de la matière première argileuse fabriquer des briques cuites adaptées aux interventions de réhabilitation. La détermination du taux adéquat d'additifs et de la granulométrie optimale est essentielle pour éviter le soufflage de la chaux dans les recherches à venir. Néanmoins, pour réduire au maximum les dommages, il est recommandé de broyer finement l'argile de Mila et les additifs, et les briques cuites doivent être immédiatement immergées dans l'eau après la cuisson afin que les grains de CaO puissent être solubilisés et que la carbonatation ne se produise pas à l'intérieur.

- Les conclusions obtenues peuvent être incluses dans une base de données de déchets industriels, ce qui peut être employé dans la fabrication de masse de briques cuites. Permettant ainsi aux professionnels du domaine de sélectionner la terre et les additifs appropriés capables de produire une bonne durabilité.

**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Notre but principal dans cette étude est de présenter des briques fabriquées à partir d'une terre provenant d'un gisement de la ville de Mila, tout en incorporant des déchets industriels non toxiques abondamment disponibles dans la nature. Dans le but de les valoriser et de les utiliser dans le cadre de la réhabilitation de bâtiments anciens en maçonnerie. D'après notre expérience, l'utilisation de la poudre de marbre fine et très fine, de la limaille d'acier ou de la sciure de bois a été confirmée comme une solution écologique intéressante pour les recycler dans le secteur de la construction, en particulier dans les travaux de réhabilitation de bâtiments historiques.

Dans cette expérience, en premier lieu, la question de la sélection des matériaux de construction dans un contexte de crise environnementale est bien traitée. Afin de saisir la relation entre l'élimination des déchets et la durabilité dans le domaine de la fabrication des matériaux de construction, nous avons étudié de manière approfondie les données essentielles et indispensables. Le constat a été que les pays développés ont instauré des règles rigoureuses en adoptant une approche de sélection des matériaux renouvelables, recyclables et surtout durables, dans le but de diminuer l'empreinte écologique et de diminuer la dépendance aux ressources fossiles. On a établi que cette mobilisation à l'échelle mondiale et nationale reste cruciale pour relever ce défi environnemental, en tirant parti de l'innovation et en favorisant la recherche dans le domaine de la construction afin de produire des matériaux durables. Un processus dans lequel l'Algérie s'implique malgré les obstacles rencontrés. Un autre point crucial a été traité dans un deuxième chapitre, où les divers problèmes auxquels les maçonneries historiques peuvent être confrontées ont été mentionnés. Plusieurs techniques sont employées pour repérer les dégâts in-situ, ainsi que les solutions techniques adéquates proposées pour les réparer. Des chercheurs et des scientifiques experts ont développé des procédés et des techniques de réhabilitation, et la synthèse de leurs recommandations nous a permis de présenter notre approche basée sur la production de briques cuites à partir de terres argileuses et de déchets industriels. Cette méthode s'appuie sur un ensemble d'essais de caractérisation structurés, réalisés par des laboratoires et des centres de recherche expérimentés. Notons qu'il n'existe pas de norme et d'approche universelle, car les causes de la détérioration sont nombreuses et variées, et chaque cas est unique.

La démarche requise, l'utilisation d'une approche pluridisciplinaire qui a été développée pour réhabiliter le cadre historique du centre-ville de Skikda, en tenant compte de la complexité du processus de réhabilitation dans toutes ses dimensions. D'après les conclusions de l'expertise technique réalisée par des experts du domaine. Dans le cadre d'un diagnostic préliminaire et d'une analyse visuelle des immeubles, les principales affections qui touchent les éléments structuraux de parc bâtis ont pu être identifiées. L'humidité, le vieillissement des bâtiments, l'utilisation excessive par les utilisateurs, l'extension et l'élévation, la pollution atmosphérique et le trafic routier, les catastrophes naturelles et un manque d'entretien sont les principaux facteurs qui contribuent à la dégradation avancée des bâtiments. Cela conduit à la formation de moisissures, de végétation, de salpêtres, à la détérioration du bois, à la salissure et à la rouille profonde des solives métalliques, à la dilution des éléments constructifs et même des métaux. Bien que les différentes affections soient reconnues, mais cela ne suffit pas pour établir un diagnostic parfaitement fiable. L'étude en laboratoire était donc indispensable pour évaluer les caractéristiques et l'état des matériaux d'origine.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La connaissance de la nature du tissu d'origine s'est avérée nécessaire, et c'est dans cette perspective que nous avons orienté nos recherches pour constituer un fonds documentaire complet, réalisé en deux étapes, l'une historique et l'autre technique. Les briques cuites étudiées remontent historiquement à la période coloniale, en particulier à 1907. Elles sont fabriquées localement ou importées par la ville de Marseille. Quant au point de vue technique, les résultats des tests physico-chimiques et des analyses de comportement physiques et mécaniques, ainsi que de la DRX, de l'ATG et de la MEB, ont permis de déterminer les éléments utilisés dans la production des différentes briques anciennes briques cuites de Skikda. Les anciennes briques cuites de Skikda présentent une résistance mécanique inférieure à celle requise par la norme. On peut expliquer le résultat par la détérioration qu'elles ont subie au fil du temps. D'après l'analyse minéralogique, on a constaté la présence de mullite et d'hématite, des minéraux de néoformation qui indiquent une température de cuisson de 800 à 900 °C. Ces minéraux se forment dans des terres à faible teneur en carbonate de calcium, ce qui a été confirmé par l'essai de taux de calcination avec un taux quasiment nulle. On a utilisé les résultats et les informations obtenus lors de la préparation des briques. Les prochaines étapes consisteront à vérifier si nos choix d'addition sont justifiés et fondés.

Afin d'acquérir des matériaux compatibles de haute qualité. L'identification des quatre déchets utilisés : la poudre de marbre fine, la poudre de marbre très fine, l'email d'acier et le scieur de bois, ainsi que leur nature ont été soulignées. Les paramètres jouent un rôle important dans l'élaboration ultérieure des briques. Les mélanges des boues d'étude ont ensuite été élaborés et cinq produits ont été produits en utilisant 10% de sable dans l'argile et des proportions optimales de WS, FMP, VFMP, SF, avec des taux de substitution de 5%, 20%, 20%, 20%, 20 % respectivement, pour une température de cuisson optimale de 900°C. Les produits finaux ont été examinés et évalués. Les produits finaux ont fait l'objet d'une analyse et d'une évaluation. Des analyses compositionnelles, physiques et mécaniques, ainsi que l'analyse environnementale ont été réalisées en laboratoire afin d'étudier les réactions entre les additifs et la matière première argileuse. Le travail veut démontrer la complexité et la complémentarité des tests disponibles pour tester les briques en terres cuites destinées à la réhabilitation des sites historiques. En effet, la DRX (diffraction des rayons X) ou l'analyse thermique (DTA-TG), la spectrométrie à fluorescence X (XRF), les tests de composition minéralogique et chimique sont devenus plus accessibles et la collecte d'informations est accélérée. La méthode SEM offre également la possibilité de repérer la structure de la surface des briques. L'élaboration de mesures des propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction-compression, des propriétés physiques telles que la porosité accessible à l'eau et des propriétés hydriques telles que l'absorption par capillarité à l'échelle du laboratoire permet de mieux comprendre la nature hétérogène du matériau de brique. Une lixiviation des métaux lourds a été utilisée pour évaluer les conséquences environnementales, selon la méthode de caractérisation de la toxicité des lixiviats.

La synthèse des résultats de l'étude comparative des briques est la suivante :

- La terre de Mila est considérée comme propice à la production de briques cuites. Cependant, ses caractéristiques de gonflement qui favorisent un retrait très élevé nécessitent une correction adéquate. Il est important de noter qu'elle est riche en calcite. La sélection des dégraisseurs lors de leur utilisation nécessite donc une grande précision.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

- La résistance à la compression des briques cuites avec 20% de la poudre de marbre très fine "VFMP" a été améliorée. La décomposition des fines particules de marbre entraîne la formation de pores fins et de minéraux de silicate de calcium, garantissant ainsi une cohésion optimale. D'autre part, la résistance et la porosité des briques cuites contenant 20% de la poudre de marbre fine « FMP » ont baissé en raison de la détérioration des gros grains de calcite et des contraintes liées à l'hydratation et à la carbonatation du marbre.

Le recours à 20% de limaille d'acier (SF), améliore les caractéristiques mécaniques des briques, diminue la plasticité du mélange et le retrait, et accroît la densité. Néanmoins, la porosité et la pénétration d'eau ont également connu une augmentation. Quant aux briques avec (WS), en cuisson, la sciure (WS) se brûle, en créant de larges pores et diminue le nombre de liens entre les grains d'argile. En augmentant la capacité d'absorption et en diminuant la résistance. Par ailleurs, cela favorise considérablement la légèreté du matériau. Les résultats ont également démontré que le sable de Sigus ne pouvait pas servir de dégraissant en raison de la grande granulométrie de la calcite. Le broyer très finement est nécessaire pour l'adapter.

- Par ailleurs, les niveaux de métaux lixiviés pour les diverses briques respectent les normes de l'USEPA. Les quatre déchets présentent donc une opportunité intéressante pour une utilisation adéquate, durable et sûre en tant que matières premières dans la production de briques.

- Il ressort principalement de cette étude que les copeaux d'acier et la poudre de marbre très fine semblent être des déchets satisfaisants et abordables pour corriger la matière première argileuse et produire des briques cuites adaptées aux travaux de réhabilitation. Il est indispensable de déterminer le taux approprié d'additifs et la granulométrie idéale afin d'éviter le soufflage de la chaux lors des futures recherches. Néanmoins, il est important de procéder à un broyage minutieux de l'argile de Mila et des additifs pour prévenir les dommages, et les briques cuites doivent être immédiatement immergées dans l'eau après la cuisson afin que les grains de CaO puissent être solubilisés et éviter la carbonatation à l'intérieur.

Donc au final, on peut dire que, l'objectif principal de notre recherche était de discuter des alternatives aux briques d'argile pour les activités de construction à l'échelle nationale et notamment dans la région de l'est Algérien. Sur la base d'observations et d'apprentissages, il s'avère que la méthode traditionnelle de fabrication de briques d'argile est répandue dans le monde entier. Cependant, la pratique de production constitue une menace pour notre écosystème. Ce travail vise à attirer l'attention de nombreux chercheurs et scientifiques sur les changements environnementaux croissants à l'échelle mondiale. Veiller à ce que toutes les briqueteries d'argile passent progressivement d'une approche traditionnelle à une approche plus durable impliquera de nombreux efforts consolidés aux niveaux régional, national et international. Des processus et des initiatives sont obligatoires pour fournir l'avantage fondamental pour utiliser des déchets tels que les déchets de marbre, sable, d'acier et de bois, dans la fabrication de briques. La recherche associée à une nouvelle technologie pour les briques de construction contenant une teneur importante en déchets industriels non-toxique peut être une alternative réussie aux briques d'argile traditionnelles. Une utilisation appropriée de ces déchets dans la fabrication de briques peut résoudre avec succès les problèmes environnementaux associés aux briques d'argile. Une réflexion urgente avec des actions étudiées est nécessaire pour une modernisation fondamentale de l'industrie des briques, en particulier dans la région de l'Afrique. En tant que priorité de développement, les gouvernements doivent lancer des projets de modernisation des start-ups de fabrication de

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

briques dans leurs politiques. Les matériaux de construction respectueux de l'environnement tels que les briques à base de l'émail d'acier et de la sciure de bois consommeront un minimum d'énergie, causeront une pollution négligeable et posséderont des attributs de recyclage à multiples facettes menant à de meilleures opportunités. Les briques à base de la poudre de marbre aideront à consolider des ressources cohérentes, une meilleure protection de la surveillance environnementale et une production plus propre. Les briques à base des déchets non-toxiques sont la forme renouvelée des procédures de fabrication de briques des temps anciens. Étant donné la capacité considérable des briques de marbre à absorber l'eau, il est prévu de les utiliser pour la construction dans les régions aride où le taux d'humidité dans l'air est relativement faible, ou où les briques sont protégées contre l'humidité. La substitution partielle de l'argile par des déchets de poudre de marbre dans la fabrication de briques présente des avantages, car l'intégration de la poudre de marbre réduit le prix des briques, ce qui a un effet direct sur les dépenses du projet. Cette étude suggère que l'argile soit remplacée par moins de 20 % de déchets de poudre de marbre, ce qui permet de réduire le prix des briques, à condition que l'argile soit dépourvue de calcite.

Enfin, les progrès scientifiques offrent aux spécialistes de la conservation et aux restaurateurs la possibilité de concevoir de nouveaux matériaux de meilleure qualité. Les briques indigènes des bâtiments anciens sont donc de plus en plus adaptées aux matériaux de nouvelle génération.

PERSPECTIVES:

De surcroît, il est nécessaire d'étaler les recherches sur ces quatre déchets et cette terre en ce qui concerne les pourcentages de substitution afin d'obtenir des briques compatibles sur le plan mécanique tout en minimisant les dommages. Il serait pertinent d'envisager les perspectives suivantes pour compléter de façon significative cette étude :

- L'incorporation des additifs de manière aléatoire et non étudiée présente davantage d'inconvénients que d'avantages, et il est essentiel de procéder systématiquement des analyses approfondies du sol et des stabilisants dès le départ et avant de passer à la production.
- Malgré le potentiel satisfaisant des quatre déchets, tels que la poudre de marbre fine et l'émail d'acier, pour améliorer les comportements mécaniques des briques en terre cuite, il n'a pas été possible de conquérir leur compatibilité avec l'ancienne brique. Le processus demeure difficile à accomplir et il faut effectuer plusieurs variantes avec des pourcentages différents afin de surveiller les pourcentages d'addition et d'obtenir des résistances appropriées. La quantité de poudre de marbre dans l'argile cuite doit être équilibrée avec la température de cuisson la plus adéquate, que ce soit pour le déchet de bois ou la poudre de marbre, pour éviter la densification de la chaux vive ou la combustion du déchet de bois, qui remettent en question la qualité du produit fini.
- Il est parfois possible d'améliorer l'état des briques en utilisant des gestes barrières simples. En prenant soin de l'endroit de prélèvement, en évitant au maximum les zones à forte salinité. Il est recommandé de tremper la quantité de terre à utiliser dans de l'eau pure pendant quelques jours avant l'utilisation. L'immersion totale des briques dans l'eau, de 50 C° jusqu'à refroidissement, devrait être une pratique courante pour éteindre complètement la chaux vive et détruire et écraser les grains de chaux lors du processus de rétrécissement.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

- D'autres approches de recherche peuvent être mises en place afin d'améliorer leurs performances en les combinant avec d'autres matériaux, afin de trouver une alternative aux déchets industriels qui diminue les coûts de la fabrication de briques et de la réalisation des routes. Offre d'emplois aux petites et moyennes entreprises qui participeront à la livraison de ces déchets à l'industrie.
- Les résultats tirés peuvent être intégrés dans une base de données de déchets industriels, ce qui peut être utilisé pour la production de masse de briques cuites. Cela permet aux experts du secteur de choisir la terre et les additifs adéquats qui garantissent une durabilité optimale.
- Vu la capacité importante d'absorption d'eau des briques de marbre, on prévoit leur utilisation pour construction dans les régions arides dont le taux d'humidité dans l'air est relativement bas où les briques sont protégées contre l'humidité. L'utilisation de déchets de poudre de marbre en remplacement partiel de l'argile dans la fabrication de briques est rentable, car le coût des briques diminue avec l'inclusion du marbre poudre, qui a une influence directe sur les coûts du projet. Cette étude suggère d'utiliser moins que 20 % de déchets de poudre de marbre comme substitut d'argile, ce qui réduit le coût des briques, dans la condition que l'argile soit pauvre en calcite.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abo Lila M, & Madkour M. (2018). Restoration Towards Sustainable Green Heritage Buildings, Case Study: Mansoura Opera House, Mansoura, Egypt. *الدورية العلمية لكلية الفنون الجميلة*. 6(1): 22-40. ISSN: 2535-227x.

Achik M, Benmoussa H, Oulmekki A, Ijjaali M, El Moudden N, Touache A, & Kizinievic O. (2021). Evaluation of technological properties of fired clay bricks containing pyrrhotite ash. *Construction and Building Materials*. 269: 121312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121312>.

Achik M, Benmoussa H, Oulmekki A, Ijjaali M, Moudden NEL, Kizinievic O, & Kizinievic V. (2019, May). Evaluation of physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating both mineral and organic wastes. In the Proceedings of the 13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” (MBMST 2019). <https://doi.org/10.3846/mbmst.2019.004>.

Adams C, Douglas-Jones R, Green A, Lewis Q, & Yarrow T. (2014). Building with history: exploring the relationship between heritage and energy in institutionally managed buildings. *The Historic Environment: Policy & Practice*. 5(2) : 167-181. <https://doi.org/10.1179/1756750514Z.000000000053>.

Adediran AA, Akinwande A, Balogun AO, Adesina OS, & Olayanju TM A. (2021). Experimental study on the mechanical behaviour of fired sand-clay and glass powder-claybricks. *Acta Metallurgica Slovaca*. 27(1): 4-10. <https://eprints.lmu.edu.ng/id/eprint/2907>.

Ahmad AG, & Rahman HFA. (2010). Treatment of salt attack and rising damp in heritage buildings in Penang, Malaysia. *Journal of Construction in Developing Countries*. 15(1) : 93-113.

Ahmad S, Hassan Shah MU, Ullah A, Shah SN, Rehan MS, Khan IA, & Ahmad MI. (2021). Sustainable Use of Marble Waste in Industrial Production of Fired Clay Bricks and Its Employment for Treatment of Flue Gases. *ACS omega*. 6 (35): 22559-22569. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02279>.

أحمد حسين أبو الهيجاء. (2011). أساليب ومعايير حماية التراث العمراني والمعماري . دراسات و خبرات تطبيقية. أحمد حسين أبو الهيجاء. منشورات جامعة فيلادلفيا. عمادة البحث العلمي والدراسات العليا.

Ahmari S, & Zhang L. (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Construction and building materials*. 29 : 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.048>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Akande OK, Odeleye D, Coday A, & JimenezBescos C. (2016). Performance evaluation of operational energy use in refurbishment, reuse, and conservation of heritage buildings for optimum sustainability. *Frontiers of Architectural Research*. 5(3) : 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.06.002>.

Akhtar MN, Bani-Hani KA, Akhtar JN, Khan RA, Nejem JK, & Zaidi K. (2022). Flyash-based bricks: an environmental savior—a critical review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 24(5): 1663-1678. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01436-3>.

Alabduljabbar H, Benjeddou O, Soussi C, Khadimallah MA, & Alyousef R. (2021). Effects of incorporating wood sawdust on the firing program and the physical and mechanical properties of fired clay bricks. *Journal of Building Engineering*. 35 : 102106. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102106>.

Alfano G, Chiancarella C, Cirillo E, Fato I, & Martellotta F. (2006). Long-term performance of chemical damp-proof courses: twelve years of laboratory testing. *Building and Environment*. 41(8) : 1060-1069. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.017>.

Allache AAEM, & Amiar T. (2022). Un éco-quartier à Tizi Ouzou, le premier pas vers une ville durable (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri). <https://dspace.ummtto.dz/handle/ummtto/18219>.

Allegretta I, Pinto D, & Eramo G. (2016). Effects of grain size on the reactivity of limestone temper in a kaolinitic clay. *Applied Clay Science*. 126: 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.020>.

Alonso-Santurde R, Andrés A, Viguri JR, Raimondo M, Guarini G, Zanelli C, & Dondi M. (2011). Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Journal of Environmental Management*. 92(3): 994-1002. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.004>.

Alonso-Santurde R, Coz A, Viguri JR, & Andrés A. (2012). Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks. *Construction and Building Materials*. 27(1) : 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.022>.

Alviset L. (1987). Matériaux de terre cuite: Données numériques. *Techniques de l'ingénieur. Construction, (C906), C906-1*. ISSN: 0245-9590.

Andreola F, Barbieri L, Lancellotti I, Leonelli C, & Manfredini T. (2016). Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. *Ceramics International*. 42(12) :13333-13338. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.205>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aneke FI, & Awuzie B. (2018). Conversion of industrial wastes into marginal construction materials. *Acta Structilia*. 25(2) : 119-137. <https://www.ajol.info/index.php/actas/article/view/180642> (consulté le 4 octobre 2024).

Araszkiewicz, K. (2012). Innowacje ekologiczne a konkurencyjność gospodarki regionu. Praca doktorska. Poznań: Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu.

Arrache KI. (2015). Un cycle complet de hautes études de management. *Madinati* n° 00. Décembre 2015. Ed. A.T.P. ISSN n° 2477-9849.

Assia Z, Fazia F, & Abdelmadjid H. (2019). Sustainability of the stabilized earth blocs under chemicals attack's effects and environmental conditions. *Construction and Building Materials*. 212 : 787-798. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.324>.

Association Française de Normalisation (AFNOR). (2011). NR EN 771-1/CN : Société Algérienne de Fabrication de Céramiques et Produits Rouges, SARL.S.A.F.C.E.R, Zone industrielle. 15: 12008. Sétif. Algérie.

ASTM International. (2014). ASTM C67/C67M-21: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. ASTM International: West Conshohocken. PA. USA.

Athmania D, Benaissa A, & Bouassida M. (2009). Propriétés minéralogiques des argiles gonflantes de la wilaya de Mila. Colloque international Sol Non Saturés et Environnement. 27. Tlemcen-Algérie.

Attar G. Architectural Conservation Technology. Materials Conservation. Publishing, Ottawa, Ont. Canada K1 A 0S9. (1994).

Ayodele AL, Oketope OM, & Olatunde OS. (2019). Effect of sawdust ash and eggshell ash on selected engineering properties of lateralized bricks for low cost housing. *Nigerian Journal of Technology*. 38(2) : 278-282. 10.4314/njt.v38i2.1.

Azil C, Djebri B, Fratini F, Misseri G, & Rovero L. (2022). Desert rose stone constructions covered with domes in the Souf Region (Algeria). *International Journal of Architectural Heritage*. 16(4): 577-596. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1813353>.

B

Baglioni E, Fratini F, & Rovero L. (2016). The characteristics of the earthen materials of the Drâa valley's architecture. *J. Mater. Environ, Sci*. 7 (1): 3538-3547. <https://doi.org/10.3390/su131810214>.

Baldehyrou-Bailly A. (2003). Etude expérimentale et modélisation de la stabilité des phyllosilicates soumis à un fort gradient thermique. Test dans le contexte du site

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

géothermique de Soultz-sous-Forêts (Doctoral dissertation, Université Louis Pasteur-Strasbourg I). (tel-00009986).

Balogun OA, Akinwande AA, Adediran AA, Ikubanni PP, Shittu SA, & Adesina OS. (2021). Experimental study on the properties of fired sand–clay ceramic products for masonry applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 33(2): 04020445. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003532](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003532).

Banchelli A, Fratini F, Germani M, Malesani PG, & Manganelli Del Fa C. (1997). The sandstones of Florentine historic buildings: individuation of the marker and determination of the supply quarries of the rocks used in some Florentine monuments. *Science and Technology for Cultural Heritage*. 6(1) : 13-22.

Basegi T, Berutti F, Bernardes A, & Bergmann CP. (2002). Environmental and technical aspects of the utilisation of tannery sludge as a raw material for clay products. *Journal of the European ceramic Society*. 22(13): 2251-2259. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00024-9).

Belhadj MZ. (2017). Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la Wilaya de Skikda (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra). <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/2957>.

Belkadi AA, Aggoun S, Amouri C, Geuttala A, & Houari H. (2018). Effect of vegetable and synthetic fibers on mechanical performance and durability of Metakaolin-based mortars. *Journal of adhesion science and Technology*. 32(15) : 1670-1686. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1442647>.

Berthaud Y. et al. (2013). Aide –mémoire de Mécanique des Sols. Belgique. 2e édition Belgique.352 p.68. ISBN 978-2-10-070107-0.

Bertrand L. (2016). Histoire de Philippeville: 1838-1903. Collection XIX. Réguis : 18. France.1903. P.89.

Bhushan B, Grover U, John S, & Kanwar VS. (2020). Feasibility of Using Paper Industry Sludge Containing Calcium Carbonate in Manufacturing Bricks. In *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering: Select Proceedings of TRACE 2018* (pp. 15-27). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7480-7_2.

Binda L, Saisi A, & Tiraboschi C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building materials*. 14(4) : 199-233. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00018-0).

Binici H, Aksogan O, Bodur MN, Akca E, & Kapur S. (2007). Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. *Construction and Building materials*, 21(4), 901-906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Blanck G. (2013). Utilisation de produits non traditionnels pour le traitement des matériaux de terrassement: impact sur les propriétés géotechniques et bilan environnemental (Doctoral dissertation, Université de Lorraine). (tel-01750118).

Blocken B, & Carmeliet J. (2010). Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory. *Building and Environment*. 45(3): 691-703. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.007>.

Böke H, Akkurt S, İpekoğlu B, & Uğurlu E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. *Cement and Concrete Research*. 36(6): 1115-1122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.011>.

Boltakova N V, Faseeva G R, Kabirov R R, Nafikov R M, & Zakharov Y A. (2017). Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015. *Waste management*. 60: 230-246. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.008>.

Bories C, Borredon ME, Vedrenne E, & Vilarem G. (2014). Développement de briques en terre cuite poreuses respectueuses de l'environnement utilisant des agents porogènes : une revue. *Journal of environmental management*. 143 : 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.006>.

Bories C. (2015). Etude des caractéristiques d'un porogène d'origine biosourcée et mécanismes mis en oeuvre pour l'obtention d'une brique de construction micro-poreuse à haute performance thermique et mécanique (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT). (tel-04230742).

Borri A, Castori G, & Corradi M. (2013). Masonry confinement using steel cords. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 25(12): 1910-1919. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000753](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000753).

Bortali M, Rabouli M, Yessari M, & Hajjaji A. (2023). Assessment of harbor sediment contamination for a path to valorize dredged material. *Arabian Journal of Chemistry*. 16(11): 105208. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105208>.

Bouabdallah MA, Hamou K, & Bouabdallah A. (2008). Les vieux bâtis entre la réhabilitation et le recyclage. Conférence nationale « Gestion & traitement des déchets solides » Skikda, Les 04 & 05 juin 2008 « GTDS JME'08 ».

Bouabdesselam H, Liazid A, & Bouzidi Y. (2005). La politique environnementale en Algérie: Réalités et perspectives. *Environnement, Ingénierie & Développement*.

Boubellouta F, Guernane S. (2002). Caractérisation des propriétés climatiques et leur impact sur les ressources et les potentialités hydrauliques dans la Wilaya de

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Skikda. Diplôme de Master en Aménagement Hydro-agricole. Université 20 Aout 1955 Skikda.

Boubekeur S, Rigassi V, et al. (2022). Blocs de terre comprimée, Procédures d'essais, Bruxelles : CDE, ENTPE, CRATerre-EAG.121. Belgique. ISBN. 2-906901-27-X.

Boulaksa L. (2022). Evaluation de l'état de l'environnement dans la ville de Skikda, et le défi prévu sur le développement durable face à la croissance urbaine. ISSN 1112-9255/E-ISSN 2588-2414.

Brás A, Valença A, & Faria P. (2017). Performance-based methods for masonry building rehabilitation using innovative leaching and hygrothermal risk analyses. *Sustainable Cities and Society*. 28: 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.010>.

Brol J, Dawczy S, & Adamczyk K. (2015, September). Possibilities of timber structural members reuse. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Wroclaw. Poland (pp. 9-11).

Brongniart A. (1844). Traité des arts céramiques: ou des poteries, considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie (Vol. 2). Béchét jeune.

Brunet M, Gontier C, et al. (2010). Région Provence-Alpes-Côte d'Azur-Inventaire général direction Culture et Patrimoine - Service de l'Inventaire général du patrimoine culturel. Marseille 16e arrondissement L'Estaque. <https://www.pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/IA13001470>.

Bruno AW, Gallipoli D, Perlot-Bascoules C, Mendes J, & Salmon N. (2015, May). Briques de terre crue: procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques. In *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. (hal-01167676).

Butt WA, Gupta K, & Jha JN. (2016). Strength behavior of clayey soil stabilized with saw dust ash. *International Journal of Geo-Engineering*. 7: 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0032-9>.

C

Cabane N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation (Doctoral dissertation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne). (tel-00010521).

Călătan G, Hegyi A, Grebenisan E, & Mircea AC. (2020, December). Possibilities of Recovery of Industrial Waste and by-Products in Adobe-Brick-Type Masonry Elements. In *Proceedings*. 63, (1): 1. MDPI. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063001>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Camuffo D. (1986). Deterioration processes of historical monuments. In *Studies in Environmental Science*. (Vol. 30, pp. 189-221). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70884-7](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70884-7).

Camuffo D. (1995). Physical weathering of stones. *Science of the total environment*. 167 (1-3): 1-14. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04565-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04565-1).

Cangussu N, Vasconcelos L, & Maia L. (2023). Environmental benefits of using sewage sludge in the production of ceramic bricks. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(10) : 25344-25355. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18670-9>.

Cantin R, Burgholzer J, Guarracino G, Moujalled B, Tamelikecht S, & Royet BG. (2010). Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France. *Building and Environment*. 45(2) : 473-484. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.010>.

Cardiano P, Ioppolo S, De Stefano C, Pettignano A, Sergi S, & Piraino P. (2004). Study and characterization of the ancient bricks of monastery of “San Filippo di Fragalà” in Frazzandò (Sicily). *Analytica Chimica Acta*. 519(1): 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.05.042>.

Carretero MI, Dondi M, Fabbri B, & Raimondo M. (2002). The influence of shaping and firing technology on ceramic properties of calcareous and non-calcareous illitic-chloritic clays. *Applied Clay Science*. 20(6): 301-306. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00076-X).

Cessari L, & Gigliarelli E. (2012). Heritage-led eco-regeneration: The case of Zhejiang water towns protection, restoration and preservation. In *Progress in Cultural Heritage Preservation: 4th International Conference, EuroMed 2012, Limassol, Cyprus, October 29–November 3, 2012. Proceedings 4* (pp. 369-377). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_37.

Chan CM. (2011). Effect of natural fibres inclusion in clay bricks: Physico-mechanical properties. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 5(1) : 7-13.

Chanda D. (2016). A Study on Socio Demographic & Health Condition of Brick Field Workers in Different Areas of Bangladesh (Doctoral dissertation, East West University). <http://dspace.ewubd.edu/handle/2525/1995>.

Charola AE. (2000). Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American institute for conservation*. 39(3) : 327-343. <https://doi.org/10.1179/019713600806113176>.

Cherian C, Siddiqua S, & Arnepalli DN. (2022). Utilization of recycled industrial solid wastes as building materials in sustainable construction. In *Advances in Sustainable*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Materials and Resilient Infrastructure (pp. 61-75). Singapore: Springer Singapore. ISBN 978-981-16-9744-9

Chien SC, Ou CY, & Lee YC. (2010). A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement. *Applied clay science*. 50(4) : 481-492. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.014>.

CLIMAmur. NF EN 771-1 et NF EN 998-2. (2017). CSTB. Wall made of clay masonry units. Société Wienerberger. 8 Rue du Canal Achenheim FR-67087 Strasbourg Cedex 2, (2017). www.ccfat.fr.

Cojean R. (2017). Retrait et gonflement des argiles: Caractériser un site pour la construction, Guide 1. hal-01649113.

Coletti C, Cultrone G, Maritan L, & Mazzoli C. (2016). How to face the new industrial challenge of compatible, sustainable brick production: Study of various types of commercially available bricks. *Applied Clay Science*. 124: 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.014>.

Corradi M, Borri A, Poverello E, & Castori G. (2017). The use of transverse connectors as reinforcement of multi-leaf walls. *Materials and Structures*. 50: 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0977-3>.

Corradi M, Di Schino A, Borri A, & Rufini R. (2018). A review of the use of stainless steel for masonry repair and reinforcement. *Construction and Building Materials*. 181 : 335-346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.034>.

Crawley D, & Aho I. (1999). Building environmental assessment methods: applications and development trends. *Building Research & Information*. 27(4-5): 300-308. <https://doi.org/10.1080/096132199369417>.

CTC Algérie et BET AQUIDOS Espagne. (2015). Rapport sur l'opération de réhabilitation du vieux bâti de la ville de Skikda. 2015.

CTC Est. (Avril 2012). Expertise ville de Skikda Constantine. Organisme National de Contrôle Technique de la Construction de l'Est CTC Est. Avril 2012.

CTTB. (1998) . Tuiles et briques de terre cuite, caractéristiques, mise en œuvre et solutions pour le bâtiment, le Moniteur. 231. Paris. ISBN: 978-2-281-11181-1.

Cultrone G, Sebastian E, & De la Torre MJ. (2005). Mineralogical and physical behaviour of solid bricks with additives. *Construction and Building Materials*. 19(1) : 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.035>.

Cultrone G, Sebastián E, Elert K, De la Torre MJ, Cazalla O, & Rodríguez-Navarro C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Journal of the European Ceramic society. 24(3): 547-564. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8).

Cultrone G, Sidraba I, & Sebastián E. (2005). Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the “Triangul Bastion”. Riga (Latvia). *Applied clay science*. 28 (1-4): 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.02.005>.

Cusidó JA, Cremades LV, Soriano C, & Devant M. (2015). Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Ten years of industrial experience. *Applied Clay Science*. 108, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.027>.

D

Dai Z, Wu Y, Hu L, Zhang W, & Mao L. (2019). Evaluating physical-mechanical properties and long periods environmental risk of fired clay bricks incorporated with electroplating sludge. *Construction and Building Materials*. 227 : 116716. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116716>.

Darweesh HHM. (2021). Light Weight Clay Bricks in Combination of Sludge Blended with Agro/Wastes. *Journal of Biomaterials*. 5 (2): 16-22. <https://doi.org/10.11648/j.jb.20210502.11>.

Das S, & Sarkar R. (2020). Impact of brickfields on soil quality of agricultural land along the Bhagirathi-Hugli river basin, West Bengal, India. *Spatial Information Research*. 28 : 405-418. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00304-x>.

Daumalin X. (2021). Les tuileries du bassin de Séon. Marseille: la revue culturelle de la ville de Marseille. 269 : 49-52. <https://amu.hal.science/hal-03573097v1>.

De Bonis A, Cultrone G, Grifa C, Langella A, & Morra V. (2014). Clays from the Bay of Naples (Italy): New insight on ancient and traditional ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 34(13): 3229-3244. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.04.014>.

De Gregorio S, Laurini E, & De Vita M. (2023). Circular Process for Sustainable On-Site Management of Valuable Materials in the Rehabilitation of the Built Heritage. *Heritage*. 6 (5) : 4086-4101. <https://doi.org/10.3390/heritage6050215>.

Décret exécutif n° 06-104 : du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets.

Dekhili S, & Achabou M A. (2013). Pertinence d’une double labellisation biologique/écologique auprès des consommateurs: Une application au cas des œufs. *Économie rurale*. (4) : 41-59.

Delot P. (2015). Les adobes. Production et mise en œuvre. Cavaillon Cedex. Association le village. associationlevillage@wanadoo.fr.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Demir I, Baspınar MS, & Orhan M. (2005). Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Building and environment*. 40(11) : 1533-1537. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.021>.

Dhanapandian S, Manoharan C, Ramkumar T, Gnanavel B, Sutharsan P, & Shanthi M. (2010). Effect of incorporation of granite and marble rejects in clay brick products: physico-mechanical analysis. *Acta Physica Polonica A*. 118(4): 688-695.

Di Maio C, Santoli L, & Schiavone P. (2004). Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mechanics of materials*, 36(5-6), 435-451. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(03\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(03)00070-X).

Di Tullio V, Proietti N, Gentile G, Giani E, Poggi D, & Capitani D. (2012). Unilateral NMR: a noninvasive tool for monitoring in situ the effectiveness of intervention to reduce the capillary raise of water in an ancient deteriorated wall painting. *International Journal of Spectroscopy*. 2012(1) : 494301. <https://doi.org/10.1155/2012/494301>.

Di Turo F, Matricardi P, Di Meo C, Mazzei F, Favero G, & Zane D. (2019). PVA hydrogel as polymer electrolyte for electrochemical impedance analysis on archaeological metals. *Journal of Cultural Heritage*. 37 : 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.017>.

Diar-el-djenane, Ecoquartier. <https://www.lesommer.fr/art-138-2-37-fr/ecoquartier-diar-el-djenane.html>.

Direction de L'urbanisme et de la construction. (2016). Point de Situation vieux Batis. Ville de Skikda. Octobre 2016.

Dişli G, & Ankaralıgil B. (2023). Circular economy in the heritage conservation sector: An analysis of circularity degree in existing buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 56 :103126. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103126>.

Djemaci, B. (2012). La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité (Doctoral dissertation, Université de Rouen). <https://theses.hal.science/tel-00804063>.

Dobrzański, G. (1999). Istota i cechy współczesnego kryzysu ekologicznego. *Ekonomia i Środowisko*, (1) : 7-20. ISSN : 0867-8898.

Dolce M, Ponzo FC, Di Croce M, Moroni C, Giordano F, Nigro D, & Marnetto R. (2009). Experimental assessment of the CAM and DIS-CAM systems for the seismic upgrading of monumental masonry buildings. *Proceedings of the PROHITECH*. 9.

Dominguez EA, & Ullman R. (1996). 'Ecological bricks' made with clays and steel dust pollutants. *Applied Clay Science*. 11(2-4) : 237-249. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(96\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00020-8).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Dondi M, Marsigli M, & Fabbri B. (1997). Recycling of industrial and urban wastes in brick production: a review (Part 2). *Tile & Brick International*. 13(4) : 302-315. ISSN : 0938-9806.

Dondi M. (1997). Recycling of industrial and urban wastes in brick production-a review. *Tile Brick Int*. 13: 218-225.

Dos Reis GS, Cazacliu BG, Cothenet A, Poullain P, Wilhelm M, Sampaio CH, & Torrenti JM. (2020). Fabrication, microstructure, and properties of fired clay bricks using construction and demolition waste sludge as the main additive. *Journal of cleaner production*. 258: 120733. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120733>.

Dreyer J. (2005). Thermal treatment of moisture damaged construction (Vol. 83). WIT press. <https://doi.org/10.2495/STR050451>.

Dubale M, Vasić MV, Goel G, Kalamdhad A, & Laishram B. (2024). The recycling of demolition roof tile waste as a resource in the manufacturing of fired bricks: A scale-up to the industry. *Construction and Building Materials*. 412: 134727. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134727>.

Dubale M, Vasić MV, Goel G, Kalamdhad A, & Laishram B. (2024). The recycling of demolition roof tile waste as a resource in the manufacturing of fired bricks: A scale-up to the industry. *Construction and Building Materials*. 412: 134727. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134727>.

Dukuzg A. (1990). Technologies utilisées dans la fabrication des briques de terre cuite et caractérisation minéralogique de quelques argiles rwandaises.

E

ECO-ARQ. Guide méthodologique pour l'éco-réhabilitation du patrimoine bâti, dans le Sud Ouest européen. www.eco-arq.eu.

Edouard S. (1900). Philippe ville et sa région 1837-1870. Alger : La maison des livres Alger. 1900 .P.149.

El Ouahabi M, Daoudi L, Hatert F, & Fagel N. (2015). Modified mineral phases during clay ceramic firing. *Clays and Clay Minerals*. 63(5): 404-413. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2015.0630506>.

Elahi TE, Shahriar AR, Alam MK, & Abedin MZ. (2020). Effectiveness of saw dust ash and cement for fabrication of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*. 259: 120568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120568>.

Elert K, Cultrone G, Navarro CR, & Pardo ES. (2003). Durability of bricks used in the conservation of historic buildings—influence of composition and

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

microstructure. *Journal of Cultural Heritage*, 4(2), 91-99. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00020-7).

Erkman, S. (2004). Vers une écologie industrielle. ECLM.137.

European Commission. (2022). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Packaging and Packaging Waste, Amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and Repealing Directive 94/62/EC. EC: COM (2022), 677.

F

Fabrizi B, Gualtieri S, & Shoal S. (2014). The presence of calcite in archeological ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 34(7) : 1899-1911. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.007>.

Fabrizi B. (2012). Science and conservation for museum collections. Nardini Editore. Alcuni titoli in libreria e presso la casa editrice. Per ordini e informazioni: info@nardinieditore.it; www.nardinieditore.it.

Fgaier El F. (2013). Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue, Diss, Ecole centrale de Lille. (2013). (tel-01242549).

Fidanza MR, & Caneva G. (2019). Natural biocides for the conservation of stone cultural heritage: A review. *Journal of cultural heritage*. 38 : 271-286. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.01.005>.

Fodde E, & Khan M S. (2010). Moenjodaro: a world heritage site at risk. *The Historic Environment: Policy & Practice*. 1(1) : 52-69. <https://doi.org/10.1179/175675010X12662480109036>.

Folaranmi J. (2009). Effect of additives on the thermal conductivity of clay. *Leonardo Journal of Sciences*. 14 : 74-77. ISSN 1583-0233.

Franzoni E, & Sassoni E. (2011). Correlation between microstructural characteristics and weight loss of natural stones exposed to simulated acid rain. *Science of the total environment*. 412 : 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.080>.

Franzoni E. (2014). Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. *Construction and Building materials*. 54 : 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054>.

Fratini F, Resic S, Rovero L, & Tonietti U. (2009). The earth salt architecture of middle age in the Siwa oasis, Egypt. In 1° Conferenza mediterranea sull'architettura in terra cruda (pp. 481-493). Edicom Edizioni. <https://hdl.handle.net/2158/359815>.

French Standardization Association (AFNOR). (1990). NF. P 18-560: Granulats. Aggregates. Particle size distribution by sieving.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

French Standardization Association (AFNOR). (1990). NF. P 18-560: Granulats. Aggregates. Particle size distribution by sieving.

French Standardization Association (AFNOR). (1993). NF.P94-051: Soils. Investigation and Testing. Determination of Atterberg Limits . Liquid Limit Test Using Casagrande Apparatus. Plastic Limit Test on Rolled Thread.

French Standardization Association (AFNOR). (1996). NF P94-048: Soil: investigation and testing. Determination of the carbonate content. Calcimeter method.

French Standardization Association (AFNOR). (1998). Afnor. XP P94-047: Soils. investigation and testing. Determination of the organic matter content. Ignition method.

French Standardization Association (AFNOR). (1998). NF EN 1744-1: Tests for chemical properties of aggregates. Part 1: Chemical analysis.

French Standardization Association (AFNOR). (1998). NF P.94-068: Sol. Investigation and testing. Measuring of the methylene blue adsorption capacity of a rocky soil. Determination of the methylene blue of a soil by means of the stain test.

French Standardization Association (AFNOR). (1999). NF ENP. 933-9: Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines . Methylene blue test.

French Standardization Association (AFNOR). (1999). NF.933-8: Tests for geometrical properties of aggregates. assessment of fines. Part 8: Sand equivalent test.

French Standardization Association (AFNOR). (2005). Afnor. XP CEN ISO/TS 17892-1: Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 1: Determination of water content.

French Standardization Association (AFNOR). (2005). Afnor. NF XP CEN ISO/TS 17892-3: Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 3: Determination of particle density Pycnometer method.

French Standardization Association (AFNOR). (2005). XP CEN ISO/TS 17892-4: Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 4: Determination of particle size distribution.

French Standardization Association (AFNOR). (2005). XP CEN ISO/TS17892-12: Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 12: Determination of Atterberg limits.

French Standardization Association (AFNOR). (2014). NF P94-093-17: Soils. Investigation and testing. Determination of the compaction test reference values of a soil type. Standard proctor test. Modified proctor.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

French Standardization Association (AFNOR). (2015). Afnor. NF EN 771-1+A1/CN: Specifications for masonry units. Part 1 : Clay masonry units. National addition.

French Standardization Association (AFNOR). (2017). NF EN 771-1 and NF EN 998-2: Wall made of clay masonry units. Société Wienerberger, CLIMAmur CSTB, Canal Achenheim FR-67087 Strasbourg Cedex 2. www.ccfat.fr.

French Standardization Association (AFNOR). P94-202, XP. (1995). Soils: Recognition and testing. Sampling of soils and rocks. Process and Methodology.

G

G. Attar. (1994). Technologie de conservation architecturale. Conservation des matériaux. Éd. Ottawa, Ont. Canada Kl A 0S9. (1994). ISSN 0-660-93921-5.

García LCH, Monteiro SN, & Lopera HAC. (2024). Recycling Clay Waste from Excavation, Demolition, and Construction: Trends and Challenges. Sustainability. 16(14) : 1-20. <https://doi.org/10.3390/su16146265>.

Garrity SW. (2010). The rehabilitation of a Victorian clay brick railway viaduct. In Proceedings of the 8th International Conference on Short and Medium Span Bridges. Canadian Society for Civil Engineering.

Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NM, & Hultink E J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm. Journal of cleaner production. 143: 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

Gentilini C, Franzoni, E, Bandini S, & Nobile L. (2012). Effect of salt crystallisation on the shear behaviour of masonry walls: an experimental study. Construction and Building Materials. 37: 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.086>.

Géologues. (2002). Revue Officielle de l'union française des géologues. (132). Mars 2002. ISSN 0016.7916.

Girard M-C, al, et. (2005). Sols et environnement. Paris. Compus sols et Environnement. Ed. DINOD.N. 7142. pp.804 p.38. ISSN : 2100055208.

Girard MC, Schwartz C, & Jabiol B. (2011). Etude des sols: description, cartographie, utilisation. Dunod.

Goel G, Vasić MV, Katiyar NK, Kirthika SK, Pezo M, & Dinakar P. (2021). Potential pathway for recycling of the paper mill sludge compost for brick making. Construction and Building Materials. 278 : 122384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122384>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Görhan G, & Şimşek O. (2013). Porous clay bricks manufactured with rice husks. *Construction and Building Materials*. 40 : 390-396. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.110>.

Groupe le moniteur. (1998). Caractéristique et mise en œuvre, solution pour le bâtiment. Centre technique des tuiles et briques, Tuiles et briques de terre cuite. Paris. Ed. Edition le Moniteur. P.231. pp. 14-15. ISSN 13 978-2-281-11181-1.

Groupe-hasnaoui. Quartier El Ryad ORAN-promotion immobilière-btp. <http://www.groupe-hasnaoui.com/prescription/quartier-el-ryad-oran/>.

Groupement CTC-EST/AQUIDOS. (2015). Réhabilitation Intégrale du Boulevard Didouche Mourad d'Skikda Cahier de charges de mesures d'urgence.

Guzlėna S, Šakale G, & Čertoks S. (2017). Clayey material analysis for assessment to be used in ceramic building materials. *Procedia Engineering*. 172: 333-337. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.031>.

H

Han Y N, Kong W M, Nhan L V, & Rui Y K. (2014). Innovative Application of Renewable Resources to Alleviate Our Current Environmental Crisis. *Applied Mechanics and Materials*. 692: 28-32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.692.28>.

Hapazari I, Ntuli V, & Tael B. M. (2015). Waste generation and Management in Lesotho and waste to clay brick recycling: A review. *British Journal of Applied Science & Technology*: 8(2), 148-161. ISSN: 2231-0843.

Hasan MA, Hashem MA, & Payel S. (2022). Stabilization of liming sludge in brick production: a way to reduce pollution in tannery. *Construction and Building Materials*. 314: 125702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125702>.

Hashim AA, et al. (2022). Immobilization of metals in fired clay brick incorporated with aluminium-rich electroplating sludge: properties and leaching analysis. *Sustainability*. 14 (14): 8732. <https://doi.org/10.3390/su14148732>.

Hassan KM, Fukushi K, Turikuzzaman K, & Moniruzzaman SM. (2014). Effects of using arsenic-iron sludge wastes in brick making. *Waste management*. 34(6) : 1072-1078. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.022>.

He C, Osbaeck B, & Makovicky E. (1995). Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and concrete research*. 25(8): 1691-1702. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00165-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00165-4).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Hegazy BEE, Fouad HA, & Hassanain AM. (2012). Brick manufacturing from water treatment sludge and rice husk ash. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 6(3) : 453-461. ISSN 1991-8178.

Heiman JL. (1982). An evaluation of methods of treating rising damp. ASTM International.

Hendry AW. (2001). Masonry walls: materials and construction. *Construction and Building materials*. 15(8): 323-330. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00019-8).

Hilmi FNM, & Kadir AA. (2022). Durability Properties and Leaching Behavior of Fired Clay Brick Incorporated with Gypsum Waste. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*. 3(1) : 760-770.

Himabindu M, Raj VH, Dutt A, Chandra PK, Sethi VA, & Mohammad Q. (2024). Recyclage des déchets en matériaux de construction : innovations et perspectives dans la production de briques pour une construction durable. *Web des conférences E3S 505, 04001 (2024)*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450504001>.

Hoar RJ, O'Brien MJ, Khorasgany MG, & Gopalaratnam V S. (1995). A materials-science approach to understanding limestone-tempered pottery from the Midwestern United States. *Journal of Archaeological Science*. 22(6): 823-832. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(95\)90011-X](https://doi.org/10.1016/0305-4403(95)90011-X).

Houben H, & Guillaud H. (2006). CRATerre: Traité de Construction en Terre, L'encyclopédie de la construction en terre. 3e édition, Éd. Parenthèses. I (355). Marseille. p.355, pp.41. ISSN: 978-2863641613.

I

Ismail N, & Ingham JM. (2012). In-situ and laboratory based out-of-plane testing of unreinforced clay brick masonry walls strengthened using near surface mounted twisted steel bars. *Construction and Building Materials*. 36: 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.087>.

ISO 22493. (2008). Microbeam analysis. Scanning electron microscopy. Vocabulary. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/12073896-70a9-4ddf86fdd873152b065a/iso-22493-2008>.

Izemmouren O. (2016). Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

J

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Jannat N, Latif Al-Mufti R, Hussien A, Abdullah B, & Cotgrave A. (2021). Influence of Sawdust Particle Sizes on the Physico-Mechanical Properties of Unfired Clay Blocks. *Designs*. 5 (3): 57. <https://doi.org/10.3390/designs5030057>.

Johnson JB, Haneef SJ, Hepburn BJ, Hutchinson AJ, Thompson GE, & Wood GC. (1990). Laboratory exposure systems to simulate atmospheric degradation of building stone under dry and wet deposition conditions. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*. 24(10): 2585-2592. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(90\)90136-B](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90136-B).

K

Kaczmarczyk, M. (2021). Global development of the eco-industry sector. *Acta Economica*. 19(34): 137-152. <https://doi.org/0000-0002-7763-412X>.

Kadir AA, & Mohajerani A. (2011, July). Bricks: an excellent building material for recycling wastes-a review. In *Proceedings of the IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering (EME 2011)*, Calgary, AB, Canada (pp. 4-6). DOI: 10.2316/P.2011.736-029.

Kadir AA, Abd Jalil MR, & Al Bakri AM. (2016, June). Properties of Steel Mill Sludge Waste Incorporated in Fired Clay Brick. In *Materials Science Forum* (Vol. 857, pp. 358-362). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.857.358>.

Kadir AA, Hassan MH, Salim NSA, Sarani NA, Ahmad S, & Rahmat NAI. (2018, April). Stabilization of heavy metals in fired clay brick incorporated with wastewater treatment plant sludge: Leaching analysis. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 995, No. 1, p. 012071). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012071>.

Kadir AA. (2012). An overview of wastes recycling in fired clay bricks. *International Journal of Integrated Engineering*. 4(2).

Kaouche A, et al. (2015). La réhabilitation des immeubles du style européen en Algérie. Cas de l'immeuble 12 Messaoud Ben Gharsalah. Quartier napolitain, Skikda. Mémoire de Magister. Université 20 Août 1955-Skikda. <http://dspace.univ-skikda.dz:4000/handle/123456789/1181>.

Kaouche A, et al. (2015). The effect of non-toxic industrial wastes on the performance of fired earth bricks used in the rehabilitation of old buildings in Skikda, Algeria. *Materiales de Construcción*. 75 (357). <https://doi.org/10.3989/mc.2024.377324>.

Karayannis VG. (2016). Development of extruded and fired bricks with steel industry byproduct towards circular economy. *Journal of Building Engineering*. 7: 382-387. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.08.003>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Kayali O. (2005, April). High performance bricks from fly ash. In Proceedings of the World of Coal Ash Conference, Lexington, Kentucky (Vol. 11).

Kazmi SMS, Abbas S, Munir MJ, & Khitab A. (2016). Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. *Journal of Building Engineering*. 7 : 372-378. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.08.001>.

Khargonekar P P, & Samad T. (2024). The United Nations sustainable development goals: An IFAC agenda. *IFAC-PapersOnLine*.58(3) : 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.142>.

Khitab A, Riaz MS, Jalil A, Khan RBN, Anwar W, Khan R A, & Tayyab S. (2021). Manufacturing of clayey bricks by synergistic use of waste brick and ceramic powders as partial replacement of clay. *Sustainability*. 13(18) : 10214. <https://doi.org/10.3390/su131810214>.

Killip IR, & Cheetham DW. (1984). The prevention of rain penetration through external walls and joints by means of pressure equalization. *Building and Environment*. 19(2): 81-91. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(84\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(84)90033-7).

Kirchherr J, Reike D, & Hekkert M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*. 127 : 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.

Kizinievič O, Kizinievič V, Pundiene I, & Molotokas D. (2018). Eco-friendly fired clay brick manufactured with agricultural solid waste. *Archives of civil and mechanical engineering*. 18 (4): 1156-1165. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.03.003>.

Kizinievič O, Žurauskienė R, Kizinievič V, & Žurauskas R. (2013). Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Construction and building materials*. 41 : 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041>.

Kodjo DG. (2019). Étude de détermination multicritère des matériaux de construction les plus courants sur le marché de Ouagadougou. *Génie Civil Option ROA Promotion*. Master d'Ingénierie. BurkinaFaso.

Kodjo Dodji Gbedema. (2018). Étude de caractérisation multicritère des matériaux de construction les plus courants sur le marché de Ouagadougou. *Mémoire de master*. Burkina Faso. 2018.

Kohler N, & Hassler U. (2002). The building stock as a research object. *Building Research & Information*. 30(4): 226-236. <https://doi.org/10.1080/09613210110102238>.

Kumar K, Arora R, Khan S, & Dixit S. (2022). Characterization of fly ash for potential utilization in green concrete. *Materials Today: Proceedings*. 56: 1886-1890. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.160>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Kumar V, Singh R, Ahuja IPS, & Hashmi MJ. (2020). On technological solutions for repair and rehabilitation of heritage sites: a review. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 6(1): 146-166. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2019.1709310>.

L

Laibi A B, Gomina M, Sorgho B, Sagbo E, Blanchart P, Boutouil M, & Sohounhloule DK. (2017). Caractérisation physico-chimique et géotechnique de deux sites argileux du Bénin en vue de leur valorisation dans l'éco-construction. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11 (1): 499-514. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.40>.

LANOR. NR EN 771-1/CN. (2008). Société Algérienne de fabrication de céramique et produits rouge, SARL.S.A.F.C.E.R.NR EN 771-1/CN. Zone industrielle. N°15. BP 90 Sétif. Algérie.

Laou L, SAID SAA, Yotte S, Ulmet L, Maillard P, & Rossignol S. (2017). Evaluation des propriétés mécaniques des briques en terre crue à différentes hygrométries. *Academic Journal of Civil Engineering*. 35(1) : 809-812. <https://doi.org/10.26168/ajce.35.1.168>.

Larsen VG, Tollin N, Sattrup PA, Birkved M, & Holmboe T. (2022). What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, LCSA. *Journal of Building Engineering*. 50 : 104203. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104203>.

Laveglia A, Madrid DV, Ukrainczyk N, Cnudde V, De Belie N, & Koenders E. (2024). Circular design, material properties, service life and cradle-to-cradle carbon footprint of lime-based building materials. *Science of The Total Environment*. 948 : 174875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174875>.

Liew AG, Idris A, Samad AA, Wong CH, Jaafar MS, & Baki AM. (2004). Reusability of sewage sludge in clay bricks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 6: 41-47. <https://doi.org/10.1007/s10163-003-0105-7>.

Lin KL. (2006). Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag. *Journal of hazardous materials*. 137(3) : 1810-1816. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.027>.

Lingling X, Wei G, Tao W, & Nanru Y. (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and building materials*. 19(3): 243-247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.017>.

Lisø KR, Kvande T, Hygen HO, Thue JV, & Harstveit K. (2007). A frost decay exposure index for porous, mineral building materials. *Building and environment*, 42(10), 3547-3555. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.022>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

López-Arce P, & García-Guinea J. (2005). Weathering traces in ancient bricks from historic buildings. *Building and Environment*. 40(7): 929-941. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.027>.

López-Arce P, Doehne E, Greenshields J, Benavente D, & Young D. (2009). Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia. *Materials and structures*. 42, 827-848. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9427-1>.

López-Arce P, Garcia-Guinea J, Gracia M, & Obis J. (2003). Bricks in historical buildings of Toledo City: characterisation and restoration. *Materials Characterization*. 50(1) : 59-68. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(03\)00101-3](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(03)00101-3).

Louiette. (2012-2013). Le temps des sirènes. Une histoire des Tuileries dans le bassin de Séon, Par les élèves de CM2 de l'école Estaque Garre. Ed: vialle.j. Calaméo. France. <https://www.calameo.com/books/000143243f4cc8a526093>.

Lu JX, Zhan BJ, Duan ZH, & Poon, CS. (2017). Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates. *Materials & design*. 135: 102-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.016>.

Lucchi E. (2017). Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements. *Energy and Buildings*, 134, 171-184. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.045>.

Lynch GCJ. (1994). Bricks: Properties and classifications. *Structural Survey*, 12(4), 15-20. <https://doi.org/10.1108/02630809410066447>.

M

Ma Z, Cooper P, Daly D, & Ledo L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and buildings*, 55, 889-902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>.

Madurwar MV, Ralegaonkar RV, & Mandavgane SA. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building materials*. 38 : 872-878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>.

Makni H, Khlif M, & Bradai C. (2024). Effect of Deinking Paper Sludge on Thermal, Energetic, and Mechanical Properties of Fired Clay Bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 36(9): 04024292. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-181>.

Makni H, Khlif M, Becquart F, Abriak NE, & Bradai C. (2021). Leaching test for assessing compliance with environmental requirements of fired clay bricks incorporated

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

by deinking paper sludge. *Construction and Building Materials*. 289: 123155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123155>.

Marengo E, Aceto M, Robotti E, Liparota MC, Bobba M, & Pantò G. (2005). Archaeometric characterisation of ancient pottery belonging to the archaeological site of Novalesa Abbey (Piedmont, Italy) by ICP–MS and spectroscopic techniques coupled to multivariate statistical tools. *Analytica chimica acta*. 537(1-2): 359-375. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.054>.

Marouf H. (2018). Valorisation des sédiments issus du dragage du barrage de Bouhanifia et du port d'Oran (Doctoral dissertation, Université Abdelhamid ibn badis Mostaganem). <https://dspace.univ-temouchent.edu.dz/handle/123456789/985>.

Marra F, Deocampo D, Jackson MD, & Ventura G. (2011). The Alban Hills and Monti Sabatini volcanic products used in ancient Roman masonry (Italy): An integrated stratigraphic, archaeological, environmental and geochemical approach. *Earth-Science Reviews*. 108(3-4): 115-136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.005>.

Martirena JF, Day RL, Betancourt D, & Diaz Y. (2006). Improvement of engineering properties of fired clay bricks through the addition of calcite. 7th IMC.

Mattone M, Ibnoussina M, Rescic S, Fratini F, Magrini D, Mecchi AM, & Nocairi M. (2016). Stabilization of earthen plasters: Exchange of knowledge and experiences between Italy and Morocco. *J. Mater. Environ. Sci.* 7: 3647-3655. ISSN 2028-2508.

Maupetit F. (2008). Méthodologie d'évaluation des caractéristiques sanitaires et environnementales des produits de construction. *Revue des maladies respiratoires*. 25(2) : 164-172. [https://doi.org/10.1016/S0761-8425\(08\)71514-6](https://doi.org/10.1016/S0761-8425(08)71514-6).

Mazzarella L. (2015). Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view. *Energy and Buildings*. 95: 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.073>.

MB/FS/EIPPCB/CER. (2007). Document de référence sur les meilleures techniques disponibles. Fabrication des céramiques. Ed. Commission Européenne.

Mbuyi J S. (2012). Caractérisation et mise en œuvre des sols argileux destinés aux matériaux de construction cuits: cas de la Province du Kasai oriental en République démocratique du Congo. These de doctorat. Presses univ de Louvain. <http://hdl.handle.net/2078.1/116996>.

Meddah MS, Benkari N, Al-Saadi SN, & Al Maktoumi Y. (2020). Sarooj mortar: From a traditional building material to an engineered pozzolan-mechanical and thermal properties study. *Journal of Building Engineering*. 32: 101754. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101754>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Medjelekh D, Kenai A, Claude S, Ginestet S, & Escadeillas G. (2020). Multi-technique characterization of ancient materials as part of an eco-renovation of historic centres, case of Cahors centre in France. *Construction and Building Materials*. 250: 118894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118894>.

Megahed N. (2014). Heritage-based sustainability in Port said: Classification of styles and future development. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*. 8(1): 94-107.

Méthode Réhabimed. (2008). Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Réhabilitation. Ville et Territoire. Réhabilitation. Espagne. 84-87104-97-5. P.77. www.rehabimed.net.

Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville. (2015). Modification de la Décision n° 2196/A.K.W/M.A.S.B./O.S.A. du 27/12/2011, qui porte octroi d'une enveloppe financière destinée à la réhabilitation des anciens logements dans le tissu urbain de Skikda pour une durée de 2 ans.

Minke G. (2006). Building with earth: design and technology of a sustainable architecture. De Gruyter. https://doi.org/10.1007/3-7643-7873-5_2.

Mishra AK, & Mishra A. (2021). Geochemical characterization of bricks used in historical monuments of 14-18th century CE of Haryana region of the Indian subcontinent: Reference to raw materials and production technique. *Construction and Building Materials*. 269 : 121802. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121802>.

Molez L. (2003). Comportement des réparations structurales en béton: couplage des effets hydriques et mécaniques (Doctoral dissertation, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan; Université Laval). {tel-00009124}.

Monteiro SN, & Vieira CMF. (2014). On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. *Construction and Building Materials*. 68 : 599-610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.006>.

Moropoulou A, Bakolas A, & Bisbikou K. (1995). Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic technologies. *Thermochimica acta*, 269, 743-753. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02570-7](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02570-7).

Muñoz P, Morales MP, Letelier V, & Mendivil MA. (2016). Fired clay bricks made by adding wastes, Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Construction and Building Materials*. 125 :241-252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.024>.

Murathan ÖF. (2022). Use of industrial wastes in clay based brick. *Politeknik Dergisi*. 26(2) : 871-874. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1080435>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Murmu AL, & Patel A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and building materials*. 165: 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038>.

N

Ndong A. (2020). Transformations physico-chimiques et comportement thermomécanique de mélanges argileux lors de la cuisson (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux). <tel-03867727>.

Netinger I, Anton H, & Bjegovic D. (2008). Selection of an optimal method for humidity elimination in masonry buildings. In *Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II* (pp. 287-288). CRC Press. ISBN : 9780429103599.

Ngayakamo BH, Bello A, & Onwualu AP. (2020). Development of eco-friendly fired clay bricks incorporated with granite and eggshell wastes. *Environmental Challenges*. 1 : 100006. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100006>.

Ntouala RFD, Ndjankoum BE, Ndome-Priso E, Binel MTN, Onana VL, & Ekodeck GE. (2024). Mineralogical, geochemical, and physico-mechanical features of Bidzar (North Cameroon) termite mound materials and its suitability in producing fired bricks with marble powder additive. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences*. 20 (1): 39-54. <https://doi.org/10.4314/jcas.v20i1.3>.

O

Office of Promotion and Property Management wilaya of Skikda, OPGI. (2016). National Inspection Authority, CTC, Aquidos Architectes Tecnicos and Gestion S.L.P. Integrated studies for the rehabilitation of old buildings in the city of Skikda. In: 27 Buildings, Street Didouche Mourad. Skikda, 4. (2016).

Oorkalan AS, Gopinath V, Abhilash M, Manikandan PUH, & Haran PU. (2020). Experimental investigations of bricks using ceramic powder, marble dust and wood ash. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 7: 2914-2920.

Ouedraogo E, Coulibaly O, Ouedraogo A, & Messan A. (2015). Mechanical and thermophysical properties of cement and/or paper (cellulose) stabilized compressed clay bricks. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*. 2(2): 68-76. e-ISSN: 2170-127X.

Ouendi F, & Zentar R. (2023). Investigating the influence of particle size ranges on the physical, mineralogical, and environmental properties of raw marine sediment. *Construction and Building Materials*. 409: 133987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133987>.

P

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Palomino AM, & Santamarina JC. (2005). Fabric map for kaolinite: Effects of pH and ionic concentration on behavior. *Clays and Clay minerals*. 53(3): 211-223. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2005.0530302>.

Pantini S, & Rigamonti L. (2020). Is selective demolition always a sustainable choice?. *Waste management*. 103: 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.033>.

Papargyris AD, Cooke RG, Papargyri SA, & Botis A. I. (2001). The acoustic behaviour of bricks in relation to their mechanical behaviour. *Construction and Building Materials*. 15(7): 361-369. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00007-1).

Pappu A, Saxena M, & Asolekar SR. (2007). Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and environment*. 42(6) : 2311-2320. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.015>.

Parrodi J C H, Höllen D, & Pomberger R. (2018). Characterization of fine fractions from landfill mining: A review of previous investigations. *Composites*, 6(4). <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13663>.

Pavlíková M, Pavlík Z, Keppert M, & Černý R. (2011). Salt transport and storage parameters of renovation plasters and their possible effects on restored buildings' walls. *Construction and Building Materials*. 25(3) : 1205-1212. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.034>.

Pérez-Lombard L, Ortiz J, & Pout C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*. 40(3): 394-398. [doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007).

Pérez-Monserrat EM, Causarano MA, Maritan L, Chavarria A, Brogiolo GP, & Cultrone G. (2022). Roman brick production technologies in Padua (Northern Italy) along the Late Antiquity and Medieval Times: Durable bricks on high humid environs. *Journal of Cultural Heritage*, 54, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.01.007>.

Pérez-Monserrat EM, Maritan L, Garbin E, & Cultrone G. (2021). Production technologies of ancient bricks from Padua, Italy: Changing colors and resistance over time. *Minerals*. 11(7) : 744. <https://doi.org/10.3390/min11070744>.

Phonphuak N, & Thiansem S. (2011). Effects of charcoal on physical and mechanical properties of fired test briquettes. *Science Asia*. 37 : 120-124. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2011.37.120>.

Pillard W, Bodet R, & Braymand S. (2018). Rapport de recherche PN Recybeton-Certifications pour évaluer la qualité environnementale des bâtiments (Doctoral dissertation, PN Recybeton). www.pnrecybeton.fr. <hal-03973137>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Pimraksa K, Wilhelm M, & Wruss W. (2000). A new approach to the production of bricks made of 100% fly ash. *Tile & brick international*. 16(6): 428-433.

Pinheiro AC, Mesquita N, Trovão J, Soares F, Tiago I, Coelho C, ... & Portugal, A. (2019). Limestone biodeterioration: A review on the Portuguese cultural heritage scenario. *Journal of cultural heritage*. 36: 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.008>.

Pinot P. (2015). Détermination de la porosité de roches calcaires: méthode et incertitude de mesure Determining the porosity of limestone: experimental method and uncertainty. *Revue Française de Métrologie*. 37. <https://doi.org/10.1051/rfm/2015004>.

Pittaluga D, & Ghislanzoni P. (1991). Mensiocronologia dei mattoni: la statistica applicata all'analisi. *Archeologia medievale: cultura materiale, insediamenti, territorio: XVIII, 1991, 683-686. p.16. 2039-280X. ISSN 10.1400/244393*.

Pittaluga, D. (2009). La Mensiocronologia dei mattoni. Per datare, per conoscere e per comprendere le structure storiche. 2009. Italie. EGIG. ISSN: 978-88-7544-190-6. doi: 10.1400/244393.

Thibaut, P.M. (1991). Mémento roches et minéraux industriels - Argiles communes pour terre cuite. Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRG M. Ministère de l'Industrie des Postes et Télécommunications et du Commerce extérieur. Rapport BRGM R 33266 GEO-SGN 91. R 33266.

Power A. (2010). Housing and sustainability: demolition or refurbishment?. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning*. 163(4): 205-216. <https://doi.org/10.1680/udap.2010.163.4.205>.

Prabhu P, Ramesh S, & Archana M. (2019). An experimental study on bricks by partial replacement of bagasse ash. *JRMT I*. 201(1963) :1-13. <https://doi.org/10.34256/irjmtcon35>.

Prieto-Sandoval V, Jaca C, & Ormazabal M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of cleaner production*. 179 : 605-615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>.

PTAPC, Laghouat. Site d'internet : <https://ptapc.crapc.dz/laghouat/>.

Puttaluga D. (2009). Questioni Di Archeologia, Dell'Architettura e Restauro. (2009). Italie. I edizione Luglio. 978-88-7544-177-7.

Q

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Qlihaa A, Dhimni S, Melrhaka F, Hajjaji N, & Srhiri A. (2016). Caractérisation physico-chimique d'une argile Marocaine [Physico-chemical characterization of a morrocan clay]. *J. Mater. Environ. Sci.* 7(5): 1741-1750. ISSN: 2028-2508.

R

Rabetafika HN, Paquot-FUSAG M, Janssens L, Castiaux-FUNDP, A, & Dubois-UMH P. (2006). Développement durable et ressources renouvelables. *Projet CP/45.* Janvier.

Rahmani C. (2002). Le Ministre de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD).

Ramadan MO, Fouad HA, & Hassanain AM. (2008). Reuse of water treatment plant sludge in brick manufacturing. *Journal of Applied Sciences Research.* 4(10) : 1223-1229.

Rasool AM, Hameed A, Qureshi MU, Ibrahim YE, Qazi AU, & Sumair A. (2023). Experimental study on strength and endurance performance of burnt clay bricks incorporating marble waste. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering.* 22(1): 240-255. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.2024203>.

Raut SP, Ralegaonkar RV, & Mandavgane SA. (2011). Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and building materials.* 25(10) : 4037-4042. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038>.

Razli V, Za NONIS, Ope P, & Izdelkov N. (2007). The influence of different waste additions to clay-product mixtures. *Materiali in tehnologije.* 41(6) : 289-293. ISSN 1580-294.

Reinholdt MX. (2001). Synthèse en milieu fluoré et caractérisation de phyllosilicates de type montmorillonite. Etude structurale par spectroscopies d'Absorption des Rayons X et de Résonance Magnétique Nucléaire (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse). (tel-00072356).

Riaz MH, Khitab A, Ahmad S, Anwar W, & Arshad MT. (2020). Use of ceramic waste powder for manufacturing durable and eco-friendly bricks. *Asian Journal of Civil Engineering.* 21: 243-252. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00205-2>.

Rohlen U, et al. (2013). Construire en terre crue, Construction-renovation-finishing, Moniteur Group, 313, 21-27. Paris. ISBN: 978-2-281-11567-3.

Romero Quidel G, Soto Acuña MJ, Rojas Herrera CJ, Rodríguez Neira K, & Cárdenas-Ramírez J. P. (2023). Assessment of Modular Construction System Made with Low Environmental Impact Construction Materials for Achieving Sustainable Housing Projects. *Sustainability.* 15(10): 8386. <https://doi.org/10.3390/su15108386>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Rouf MA. (2003). Effects of using arsenic-iron sludge in brick making. Fate of Arsenic in the Environment, 193-208. <http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/handle/123456789/1187>.

Rovero L, Tonietti U, Fratini F, & Rescic S. (2009). The salt architecture in Siwa oasis–Egypt (XII–XX centuries). *Construction and Building Materials*. 23(7) : 2492-2503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.003>.

S

Saenz N, Sebastián E, & Cultrone G. (2019). Analysis of tempered bricks: from raw material and additives to fired bricks for use in construction and heritage conservation. *European Journal of Mineralogy*. 31(2) : 301-312. <https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2832>.

Saiz-Jimenez C. (1993). Deposition of airborne organic pollutants on historic buildings. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*. 27(1): 77-85. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(93\)90047-A](https://doi.org/10.1016/0957-1272(93)90047-A).

Samara M, Lafhaj Z, & Chapiseau C. (2009). Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment. *Journal of hazardous materials*. 163(2-3) : 701-710. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.153>.

Samara M. (2007). Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille). (2007).

Sandrolini F, & Franzoni E. (2006). An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings. *Building and environment*. 41(10): 1372-1380. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.023>.

Sandrolini F, & Franzoni E. (2007). Repair Systems for the Restoration of Ancient Buildings–Dampness Rise Problem/Instandsetzungssysteme für das Restaurieren historischer Gebäude–Aufsteigende Feuchtigkeit. *Restoration of buildings and monuments*. 13(3): 161-172. <https://doi.org/10.1515/rbm-2007-6129>.

Scalenghe R, Barello F, Saiano F, Ferrara E, Fontaine C, Caner L, ... & Petit S. (2015). Material sources of the Roman brick-making industry in the I and II century AD from Regio IX, Regio XI and Alpes Cottiae. *Quaternary international*. 357. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.026>.

Schabereiter-Gurtner C, Piñar G, Vybiral D, Lubitz W, & Rölleke S. (2001). Rubrobacter-related bacteria associated with rosy discolouration of masonry and lime wall paintings. *Archives of Microbiology*. 176: 347-354. <https://doi.org/10.1007/s002030100333>.

Services de la Wilaya de Skikda. (2007). Monographie de la Wilaya de Skikda. Rapport. Alger. 2007. Page : 05.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Shakir AA, Naganathan S, & Mustapha KNB. (2013). Développement de briques à partir de déchets : un article de synthèse. *Revue australienne des sciences fondamentales et appliquées*. 7 (8): 812-818.

Shaqour EN, Abo Alela AH, & Rsheed AA. (2021). Improved fired clay brick compressive strength by recycling wastes of blacksmiths workshops. *Journal of Engineering and Applied Science*. 68 (1): 1-14. <https://doi.org/10.1186/s44147-021-00002-2>.

Shimatu Mbuyi J. (2012). " Caractérisation et mise en œuvre des sols argileux destinés aux matériaux de construction cuits (Doctoral dissertation, UCL-Université Catholique de Louvain). <http://hdl.handle.net/2078.1/116996>.

Silva R, Surra E, Quelhas B, Costa AA, Lapa N, & Delerue-Matos C. (2022). Advantages of structural inspection and diagnosis for traditional buildings' refurbishment: A life cycle assessment perspective. *Building and Environment*. 223: 109485. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109485>.

Silveira D, Varum H, & Costa A. (2007). Rehabilitation of an important cultural and architectural heritage: the traditional adobe constructions in Aveiro district. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 102. <https://doi.org/10.2495/SDP070682>.

Singh A, & Chandel MK. (2020). Effect of ageing on waste characteristics excavated from an Indian dumpsite and its potential valorisation. *Process Safety and Environmental Protection*. 134: 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.025>.

Singh A, & Chandel MK. (2022). Valorization of fine fraction from legacy waste as fired bricks: A step towards circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 331 : 129918. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129918>.

Singh S, Dalbehera MM, Maiti S, Bisht RS, Balam NB, & Panigrahi SK. (2023). Investigation of agro-forestry and construction demolition wastes in alkali-activated fly ash bricks as sustainable building materials. *Waste Management*. 159: 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.031>.

Site d'internet : <https://www.facebook.com/Skikda.une.ville.une.histoire>.

Sorgho B, Pare S, Guel B, Zerbo L, Traoré K, & Persson I. (2011). Etude d'une argile locale du Burkina Faso à des fins de décontamination en Cu²⁺, Pb²⁺ et Cr³⁺. *Journal-Societe Ouest Africaine de Chimie*. 31(1). <https://res.slu.se/id/publ/36380>.

Sorout J, Raj S, Kaur DP, & Lamba P. (2023). Waste-based bricks: Evaluation of strength behaviour of bricks containing different waste materials as an additive. *Water, Air, & Soil Pollution*. 234(7) : 424. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06438-x>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Stazi F, Nacci AB, Tittarelli F, Pasqualini E, & Munafò P. (2016). An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments. *Journal of Cultural Heritage*. 17: 27-41. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.07.009>.

Stulz R, & Mukerji K. (1988). Appropriate building materials: a catalogue of potential solutions.

Stulz R, al et. (1997). Matériaux de construction appropriés. Un catalogue de solutions potentielles. Saint Gallen, Londres. SKAT. 544. IT Publications, CRA Terre-EAG. 462 pp273. ISSN: 3 908001 544.

Sufian M, Ullah S, Ostrowski KA, Ahmad A, Zia A, Śliwa-Wieczorek K, & Awan AA. (2021). An experimental and empirical study on the use of waste marble powder in construction material. *Materials*. 14(14): 3829. <https://doi.org/10.3390/ma14143829>.

Sun J, Zhou H, Jiang H, Zhang W, & Mao L. (2021). Recycling municipal solid waste incineration fly ash in fired bricks: An evaluation of physical-mechanical and environmental properties. *Construction and Building Materials*. 294 : 123476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123476>.

Sutcu M, & Akkurt S. (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics international*. 35(7) : 2625-2631. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.02.027>.

Sutcu M, Alptekin H, Erdogmus E, Er Y, & Gencil O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*. 82: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.055>.

Szyja P. (2015). Zielona gospodarka w Polsce–stan obecny i perspektywy. ISSN 1898-5084.

T

Taha Y. (2017). Valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites: Évaluations technique et environnementale (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19573.78565>.

Tazairt K, et al. (2007). Histoire et empreinte de Skikda, éd. Dar El Hikma, Skikda, Algerie. (2007). ISBN : 978-9961-97-56-02.

Tedjani K. (2021). Le développement durable en Algérie. Friedrich-Ebert-Stiftung. <https://algeria.fes.de>.

Tekam MK, Badrinarayan S, Sinu PA, Lakshman K, Mullasserri S, Ramanan SS, & Naik PP. (2018). Deinked Paper Mill Sludge: Bricks from waste. *Current Science* (00113891).115(11). 10.1016/j.jclepro.2018.09.028.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Thalmaier G, Cobîrzan N, Balog AA, Constantinescu H, Ceclan A, Voinea M, & Marinca TF. (2022). Assessment of limestone waste addition for fired clay bricks. *Materials*. 15 (12): 4263. <https://doi.org/10.3390/ma15124263>.

Tite MS, Kilikoglou V, & Vekinis G. (2001). Strength, toughness and thermal shock resistance of ancient ceramics, and their influence on technological choice. *Archaeometry*. 43(3) : 301-324. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00019>.

Toolkit Interreg « FCRBE REUSE ». (2021). Brique pleine en terre cuite. Gros-oeuvre et enveloppe, Briques. 2.40 v.01_2021_FR 1/13. www.opalis.eu et www.salvoweb.

Torraca G. (2009). Lectures on materials science for architectural conservation. The Getty Conservation Institute. Los Angeles. Escobar, Angela. p.41. ISSI : 978-0-9827668-3-5.

Torres I, & De Freitas VP. (2010). The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings. *Construction and building materials*. 24(8) : 1331-1339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.004>.

Torres MIM, & de Freitas VP. (2007). Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation. *Building and environment*. 42(1) : 424-435. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.034>.

Truche C. (2010). Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III). (tel-00594021).

Tyagi G, Singhal A, Routroy S, Bhunia D, Loria AFR, Lahoti M, & Pranav S. (2024). Fired clay bricks synergistically valorizing hazardous nickel chrome-plating sludge and fly ash: Performance assessment. *Construction and Building Materials*. 423 : 135817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135817>.

U

Uchekukwu Elinwa A. (2006). Effect of addition of sawdust ash to clay bricks. *Civil engineering and environmental systems*. 23(4) : 263-270. <https://doi.org/10.1080/10286600600763149>.

Ukwatta A, & Mohajerani A. (2017). Leachate analysis of green and fired-clay bricks incorporated with biosolids. *Waste Management*. 66: 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.041>.

Ukwatta A, Mohajerani A, Setunge S, & Eshtiaghi N. (2015). Possible use of biosolids in fired-clay bricks. *Construction and Building Materials*. 91: 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.033>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Unesco. (1968). Museums and monuments. International Centre for the Study of the Preservation, & the Restoration of Cultural Property. The Conservation of Cultural Property: With Special Reference to Tropical Conditions (Vol. 11). Bernan Press (PA).

Uranjek M, & Bokan-Bosiljkov V. (2015). Influence of freeze–thaw cycles on mechanical properties of historical brick masonry. *Construction and building Materials*. 84: 416-428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.077>.

V

Vanhellemont Y, De Clercq H, & Pien A. (2008, April). A proposal for test procedure for injection products against rising damp. In *5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials Aedificatio Publishers* (pp. 181-190). <https://doi.org/10.1515/rbm-2008-6243>.

Varotsos C, Tzanis C, & Cracknell A. (2009). The enhanced deterioration of the cultural heritage monuments due to air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*. 16 : 590-592. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0114-8>.

Vars L. (1896). Rusicade et Stora ou Philippeville dans l'antiquité. Constantine. Algérie. 1896. P. 06. Emile Marle.

Veiga JP, Carvalho F, Aguas H, Montesperelli G, Kavoulaki E, Politaki E, ... & Padeletti G. (2020). Environmental influences on historical monuments: a multi-analytical characterization of degradation materials (No. EGU2020-21804). Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21804>.

Vendette N, & Côté V. (2008). L'écologie industrielle. ISBN 978-2-9810841-0-1.

Veyseh S, & Yousefi AA. (2003). The use of polystyrene in lightweight brick production.

Vialle j. (Mars 2013). Patrimoine des tuileries (extrait du Canard de l'Estaque n°11. France. Calaméo. <https://www.calameo.com/books/000143243f117c1fc0197>.

Vieira CMF, Amaral LF, & Monteiro SN. (2018). Recycling of steelmaking plant wastes in clay bricks. *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*. 25-43. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74431>.

Vieira CMF, Andrade PM, Maciel GS, Vernilli Jr, F, & Monteiro SN. (2006). Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic. *Materials science and engineering: A*, 427(1-2): 142-147. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.040>.

Vieira CMF, Pinheiro RM, Rodriguez RJS, Candido VS, & Monteiro SN. (2016). Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits. *Applied Clay Science*. 132 : 753-759. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.001>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

W

Warscheid T, & Braams J. (2000). Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 46(4) : 343-368. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00109-8](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00109-8).

Webb AL. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 77: 748-759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>.

Winkler EM. (2013). Stone: properties, durability in man's environment (Vol. 4). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-3819-9>.

X

Xavier GC, Saboya F, Maia PC, & Alexandre J. (2012). Durability of fired clay bricks containing granite powder. *Materiales de Construcción*. 62(306): 213-229. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.60710>.

Xin Y, Mohajerani A, & Smith JV. (2021). Possible recycling of waste glass in sustainable fired clay bricks: A review. *GEOMATE Journal*. 20(78) : 57-64. <https://doi.org/10.21660/2021.78.Gx260>.

Y

Yadav A, & Khandegar V. (2019). Dataset on assessment of River Yamuna, Delhi, India using indexing approach. *Data in brief*, 22, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.130>.

Z

Zhao P, Zhang X, Qin L, Zhang Y, & Zhou L. (2019). Conservation of disappearing traditional manufacturing process for Chinese grey brick: Field survey and laboratory study. *Construction and Building Materials*, 212, 531-540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.317>.

Zhou W, Song S, & Feng K. (2022). The sustainability cycle of historic houses and cultural memory: Controversy between historic preservation and heritage conservation. *Frontiers of Architectural Research*. 11(6): 1030-1046. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.04.006>.

Ziegert C, Rohlen U. (2013). Construire en terre crue. construction-renovation-finishing, éd.Moniteur Group, Paris, (2013) : 313, 21-27. ISBN: 978-2-281-11567-3.

ANNEXE

Enquête sur le projet de réhabilitation de la rue Didouche Mourad, Skikda.

L'enquête ci-jointe a été menée dans le cadre d'un projet de recherche « thèse de doctorat » concernant les compétences liées à l'application de la brique en terre cuite dans le contexte de la réhabilitation du vieux bâtiment situé rue Didouche Mourad.

*Obligatoire :

1- Adresse e-mail :

2- Vos coordonnées : Structure/ Adresse/ Tél/ Fax/ E-mail/ Nom/ Prénom/ Fonction/ Organisme/ Ville.

I. Le coté socio-spatial : « le confort au sein du logement » :

1- Quelles sont les maladies dont souffrent les habitants du quartier ?

2- Quels types de confort souhaitent bénéficier les résidents, « acoustique et thermique » ?

II. Côté technique : « éco-matériaux » :

1- Avez-vous programmé l'utilisation de matériaux locaux dans ce projet de réhabilitation ?

- Une seule réponse possible :

Oui :

Non :

Autre :

- Si oui comment ? Si non pourquoi ?

2- Avez-vous effectué des recherches sur des matériaux locaux adaptés au contexte de votre projet ?

- Une seule réponse possible :

Oui :

Non :

Autre :

- Si oui comment ? Si non pourquoi ?

3- Avez-vous éprouvé des problèmes pour trouver des entreprises spécialisées et une main-d'œuvre qualifiée dans ce domaine ?

- Une seule réponse possible :

Oui :

Non :

Autre :

- Si oui comment ? Si non pourquoi ?

4- Avez-vous envisagé un partenariat entre le secteur public et privé pour ce projet ?

- Une seule réponse possible :

Oui :

Non :

Autre :

- Si oui comment ? Si non pourquoi ?

5- Est-il prévu d'organiser des activités visant à créer des connaissances et des apprentissages interactifs pour la communauté locale de l'innovation ?

- Une seule réponse possible :

Oui :

Non :

Autre :

- Si oui comment ? Si non pourquoi ?

6- Avez-vous des prévisions pour le recyclage des matériaux de constructions, pour les réutiliser dans les processus de réhabilitation et en évitant des résidus et des déchets?

- Une seule réponse possible :

Oui :

Non :

Autre :

- Si oui comment ? Si non pourquoi ?

7- Est-il prévu d'effets sur la consommation énergétique employée pour produire les matières industrielles dans le cadre de ce projet ?

- Une seule réponse possible :

Oui :

Non :

Autre :

- Si oui comment ? Si non pourquoi ?