الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et Technologies
قسم الري والهندسة المدنية
Département D'hydraulique et de Génie Civil

Mémoire de Master

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures

Sujet du Mémoire

Élaboration et caractérisation d'un mortier géopolymère activé Alcalinement

Présenté par :
WALID ALOUI& Oulad Saïd Mohamed Rafik

Devant le jury composé de :

Matallah Zineb	MCA	Univ. Ghardaïa	**Président**
DEHANE SARA	MCA	Univ. Ghardaïa	**Examinateur**
Mr AZIEZ M N	MCA	Univ. Ghardaïa	**Encadrant**

Année universitaire : 2026/2025

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont fait de mes rêves leur raison d'être, à mes chers parents, dont l'amour infini, les sacrifices silencieux et les prières sincères ont tracé le chemin de ma réussite. Que Dieu les protège et leur accorde santé et longue vie.

À mes frères et sœurs, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements précieux à chaque étape de ce parcours.

À mes amis fidèles, compagnons des jours de doute comme des jours de joie, qui n'ont jamais cessé de croire en moi.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à faire de ce rêve une réalité.

Remerciements

Nous remercions Allah Tout-Puissant qui nous a accordé la patience et nous a permis de surmonter les difficultés pour accomplir ce travail.

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude à notre superviseur, Mr AZIEZ M, N, pour ses conseils, ses orientations et sa présence à nos côtés tout au long de la réalisation de cette ce mémoire. Que Dieu le garde et lui accorde une longue vie.

Nous remercions également tous les membres du personnel du laboratoire des travaux publics (LTPS SUD) pour leur assistance et leurs conseils. Enfin, nous tenons à remercier les membres du comité d'évaluation pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail.

Résumé

Face à l'urgence climatique, l'industrie cimentière doit réduire son empreinte carbone. Les géopolymères, synthétisés à basse température par activation alcaline d'aluminosilicates, représentent une alternative durable. Cette étude explore la valorisation de déchets de brique rouge, d'une pouzzolane naturelle et de fumée de silice pour formuler des mortiers géopolymères, dans une logique d'économie circulaire.

Un programme expérimental a été mené sur quinze formulations en faisant varier les proportions de ces précurseurs. Les échantillons ont été soumis à une cure thermique à 70°C et caractérisés à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci : résistance à la compression et à la flexion, vitesse ultrasonique, porosité accessible à l'eau et absorption capillaire.

Les résultats montrent que la nature et le dosage des ajouts influencent fortement les performances. La formulation optimisée PF10 (précurseur seul à base de déchets de brique) atteint une résistance à la compression de 46kN, soit plus du double du mortier de référence. Les systèmes hybrides associant brique, pouzzolane et fumée de silice (PBF) offrent le meilleur compromis entre résistance mécanique (compression jusqu'à 32kN, flexion jusqu'à 3,50kN), faible porosité et absorption capillaire réduite. La vitesse ultrasonique confirme la compaction élevée de ces matrices, gage de durabilité.

Ce travail démontre que les déchets de brique, correctement co-valorisés avec des ajouts pouzzolaniques, permettent d'élaborer des liants performants et écologiques, ouvrant la voie à des matériaux de construction décarbonés et recyclables.

Mots clés : Géopolymère, déchet de brique, pouzzolane, fumée de silice, activation alcaline, résistance mécanique, durabilité, économie circulaire.

Abstract

The cement industry is a major contributor to global CO_2 emissions, driving the search for low-carbon binders. Geopolymers, produced by alkaline activation of aluminosilicate precursors at low temperature, offer a sustainable alternative. This work investigates the valorization of red brick waste, natural pozzolan, and silica fume in the formulation of geopolymer mortars, within a circular economy framework.

Fifteen mix designs with varying precursor proportions were prepared. All specimens were thermally cured at 70 °C and characterized in the fresh state (workability) and hardened state: compressive and flexural strengths, ultrasonic pulse velocity, water-accessible porosity, and capillary water absorption.

Results reveal a strong dependence of performance on the type and content of mineral additions. The optimized PF10 mixture (solely brick waste powder) reached a compressive strength of 46 kN, more than twice that of the reference mortar. Hybrid systems combining brick powder, pozzolan, and silica fume (PBF series) exhibited the best balance of mechanical properties (compressive strength up to 32 kN, flexural strength up to 3.50 kN), low porosity, and reduced capillary absorption. Ultrasonic velocity measurements confirmed the high compactness and internal integrity of these matrices.

This study confirms the high potential of waste brick co-valorized with pozzolanic additions for producing high-performance, eco-friendly binders, paving the way for decarbonized and recyclable construction materials.

Keywords: Geopolymer, brick waste, pozzolan, silica fume, alkaline activation, mechanical strength, durability, circular economy.

ملخص

في ظل التحديات البيئية الملحّة، يُعتبر قطاع الإسمنت مسؤولاً عن حصة كبيرة من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مما يستدعي تطوير مواد رابطة بديلة منخفضة الكربون. تقدم الجيوبوليميرات، المحضّرة بتنشيط قلوي لمواد ألومينوسيليكاتية عند درجات حرارة منخفضة، حلاً مستداماً واعداً. يهدف هذا العمل إلى تثمين نفايات الطوب الأحمر، والبوزولان الطبيعي، وغبار السيليكا في صياغة مونة جيوبوليميرية، في إطار الاقتصاد الدائري.

تم إعداد خمس عشرة تركيبة مختلفة النسب من هذه المواد الأولية. عولجت العينات حرارياً عند درجة 70 مئوية، ثم خضعت لتقييم شامل: مقاومة الانضغاط والانحناء، سرعة النبض فوق الصوتي، المسامية المفتوحة للماء، والامتصاص الشعري.

أظهرت النتائج أن طبيعة الإضافات وجرعاتها تؤثر بقوة على الأداء النهائي. حققت التركيبة المثلى $PF10$ (المعتمدة فقط على مسحوق نفايات الطوب) مقاومة انضغاط بلغت 46 كيلونيوتن، أي أكثر من ضعف مقاومة المونة المرجعية. في حين أتاحت الأنظمة الهجينة التي تجمع بين الطوب والبوزولان وغبار السيليكا (سلسلة PBF) أفضل توازن بين الخواص الميكانيكية (مقاومة انضغاط حتى 32 كيلونيوتن وانحناء حتى 3.50 كيلونيوتن) والمسامية المنخفضة والامتصاص الشعري الضعيف. وأكدت قياسات السرعة فوق الصوتية تماسك هذه المصفوفات وكثافتها العالية، مما يعزز متانتها.

تثبت هذه الدراسة الإمكانات العالية لنفايات الطوب المثمّنة مع إضافات بوزولانية لإنتاج مواد بناء عالية الأداء وصديقة للبيئة، مما يفتح آفاقاً نحو مواد إنشائية قابلة لإعادة التدوير وخالية من الكربون.

الكلمات المفتاحية: جيوبوليمير، نفايات الطوب، بوزولان، غبار السيليكا، تنشيط قلوي، مقاومة ميكانيكية، ديمومة، اقتصاد دائري.

Table des figures

I.1 Chronologie de l'évolution et du développement des géopolymères 8

I.2 Représentation schématique de la structure tridimensionnelle des géopolymères 9

I.3 :Différences fondamentales entre le mécanisme d'hydratation du ciment Portland et la polycondensation des géopolymères 10

I.4 Mécanisme de géopolymérisation en quatre étapes : dissolution, oligomérisation, polycondensation et durcissement 11

I.5 Facteurs influençant le mécanisme de géopolymérisation : température, concentration, rapport Si/Al 12

I.6 Sources aluminosilicatées utilisées dans la synthèse des géopolymères 13

I.7 Activateurs alcalins et leur rôle dans la géopolymérisation 14

I.8 Paramètres de formulation critiques et leur influence sur les propriétés des géopolymères 15

I.9 Types de géopolymères et leurs applications 16

I.10 Problématiques environnementales et enjeux de la valorisation des déchets de brique . 17

I.11 Méthodes de recyclage des briques dans les géopolymères 18

I.12 Rôle de la géopolymérisation dans l'économie circulaire 19

I.13 Procédés de fabrication et propriétés des briques géopolymères 20

I.14 Cycle de recyclage des briques géopolymères en fin de vie 21

I.15 Pouzzolane naturelle d'origine volcanique (Beni Saf, Algérie) 22

I.16 Fumée de silice (microsilice) – micrographie et apparence 23

II.1 Poudre déchet de brique(LTPS) 27

II.2 Étapes de préparation la poudre déchets de briques(LTPS) 28

II.3 Poudre de pouzzolane(LTPS) 29

II.4 Étapes de préparation de la poudre de pouzzolane(LTPS) 30

II.5 Essai au bleu de méthylène réalisé au laboratoire LTPS 31

II.6 Résultat de l'essai de sédimentométrie(LTPS) 33

II.7 Courbe granulométrique issue du test de sédimentométrie de la poudre de brique utilisée(LTPS) 34

II.8 Réalisation de l'analyse sédimentométrique au laboratoire LTPS 34

II.9 Sable de oued M'Zi Laghouat 35

II.10 Les tamis utilisé(LTPS) 36

II.11 Courbe granulométrique du sol étudié(LTPS) 38

II.12 L'essai de l'équivalent du sable(LTPS) 39

II.13 La masse volumique apparente 40

II.14 Masse volumique absolue. 41

II.15 Le silicate de sodium(LTPS) 42

II.16 Hydroxyde de sodium (NaOH) (Université de Ghardaïa). 43

II.17 Moule normalisé de 40x40x160 mm à LTPS. 45

II.18 Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier [service de Béton –LTPS]. . 46

II.19 Le moule est rempli et installé sur la table d'impact (LTPS) 47

II.20 Démoulage les échantillons(LTPS). 48

II.21 Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion(LTPS) 48

II.22 Dispositif de rupture en compression(LTPS) 49

II.23 Dispositif ultrason(LTPS) 50

II.24 Absorption capillaire (LTPS) 51

II.25 Montage pour la mesure de la porosité accessible à l'eau à Université de Ghardaia . . . 52

III.1 présente des images de mortier geopolymère(LTPS) 55

III.2 Propriétés à l'état frais (LTPS) 56

III.3 Distribution de la densité des échantillons(LTPS) 58

III.4 Résistance à la compression(LTPS) 60

III.5 Comparaison des vitesses ultrasoniques(LTPS) 62

III.6 Résistance à la traction par flexion(LTPS) 64

III.7 Porosité accessible à l'eau (Université de Ghardaïa) 66

III.8 Absorption finale après 24h 68

Liste des tableaux

1 Principales abréviations utilisées dans ce mémoire XIV

2 Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé (LTPS) 37

3 Résultats de l'essai de l'équivalent de sable(LTPS) 39

4 Quantités des matériaux utilisés pour les 15 échantillons(LTPS) 44

5 Densité des échantillons(LTPS) 57

6 Résistance à la compression des échantillons après 30 jours de cure(LTPS) 59

7 Comparaison des vitesses ultrasoniques mesurées à 4 cm et 16 cm(LTPS) 61

8 Résistance mécanique des échantillons après 30 jours de cure(LTPS) 63

9 Porosité accessible à l'eau (Eau, 20°C) - Rapport d'essai 13.04.2026(LTPS) 65

10 Évolution de la masse des échantillons en fonction du temps (LTPS) 67

11 Taux d'absorption d'eau $W(\%)$ corrigé 68

Liste des abréviations

Abréviation	**Définition**
$A/(L+S)$	Rapport molaire Alcalins / (Laitier + Silice)
Al	Aluminium
Al_2O_3	Oxyde d'aluminium ou alumine
$Al(OH)_4^-$	Ion aluminate
B	Brique (déchet de brique)
C	Carbone
CaO	Oxyde de calcium ou chaux vive
$Ca(OH)_2$	Hydroxyde de calcium ou portlandite
CO_2	Dioxyde de carbone
C-S-H	Silicate de calcium hydraté (de l'anglais *Calcium Silicate Hydrate*)
°C	Degré Celsius
μm	Micromètre (10^{-6} m)
ES	Équivalent de sable
FA	Cendres volantes (de l'anglais *Fly Ash*)
FB10, FB20, FB30	Échantillons contenant 10 %, 20 %, 30 % de fumée de silice avec brique
Fig.	Figure
g	Gramme
g/cm^3	Gramme par centimètre cube (unité de masse volumique)
h	Heure
K	Kelvin (unité de température) ou Potassium
KOH	Hydroxyde de potassium

Abréviation	**Définition**
kN	Kilonewton (unité de force)
LTPS	Laboratoire des Travaux Publics du Sud (Ghardaïa)
M	Concentration molaire (mol/L)
M0	Mélange de référence (100 % brique, sans ajout)
M_d	Masse sèche
M_0	Masse initiale (sèche) avant absorption capillaire
M_{sa}	Masse saturée à l'air libre
M_{sw}	Masse saturée immergée dans l'eau
M_t	Masse à l'instant *t*
min	Minute
mL	Millilitre
mm	Millimètre
MPa	Mégapascal (unité de résistance)
m/s	Mètre par seconde (unité de vitesse ultrasonique)
N	Newton (unité de force)
Na	Sodium
Na_2O	Oxyde de sodium
Na_2SiO_3	Silicate de sodium (verre soluble)
NaOH	Hydroxyde de sodium (soude caustique)
NF P18-459	Norme française pour la détermination de la porosité accessible à l'eau
nm	Nanomètre (10^{-9} m)

Abréviation	**Définition**
OPC	Ciment Portland ordinaire (de l'anglais *Ordinary Portland Cement*)
P	Pouzzolane
PB10, PB20, PB30	Échantillons contenant 10 %, 20 %, 30 % de brique avec pouzzolane
PBF10, PBF20, PBF30	Échantillons mixtes pouzzolane + brique + fumée de silice (dosages variables)
PBS20	Échantillon spécifique à 20 % de brique avec pouzzolane et fumée de silice (voir formulation)
PF10, PF20, PF30	Échantillons contenant 10 %, 20 %, 30 % de fumée de silice avec pouzzolane
P5, P10	Échantillons contenant 5 % et 10 % de pouzzolane avec brique
pH	Potentiel hydrogène (mesure de l'alcalinité)
P	Porosité accessible à l'eau (%)
R	Rapport molaire (ex. Si/Al)
RBP	Poudre de brique recyclée (de l'anglais *Recycled Brick Powder*)
S	Sable
SF5, SF10, SF15	Échantillons contenant 5 %, 10 %, 15 % de fumée de silice avec brique
Si	Silicium
SiO_2	Dioxyde de silicium ou silice
Si/Al	Rapport molaire silice/alumine
t	Temps (s ou min)
tr/min	Tours par minute (vitesse de rotation)

Abréviation	**Définition**
V	Vitesse ultrasonique (m/s)
V	Volume (cm^3 ou mL)
W	Taux d'absorption d'eau (%)
W/S	Rapport massique Eau/Solide
‰	Pourcentage

TABLEAU 1 : Principales abréviations utilisées dans ce mémoire

Table des matières

Dédicace II

Remerciements III

Résumé IV

Table des figures VII

Liste des tableaux X

Liste des abréviations XI

Table des matières XVIII

Introduction générale 1

I CHAPITRE I FONDAMENTAUX DES GÉOPOLYMÈRES ET DES LIANTS ALCALI-ACTIVÉS 5

I.1 Introduction 6

I.2 Historique et Définition des Géopolymères 7

I.2.1 Origine du Concept 7

I.2.2 Définition Scientifique 8

I.2.3 Différences Fondamentales avec le Ciment Portland 9

I.3 Mécanisme de la Géopolymérisation 10

I.3.1 Étapes Réactionnelles 11

I.3.2 Facteurs Influençant le Mécanisme 11

I.4 Matières Premières et Paramètres Influençant 12
I.5 Sources Aluminosilicatées 12
I.5.1 Activateurs Alcalins 13
I.5.2 Paramètres de Formulation Critiques 14
I.6 Types et Applications des Géopolymères 15
I.6.1 Applications dans le Génie Civil 16
I.7 Valorisation des Déchets de Brique 17
I.7.1 Problématiques Environnementales 17
I.7.2 Méthodes de Recyclage dans les Géopolymères 18
I.7.3 Rôle dans l'Économie Circulaire 18
I.8 Fabrication, Propriétés et Recyclage des Briques Géopolymères 19
I.8.1 Procédés de Fabrication 19
I.8.2 Avantages et Limites 20
I.8.3 Possibilités de Recyclage en Fin de Vie 20
I.9 La Pouzzolane Naturelle 21
I.10 La Fumée de Silice (Silica Fume) 22
I.11 Conclusion 23

II CHAPITRE II :MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALE 25

II.1 Introduction 26
II.2 Caractérisation des matériaux utilisés : 26
II.2.1 Poudre Déchet de Brique (Waste brick Powder) : 26

II.2.2 Pouzzolane (Pozzolan) : 28
II.2.3 Analyse sédimentométrique 31
II.2.4 Sable 35
II.2.5 Le silicate de sodium 41
II.2.6 Hydroxyde de sodium (NaOH) 42
II.2.7 Eau de gâchage 43
II.3 Partie expérimentale 43
II.3.1 Méthode de formulation du mortier géopolymère 43
II.3.2 Essai de traction par flexion 48
II.3.3 Essai de compression 49
II.3.4 Vitesse ultrasonique 49
II.3.5 Absorption capillaire 50
II.3.6 Porosité accessible à l'eau 51
II.4 Conclusion 52

III CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS 53

III.1 Introduction 54
III.2 Aspect visuel 54
III.3 Propriétés à l'état frais 56
III.4 Masse volumique 56
III.5 Résistance à la compression 58
III.6 Vitesse ultrasonique 60

III.7 Résistance à la traction par flexion 62

III.8 Porosité accessible à l'eau 64

III.9 Absorption capillaire 66

III.10Conclusion 69

Conclusion Générale **70**

Références **80**

Annexe **82**

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie de la construction se trouve aujourd'hui à un carrefour décisif, confrontée à un impératif de durabilité qui remet en question ses paradigmes les plus établis. Responsable d'une part significative des émissions mondiales de gaz à effet de serre et de la consommation de ressources naturelles non renouvelables, le secteur doit impérativement engager une transition profonde vers des matériaux et des procédés à faible empreinte environnementale. Le ciment Portland, liant hydraulique par excellence depuis près de deux siècles, cristallise à lui seul ces enjeux : sa production, énergivore et fortement émettrice de dioxyde de carbone, appelle au développement de solutions alternatives crédibles, capables de concilier performance technique, viabilité économique et responsabilité écologique.

C'est dans ce contexte de mutation que s'inscrit la résurgence des liants alcali-activés, et plus spécifiquement des géopolymères. Héritiers d'une tradition millénaire empirique – dont les mortiers romains aux performances hydrauliques remarquables constituent un témoignage éloquent –, ces matériaux, formalisés scientifiquement à la fin du XX siècle, représentent bien plus qu'une simple substitution au ciment Portland. Ils offrent un changement de paradigme : la possibilité de synthétiser, à basse température, un liant inorganique tridimensionnel à partir de ressources minérales abondantes, qu'elles soient naturelles ou, plus pertinemment encore, issues de la valorisation de sous-produits et de déchets industriels. La géopolymérisation, réaction de polycondensation en milieu alcalin de précurseurs aluminosilicatés, ouvre ainsi la voie à une véritable économie circulaire dans le secteur du bâtiment.

Parmi les multiples sources d'aluminosilicates exploitables, les déchets issus de la démolition et de l'industrie de la terre cuite, en particulier les rebuts de briques, constituent un gisement colossal, aujourd'hui encore majoritairement destiné à l'enfouissement et donc largement sous-valorisé. Leur nature chimique et minéralogique, riche en silice et en alumine potentiellement réactives après activation thermique et mécanique, en fait des candidats idéaux pour la synthèse de liants géopolymères. La transformation de ce flux de déchets, souvent perçu comme une charge environnementale, en une ressource pour de nouveaux matériaux de construction performants, incarne une stratégie de valorisation vertueuse et durable, au cœur des préoccupations contemporaines.

L'objectif principal de ce travail de recherche est précisément de contribuer à cette dynamique, en explorant la faisabilité et les performances de mortiers géopolymères élaborés à partir d'une matrice mixte, incorporant de la poudre de déchet de brique, de la pouzzolane naturelle et de la fumée de silice. Au-delà de la simple caractérisation, cette étude ambitionne de décrypter les relations complexes entre la formulation, la microstructure et le comportement macroscopique de ces matériaux composites. Il

s'agit, en particulier, d'évaluer l'influence de la synergie entre différents ajouts pouzzolaniques sur les propriétés à l'état frais, les performances mécaniques (compression, flexion), et les indicateurs de durabilité tels que la porosité, l'absorption capillaire et la qualité interne évaluée par ultrasons. Au regard de ces enjeux, la problématique centrale de ce travail peut être formulée ainsi : **dans quelle mesure une matrice aluminosilicatée mixte, associant la poudre de déchet de brique, la pouzzolane naturelle et la fumée de silice, permet-elle d'élaborer des mortiers géopolymères aux performances mécaniques et de durabilité satisfaisantes, tout en s'inscrivant dans une logique de valorisation des déchets et de réduction de l'empreinte environnementale ?**

Cette interrogation générale se décline en plusieurs questions de recherche :

— Quelle est l'aptitude de la poudre de déchet de brique, après broyage et activation thermique, à jouer le rôle de précurseur principal dans la géopolymérisation ?

— Quel est l'effet de la substitution partielle de la poudre de brique par la pouzzolane naturelle et la fumée de silice sur les propriétés à l'état frais (ouvrabilité, temps de prise) ?

— Comment cette synergie entre les différents ajouts influence-t-elle les résistances mécaniques en compression et en flexion ?

— Quelles sont les répercussions de la formulation et des conditions de cure sur la porosité, l'absorption capillaire et la compacité interne évaluée par ultrasons ?

— Existe-t-il une corrélation entre la microstructure, les indicateurs de durabilité et le comportement mécanique de ces mortiers ?

Pour répondre à ces questions, nous formulons les hypothèses suivantes :

H1 : La poudre de déchet de brique, riche en silice et en alumine amorphes après activation, est suffisamment réactive en milieu alcalin pour former un réseau géopolymérique cohésif.

H2 : L'incorporation de la fumée de silice, source de silice hautement réactive, et de la pouzzolane naturelle améliore le degré de polycondensation et densifie la matrice, ce qui augmente les résistances mécaniques.

H3 : Il existe un dosage optimal des ajouts au-delà duquel les performances se dégradent, en raison d'un déséquilibre du rapport Si/Al ou d'une dissolution incomplète des particules.

H4 : Les conditions de cure, notamment la température et la durée, influencent significativement la cinétique de géopolymérisation et, par conséquent, les propriétés finales du matériau.

H5 : La réduction de la porosité et de l'absorption capillaire, associée à une vitesse de propagation des ultrasons plus élevée, traduit une meilleure durabilité des mortiers formulés.

Afin de répondre à cette problématique, notre démarche s'articule autour d'une approche expérimentale rigoureuse, structurée comme suit. **Le premier chapitre** pose les fondements théoriques de

l'étude, en retraçant la genèse des géopolymères, leur mécanisme de formation et les paramètres clés qui gouvernent leurs propriétés, tout en établissant un lien avec les pratiques antiques. **Le deuxième chapitre** est consacré à une description détaillée des matières premières utilisées, de leurs caractérisations physico-chimiques, ainsi que des protocoles expérimentaux mis en œuvre pour l'élaboration et les essais des différents mortiers. Enfin, le **troisième chapitre** présente, analyse et interprète l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, en mettant en lumière les corrélations entre composition, conditions de cure et performances finales. À travers cette investigation, nous aspirons à démontrer le potentiel considérable des déchets de brique co-valorisés avec d'autres additions minérales, et à fournir des éléments de compréhension essentiels pour le développement de matériaux cimentaires alternatifs, performants et résolument ancrés dans une logique de développement durable.

CHAPITRE I : FONDAMENTAUX DES GÉOPOLYMÈRES ET DES LIANTS ALCALI-ACTIVÉS

CHAPITRE I
FONDAMENTAUX DES GÉOPOLYMÈRES ET DES LIANTS ALCALI-ACTIVÉS

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'explorer la filiation conceptuelle qui unit les pratiques empiriques des bâtisseurs de l'Antiquité et les développements scientifiques les plus récents dans le domaine des liants inorganiques à faible empreinte carbone.

Dans ce cadre, ce chapitre s'articule autour de plusieurs axes principaux, incluant la définition scientifique des géopolymères, leur mécanisme de formation, les matières premières utilisées, les paramètres influençant leurs propriétés, ainsi que leurs applications dans le domaine du génie civil. Une attention particulière sera également accordée à la valorisation des déchets de brique dans une logique d'économie circulaire et de développement durable.

L'examen approfondi des mortiers archéologiques, notamment ceux mis en œuvre dans les structures hydrauliques romaines telles que la piscine de Guelma, révèle une maîtrise remarquable des phénomènes de prise pouzzolanique, obtenue par l'addition délibérée de matériaux silico-alumineux calcinés à la chaux aérienne [1]. Cette connaissance pragmatique, transmise et perfectionnée au fil des siècles, trouve un écho contemporain dans l'émergence des géopolymères, une classe de liants synthétisés par activation alcaline de précurseurs aluminosilicatés [2].

L'industrie cimentière actuelle est confrontée à un défi environnemental majeur, la production du ciment Portland conventionnel étant responsable d'émissions massives de dioxyde de carbone et d'une consommation énergétique considérable lors de l'étape de clinkérisation à haute température [2]. Cette situation a catalysé un regain d'intérêt pour les liants alternatifs capables de réduire significativement le bilan carbone du secteur de la construction. Les géopolymères, de par leur synthèse à température ambiante ou modérément élevée et leur capacité à valoriser des sous-produits industriels abondants tels que les laitiers de haut fourneau ou les cendres volantes, se positionnent comme une solution d'avenir particulièrement prometteuse [3].

L'objectif de ce chapitre est double. Il consiste, d'une part, à retracer l'émergence historique du concept de géopolymérisation, depuis ses racines archéologiques hypothétiques jusqu'à sa formalisation

scientifique par Joseph Davidovits et aux développements parallèles menés en Europe de l'Est par Viktor Glukhovsky [2]. D'autre part, il vise à établir un parallèle éclairant avec la composition et les propriétés des mortiers antiques romains, lesquels illustrent de manière remarquable la permanence des principes chimiques régissant l'activation alcaline des aluminosilicates et la formation de phases liantes stables en milieu aqueux [1]. Cette mise en perspective historique permettra de mieux appréhender la nature profonde des matériaux géopolymères et de mettre en évidence la continuité des savoirs techniques dans le domaine des matériaux de construction durables.

I.2 Historique et Définition des Géopolymères

I.2.1 Origine du Concept

La genèse du concept de géopolymère s'inscrit à l'intersection de l'archéologie des matériaux anciens et de la chimie inorganique moderne. Certaines hypothèses, notamment celles proposées par **Joseph Davidovits** [3], suggèrent que les mégalithes de l'Égypte antique auraient pu être obtenus par agglomération *in situ* de matériaux locaux riches en aluminosilicates, activés par des solutions alcalines telles que le natron [2]. Bien que débattue, cette approche a contribué à l'émergence d'une réflexion nouvelle sur les liants minéraux.

Dans les années 1970, dans un contexte marqué par la recherche de matériaux résistants au feu, Davidovits formalisa le concept de géopolymérisation et introduisit en 1979 le terme géopolymère. Il définit ces matériaux comme des réseaux tridimensionnels d'aluminosilicates obtenus par polycondensation en milieu alcalin, selon un mécanisme proche de la formation des zéolithes [3].

Parallèlement, **Viktor Glukhovsky** développa en Union Soviétique des liants alcalino-activés à base de laitiers industriels, utilisés avec succès dans la construction. Ces travaux ont démontré la viabilité et la durabilité de ces matériaux alternatifs [2].

Il convient de distinguer les géopolymères, définis comme des réseaux amorphes de type poly(sialate), des liants alcali-activés, terme plus général englobant divers systèmes hydrauliques pouvant inclure des gels de type C-S-H [2]. Cette distinction permet de mieux comprendre la diversité des matériaux étudiés.

L'intérêt pour ces liants n'a cessé de croître, avec des applications industrielles dès les années 1980 et des réalisations récentes à grande échelle, confirmant leur potentiel dans la construction durable [3].

Enfin, les recherches actuelles mettent en évidence une continuité remarquable avec les mortiers antiques romains, notamment ceux de Guelma, caractérisés par l'utilisation de chaux et d'ajouts pouzzolaniques [1]. La réaction pouzzolanique, fondée sur l'activation de phases silico-alumineuses en milieu basique, conduit à la formation de composés liants stables, analogues à ceux observés dans les géopolymères modernes.

Ainsi, l'étude des matériaux anciens éclaire les développements contemporains et souligne la permanence des principes chimiques à la base des liants durables [1, 2].



FIGURE I.1 : Chronologie de l'évolution et du développement des géopolymères [3].

I.2.2 Définition Scientifique

Un géopolymère est un polymère inorganique formé par l'enchaînement de tétraèdres $SiO4^{4-}$ et $AlO4^{5-}$ partageant leurs atomes d'oxygène, constituant ainsi un réseau tridimensionnel. La formule générale proposée par Davidovits est :

$$M_n[-(SiO2)_z - AlO2]_n \cdot wH2O \quad (1)$$

où M représente un cation alcalin (Na+ ou K+) assurant la neutralité électrique, n est le degré de

polymérisation et z prend généralement les valeurs 1, 2 ou 3 selon la structure du géopolymère [3].

Selon le rapport molaire Si/Al, Davidovits distingue trois grandes classes structurales :

— **Poly(sialate)** – Si/Al = 1 (structure en chaîne simple) ;

— **Poly(sialate-siloxo)** – Si/Al = 2 (alternance Si–O–Al–O–Si–O–) ;

— **Poly(sialate-disiloxo)** – Si/Al = 3 (alternance plus longue).

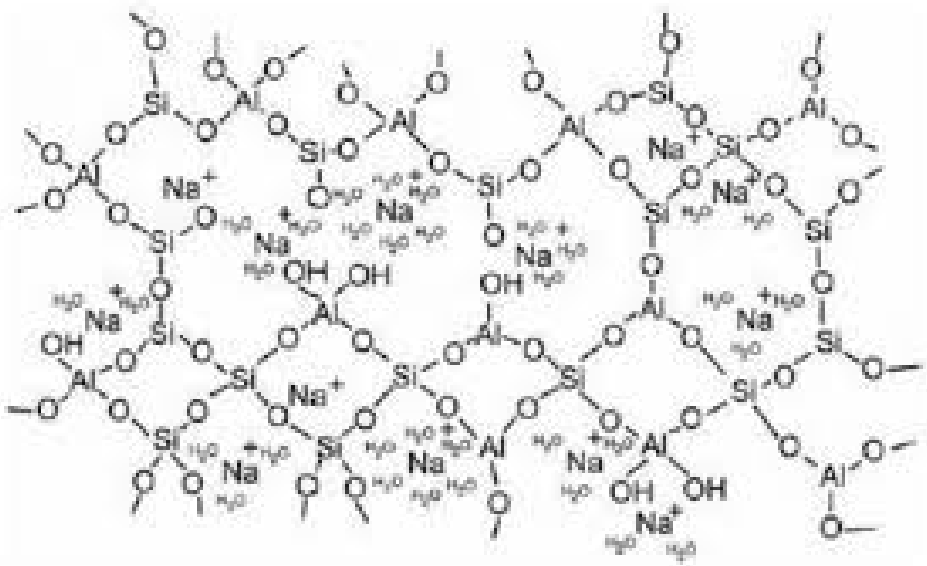


FIGURE I.2 : Représentation schématique de la structure tridimensionnelle des géopolymères [12].

I.2.3 Différences Fondamentales avec le Ciment Portland

Contrairement au ciment Portland, dont le durcissement repose sur l'hydratation des phases silicatées conduisant à la formation d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H) ainsi que de portlandite Ca(OH)2, le géopolymère durcit par un mécanisme de polycondensation en milieu alcalin, sans formation significative d'hydrates de calcium comme phase liante majoritaire. Cette différence fondamentale de composition et de mécanisme de durcissement confère aux géopolymères une meilleure résistance aux attaques acides et sulfatiques [4]. Par ailleurs, la prise du géopolymère peut s'effectuer à température ambiante ou modérément élevée, alors que la fabrication du ciment Portland nécessite une étape de clinkérisation à très haute température.

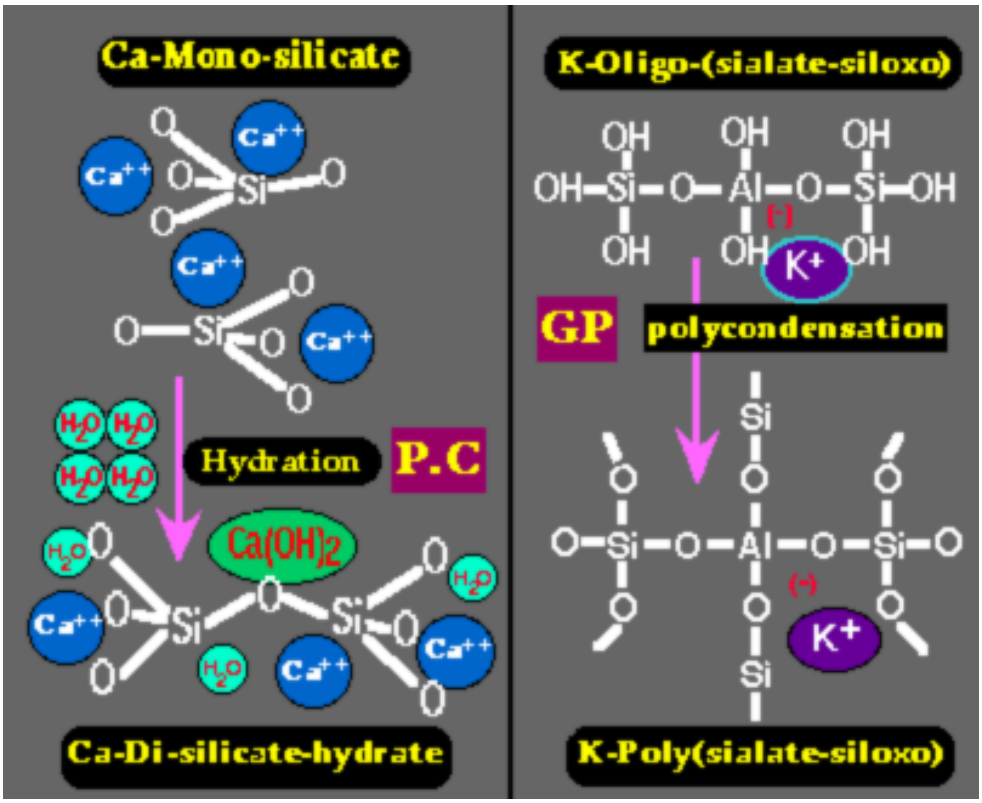


FIGURE I.3 : :Différences fondamentales entre le mécanisme d'hydratation du ciment Portland et la polycondensation des géopolymères

[7].

I.3 Mécanisme de la Géopolymérisation

La géopolymérisation est une réaction chimique exothermique qui se déroule à température modérée (souvent entre 20 et 85 °C). Elle transforme une source solide aluminosilicatée amorphe ou semi-cristalline en un réseau polymérique tridimensionnel par activation en milieu fortement alcalin (pH > 12) [5].

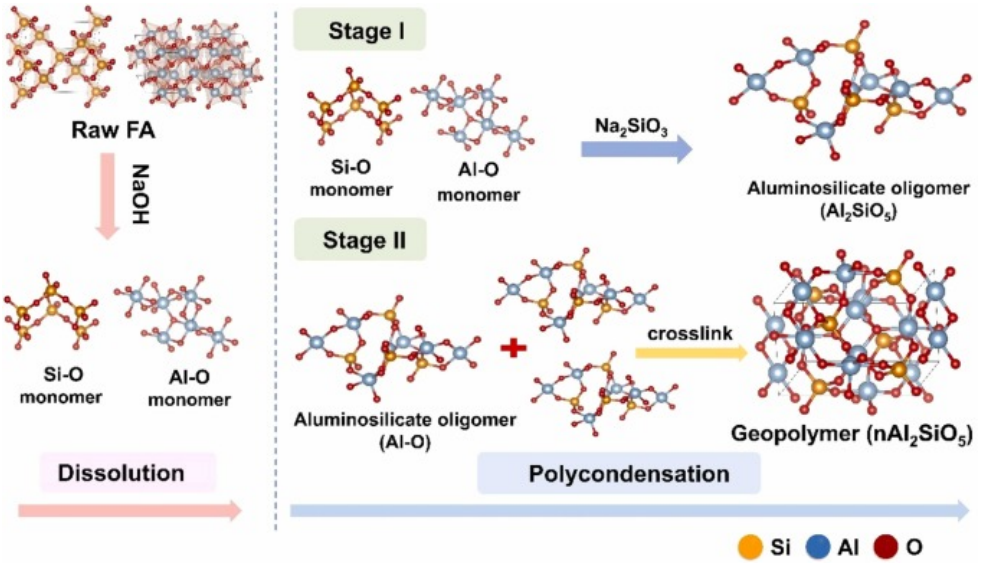


FIGURE I.4 : Mécanisme de géopolymérisation en quatre étapes : dissolution, oligomérisation, polycondensation et durcissement

[6].

I.3.1 Étapes Réactionnelles

La littérature scientifique distingue généralement trois à quatre étapes successives [6] :

1. **Dissolution** : Sous l'action de la solution alcaline, les ions $OH-$ attaquent la surface des particules solides, libérant dans la phase aqueuse des espèces silicatées et aluminatées (sous forme d'anions $SiO4^{4-}$, $Al(OH)4-$, etc.). Cette étape est contrôlée par la concentration en alcalins et la réactivité de la matière première.
2. **Oligomérisation** : Les espèces dissoutes s'associent progressivement pour former des oligomères (dimères, trimères, etc.) par réactions de condensation.
3. **Polycondensation / Gélification** : Les oligomères continuent de se lier entre eux, formant un gel aluminosilicaté tridimensionnel piégeant les cations alcalins (Na+, K+) et l'eau.
4. **Réorganisation / Durcissement** : Le gel évolue vers une structure plus rigide et dense, avec élimination progressive de l'eau résiduelle et développement des résistances mécaniques.

I.3.2 Facteurs Influençant le Mécanisme

La cinétique et le degré d'avancement de ces réactions dépendent de plusieurs paramètres : la température de cure (optimale entre 30 et 85 °C), le temps de cure (souvent 24 heures minimum), le

rapport solide/liquide (W/S optimal entre 0,30 et 0,45), la nature et la concentration de l'activateur alcalin, ainsi que le rapport Si/Al des précurseurs [7]. La taille des cations alcalins influence également la vitesse de gélification [8].

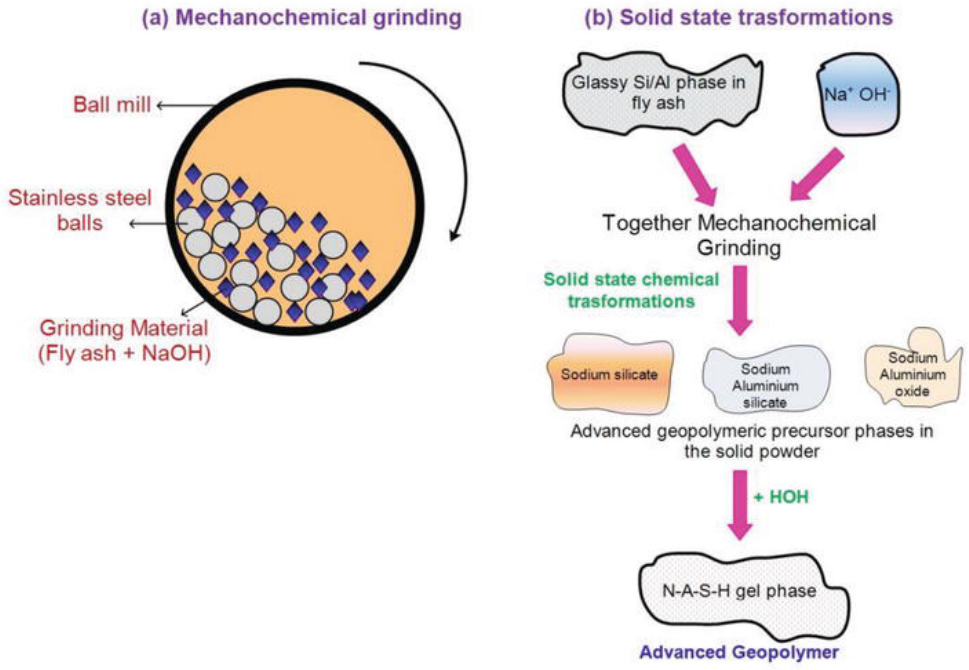


FIGURE I.5 : Facteurs influençant le mécanisme de géopolymérisation : température, concentration, rapport Si/Al

[6].

I.4 Matières Premières et Paramètres Influençant

I.5 Sources Aluminosilicatées

Les géopolymères peuvent être élaborés à partir de nombreuses matières premières, qu'elles soient naturelles ou issues de sous-produits industriels. Les principales sources sont [7] :

— **Métakaolin** : obtenu par calcination du kaolin entre 700 et 850 °C, il constitue un matériau de référence en raison de sa grande pureté et de sa réactivité contrôlée.
— **Cendres volantes** : sous-produit de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, riches en silice et alumine amorphes. Les cendres volantes de classe F (faible teneur en CaO, <6 %) sont les plus adaptées.
— **Laitier de haut fourneau** : déchet de la sidérurgie, riche en calcium, qui accélère la prise à température ambiante.
— **Pouzzolanes naturelles** : roches volcaniques riches en silice amorphe.

— **Déchets de brique** : broyés finement, ils fournissent une source intéressante d'aluminosilicates.

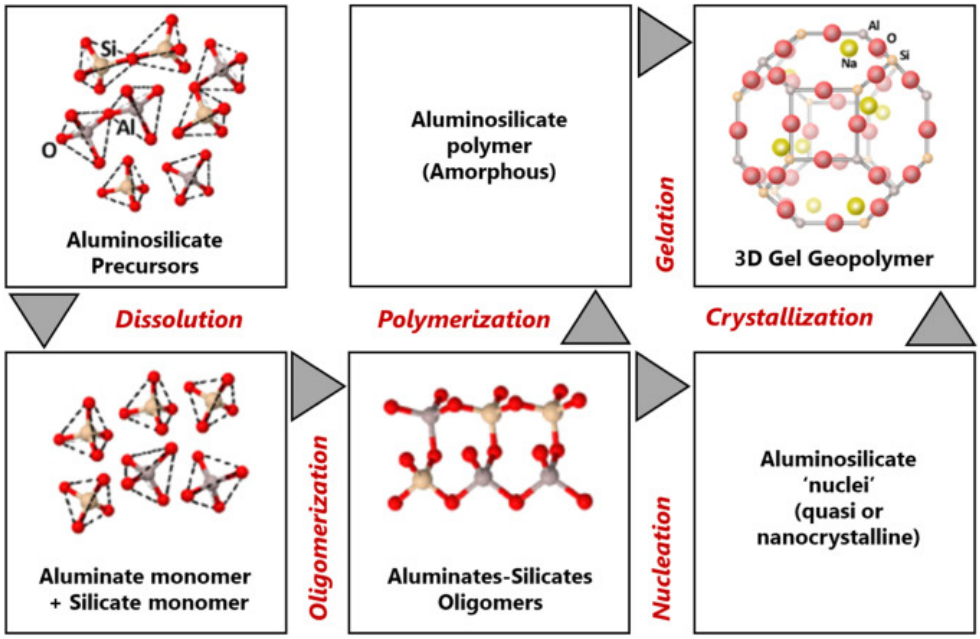


FIGURE I.6 : Sources aluminosilicatées utilisées dans la synthèse des géopolymères [7].

I.5.1 Activateurs Alcalins

La solution activatrice est généralement un mélange d'hydroxyde et de silicate alcalin. Les activateurs les plus courants sont [8, 9] :

— **Hydroxyde de sodium (NaOH)** : généralement utilisé à des concentrations comprises entre 6 M et 14 M.

— **Hydroxyde de potassium (KOH)** : alternative intéressante pour certaines applications.

— **Silicate de sodium (Na2SiO3)** ou verre soluble : apporte des espèces silicatées supplémentaires.

— **Carbonates, sulfates et phosphates alcalins** : moins fréquents mais étudiés pour certaines formulations [10, 11].

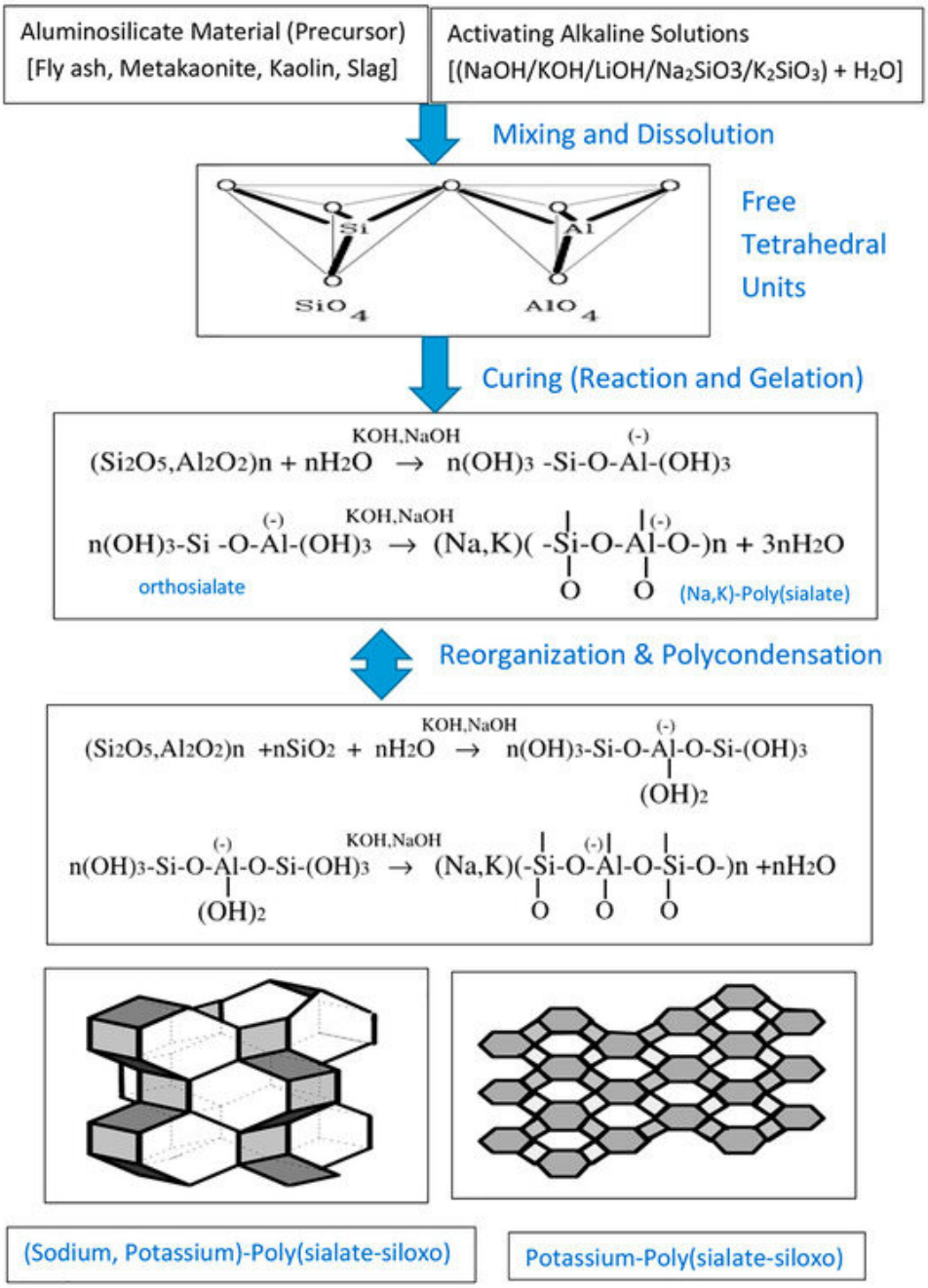


FIGURE I.7 : Activateurs alcalins et leur rôle dans la géopolymérisation [8].

I.5.2 Paramètres de Formulation Critiques

Les propriétés finales du géopolymère dépendent de plusieurs rapports et paramètres [12] :

— **Rapport Si/Al** : facteur le plus déterminant pour la structure et la résistance. Duxson et ses collaborateurs ont montré que la microstructure et les performances mécaniques dépendent fortement de ce rapport.

— **Concentration molaire en NaOH** : une concentration trop faible ralentit la réaction, trop élevée peut précipiter prématurément des espèces indésirables.

— **Rapport silicate/hydroxyde (Na2SiO3/NaOH)** : influence directement la libération des espèces silicatées.

— **Rapport activateur/précurseur (AL/FA)** : les valeurs optimales se situent généralement entre 0,5 et 0,6 pour les cendres volantes.

— **Température et durée de cure** : une cure à 60 °C pendant 24 heures est souvent suffisante pour atteindre des résistances élevées [7].

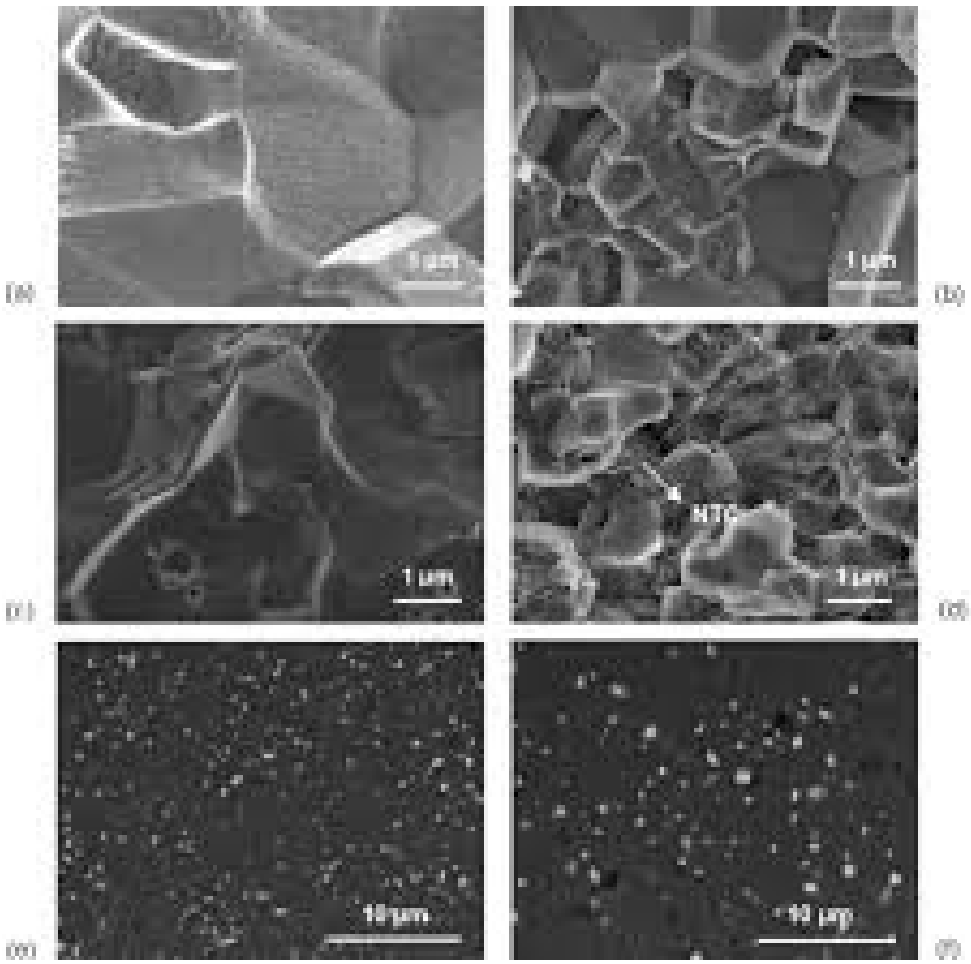


FIGURE I.8 : Paramètres de formulation critiques et leur influence sur les propriétés des géopolymères [12].

I.6 Types et Applications des Géopolymères

La classification la plus courante repose sur la nature du précurseur et du cation alcalin. On distingue ainsi [3, 13] :

— Géopolymères à base de métakaolin (Na- ou K-poly(sialate), poly(sialate-siloxo), etc.) ;

— Géopolymères à base de cendres volantes (majoritairement de classe F) ;
— Géopolymères hybrides (mélange laitier/cendres volantes, laitier/métakaolin, etc.) ;
— Géopolymères à base de déchets de démolition (brique, béton concassé).



FIGURE I.9 : Types de géopolymères et leurs applications [13].

I.6.1 Applications dans le Génie Civil

Les géopolymères ont déjà fait l'objet de réalisations concrètes à grande échelle [14, 15] :

— **Infrastructures de transport** : construction de pistes d'aéroport, dalles routières, ponts cyclables.
— **Éléments préfabriqués** : panneaux de plancher, blocs de construction, tuyaux d'assainissement.
— **Bâtiments** : colonnes, poutres, murs porteurs.
— **Réparations et renforcements** : composites géopolymères pour la réhabilitation d'ouvrages existants.
— **Applications spécialisées** : stabilisation de sols, injection sous dalles, immobilisation de déchets radioactifs ou de métaux lourds.

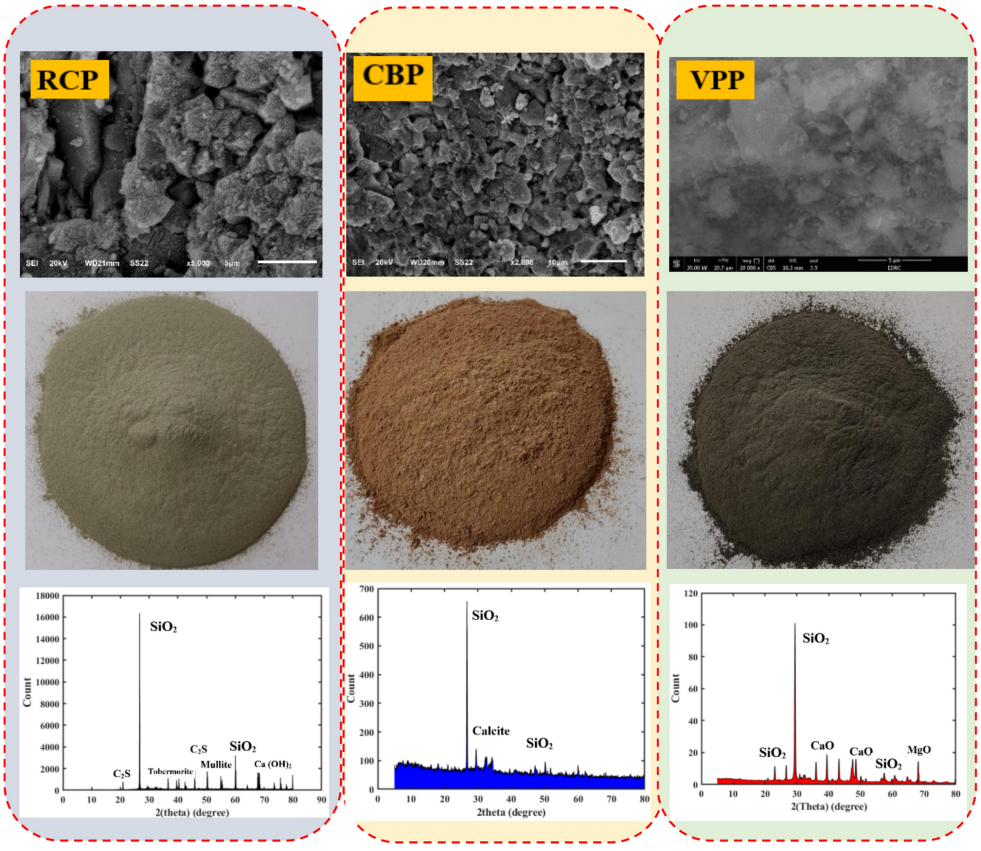
Ces matériaux se distinguent par leur résistance au feu (jusqu'à 1200 °C sans dégradation majeure), leur résistance chimique aux acides et aux sulfates, leur faible retrait et leur prise rapide (atteinte de

l'essentiel de la résistance en 24 heures) [16].

I.7 Valorisation des Déchets de Brique

I.7.1 Problématiques Environnementales

L'industrie de la construction génère chaque année d'énormes volumes de déchets de démolition, parmi lesquels les déchets de brique occupent une place importante. Leur mise en décharge occupe des surfaces précieuses et pose des problèmes environnementaux et économiques [11]. Parallèlement, la fabrication de briques cuites consomme beaucoup d'énergie et émet du CO2. Face à ce double constat, le recyclage des briques usagées apparaît comme une nécessité.



a) b) c)

FIGURE I.10 : Problématiques environnementales et enjeux de la valorisation des déchets de brique [11].

I.7.2 Méthodes de Recyclage dans les Géopolymères

Les déchets de brique broyés finement constituent une source d'aluminosilicates amorphes, ce qui les rend parfaitement adaptés à la synthèse de géopolymères [15]. Plusieurs approches sont possibles [17, 18] :

— Utilisation comme précurseur principal (poudre de brique comme seule source aluminosilicatée) ;
— Utilisation comme granulat fin (sable de brique concassée remplaçant partiellement ou totalement le sable naturel) ;
— Utilisation comme granulat grossier (gravillon de brique pour béton léger) ;
— Mélange avec d'autres précurseurs (laitier de haut fourneau, cendres volantes, etc.) pour améliorer les performances.

Des études récentes montrent que la poudre de brique recyclée (RBP) permet d'obtenir des résistances mécaniques très satisfaisantes, avec des valeurs optimales pouvant atteindre près de 90 MPa lorsque le broyat de brique est associé à du laitier de haut fourneau et activé par une solution alcaline adaptée [11].

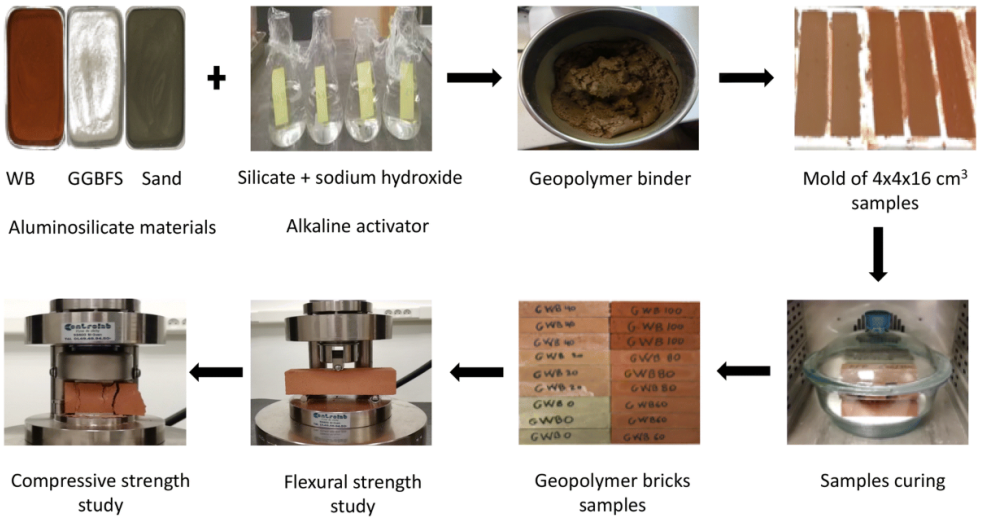


FIGURE I.11 : Méthodes de recyclage des briques dans les géopolymères [17].

I.7.3 Rôle dans l'Économie Circulaire

La valorisation des déchets de brique par géopolymérisation illustre parfaitement les principes de l'économie circulaire. Elle permet [19] :

— De réduire l'enfouissement des déchets de démolition ;

— D'économiser les ressources naturelles (argile pour briques neuves, granulats alluvionnaires) ;

— De limiter les émissions de CO2 liées à la production de matériaux neufs ;

— De créer une valeur ajoutée à partir de matériaux considérés jusqu'alors comme des déchets.

Ce double bénéfice – environnemental et économique – a été confirmé par de nombreux travaux, notamment ceux de Youssef2019 (Youssef2019) qui ont démontré la faisabilité de fabriquer des briques géopolymères performantes à partir de déchets industriels.



FIGURE I.12 : Rôle de la géopolymérisation dans l'économie circulaire [19].

I.8 Fabrication, Propriétés et Recyclage des Briques Géopolymères

I.8.1 Procédés de Fabrication

La fabrication de briques géopolymères se déroule en plusieurs étapes simples [17, 9] :

1. Broyage et tamisage des déchets de brique pour obtenir une poudre fine (et éventuellement des sables et gravillons) ;
2. Mélange à sec des précurseurs solides (poudre de brique, laitier éventuel, sable) ;
3. Préparation de la solution alcaline (mélange de NaOH et de Na2SiO3 dans des proportions définies) ;
4. Malaxage intime de la poudre avec la solution alcaline jusqu'à obtention d'une pâte homogène ;

5. Mise en moule et compactage ;
6. Cure : les échantillons sont conservés à température ambiante ou à température contrôlée (généralement 60 °C pendant 24 h) pour assurer une polycondensation complète.

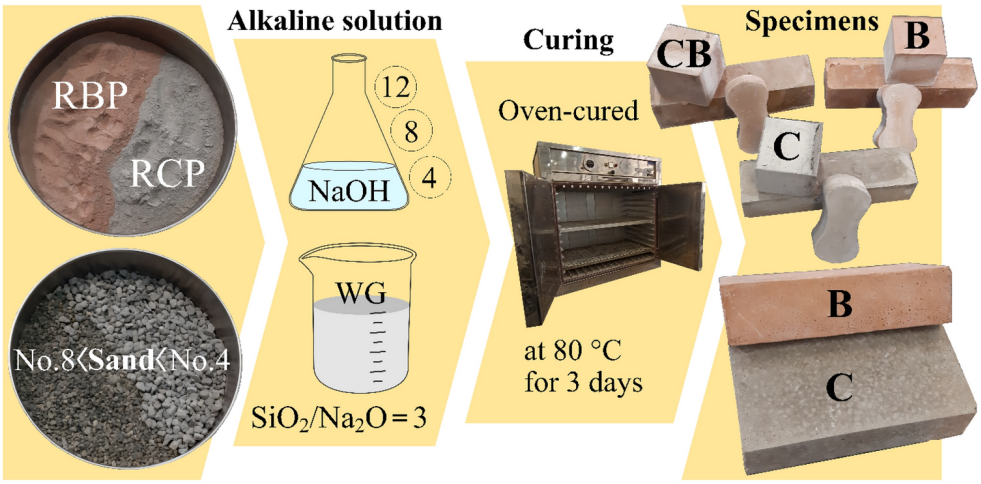


FIGURE I.13 : Procédés de fabrication et propriétés des briques géopolymères [18].

I.8.2 Avantages et Limites

Les avantages des briques géopolymères sont nombreux : fabrication à basse température (voire à température ambiante), consommation énergétique réduite, utilisation de déchets comme matière première, absence de cuisson haute température, bonne résistance mécanique et durabilité [17, 15].

Les principales limites incluent : le coût parfois élevé des activateurs alcalins (NaOH, silicates), la nécessité d'une cure à température contrôlée pour certaines formulations, et la forte alcalinité des mélanges frais imposant des précautions de mise en œuvre [13].

I.8.3 Possibilités de Recyclage en Fin de Vie

Un aspect particulièrement intéressant des géopolymères est leur potentiel de recyclage en fin de vie. Contrairement aux briques cuites classiques, les briques géopolymères peuvent, après broyage, être réactivées pour servir de nouveau précurseur dans un cycle géopolymérique [19]. Des études exploratoires [19, 18] montrent qu'il est possible de substituer partiellement une poudre de brique issue de démolition dans une nouvelle formulation géopolymère sans perte majeure de performance. Ce caractère multi-recyclable constitue un atout supplémentaire dans une logique d'économie circulaire appliquée au bâtiment.

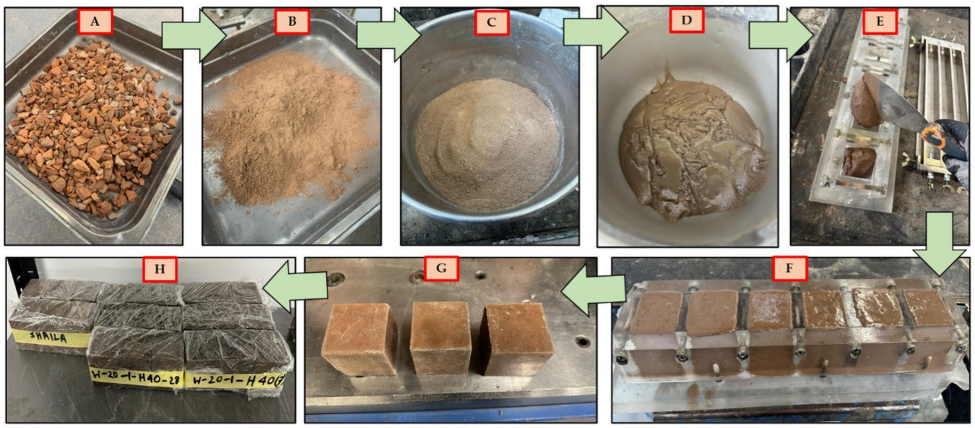


FIGURE I.14 : Cycle de recyclage des briques géopolymères en fin de vie [19].

I.9 La Pouzzolane Naturelle

La pouzzolane naturelle est un matériau silico-alumineux d'origine volcanique possédant une activité pouzzolanique importante grâce à sa structure partiellement amorphe. En présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, elle réagit pour former des composés cimentaires contribuant au développement des propriétés mécaniques des matériaux de construction. En Algérie, la pouzzolane de Beni Saf représente une ressource abondante largement utilisée dans les ciments composés et les liants géopolymères [20]. Sa composition chimique, riche en silice et en alumine, lui confère une bonne réactivité, tandis que sa teneur élevée en oxydes de fer peut influencer négativement les performances mécaniques lorsqu'elle est incorporée à des taux élevés. Dans les mortiers géopolymères, l'ajout modéré de pouzzolane améliore l'ouvrabilité et la fluidité des mélanges frais grâce à sa faible demande en eau, mais une substitution excessive entraîne généralement une diminution de la résistance à la compression. Ainsi, la pouzzolane naturelle constitue un matériau écologique et économique prometteur pour le développement de liants durables, à condition d'optimiser son dosage et sa caractérisation physico-chimique [21].



FIGURE I.15 : Pouzzolane naturelle d'origine volcanique (Beni Saf, Algérie) [21] .

I.10 La Fumée de Silice (Silica Fume)

La fumée de silice, également appelée microsilice, est un sous-produit industriel ultrafin issu de la fabrication du silicium ou des alliages de ferrosilicium dans des fours à arc électrique à haute température (environ 2000 °C). Elle se présente sous forme de particules sphériques amorphes de dioxyde de silicium (SiO2) extrêmement fines, dont la taille moyenne est de l'ordre de 0,1 à 0,2 µm, ce qui lui confère une surface spécifique très élevée et une réactivité chimique exceptionnelle [22].

Grâce à sa nature amorphe et à sa finesse extrême, la fumée de silice est considérée comme une addition pouzzolanique très active. En milieu alcalin, elle réagit avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)2 issu de l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H), responsables de la résistance mécanique et de la durabilité des matériaux cimentaires.

L'action de la fumée de silice dans les bétons repose sur trois mécanismes principaux : effet filler, effet rhéologique et effet pouzzolanique, contribuant à la densification de la matrice et à l'amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité.

Dans les bétons à hautes performances, la fumée de silice est généralement utilisée à des dosages

compris entre 5 et 15 % de la masse du ciment. Son incorporation permet d'augmenter la résistance à la compression, de réduire la perméabilité et d'améliorer la résistance aux agressions chimiques.

En résumé, la fumée de silice est un matériau à haute valeur ajoutée dans le domaine des matériaux cimentaires avancés, permettant d'obtenir des matrices plus denses, plus résistantes et plus durables [22].



FIGURE I.16 : Fumée de silice (microsilice) – micrographie et apparence [22]

I.11 Conclusion

Les géopolymères représentent une avancée majeure dans le domaine des liants alternatifs pour le génie civil. Ils permettent de :

- Réduire drastiquement l'empreinte carbone des constructions (de 50 à 80 % par rapport au ciment Portland) ;
- Valoriser des déchets industriels (cendres volantes, laitier, déchets de brique, etc.), contribuant ainsi à la gestion durable des ressources et à la réduction des mises en décharge ;
- Offrir des performances mécaniques et une durabilité élevées : résistance à la compression comparable au béton traditionnel, tenue au feu exceptionnelle, résistance aux attaques acides et sulfatiques ;
- Se prêter à de nombreuses applications : du bâtiment courant aux infrastructures spécialisées, en passant par la réparation d'ouvrages.

La production de ciment Portland contribue à près de 8 % des émissions mondiales de CO2 [23]. Dans ce contexte, les géopolymères constituent une piste de décarbonation crédible et déjà opérationnelle, comme en témoignent les réalisations concrètes à grande échelle (aéroports, ponts, bâtiments) [14]. La valorisation des déchets de brique dans les géopolymères offre une double opportunité : réduire l'impact environnemental des déchets de démolition et produire des matériaux de construction à faible empreinte carbone [11].

Des efforts restent nécessaires pour généraliser leur usage : réduction du coût des activateurs, développement de formulations durcissant à température ambiante, normalisation des produits géopolymères, et sensibilisation des professionnels du bâtiment. Néanmoins, face à l'urgence climatique, les géopolymères apparaissent comme l'une des solutions les plus prometteuses pour une construction véritablement durable [24, 10].

CHAPITRE II :MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALE

CHAPITRE II
MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALE

II.1 Introduction

Les matériaux occupent une place essentielle dans la vie quotidienne et constituent un élément fondamental de la majorité des objets que nous utilisons. Ils interviennent dans de nombreux domaines tels que la construction, l'industrie manufacturière, l'automobile ainsi que les technologies modernes. Les propriétés des matériaux varient considérablement selon leur nature et leur composition chimique ou structurelle.

Il est donc indispensable de comprendre l'influence de ces propriétés sur leur utilisation. Parmi les caractéristiques les plus importantes à considérer figurent la résistance mécanique, la flexibilité, la conductivité, la densité et la durabilité. L'analyse de ces paramètres permet de déterminer le matériau le plus approprié pour une application donnée.

Dans ce chapitre, nous présentons une description générale des matériaux, incluant leurs propriétés, leurs types ainsi que leurs différentes classifications. Nous exposerons également les méthodes et les procédures expérimentales adoptées dans le cadre de cette étude.

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés :

II.2.1 Poudre Déchet de Brique (Waste brick Powder) :

Les briques sont des éléments de construction, généralement de forme rectangulaire, fabriqués à partir d'argile. Elles peuvent être soit séchées au soleil dans le cas des briques crues, soit cuites au four pour obtenir des briques cuites. Ces matériaux sont largement utilisés dans le domaine du bâtiment, notamment pour la construction des murs.

La préparation de la poudre issue des déchets de briques rouges (voir la Figure II.2) a été réalisée au laboratoire des Travaux Publics de Ghardaïa Sud. Les différentes étapes de préparation de cette poudre sont présentées ci-dessous :



FIGURE II.1 : Poudre déchet de brique(LTPS)

A. Processus de collecte des déchets de briques : La première étape consiste à collecter les déchets de briques provenant de différentes sources, notamment les briqueteries et les chantiers de démolition. En effet, le processus de fabrication des briques génère généralement une quantité importante de rebuts, tels que les briques cassées, fissurées ou non conformes aux normes de qualité.

B. Processus de concassage de brique : Après la phase de collecte, les déchets de briques sont soumis à une série d'opérations mécaniques visant à réduire leur taille. Dans un premier temps, les fragments de briques sont introduits dans un concasseur de pierres afin d'obtenir des granulats de dimensions réduites.

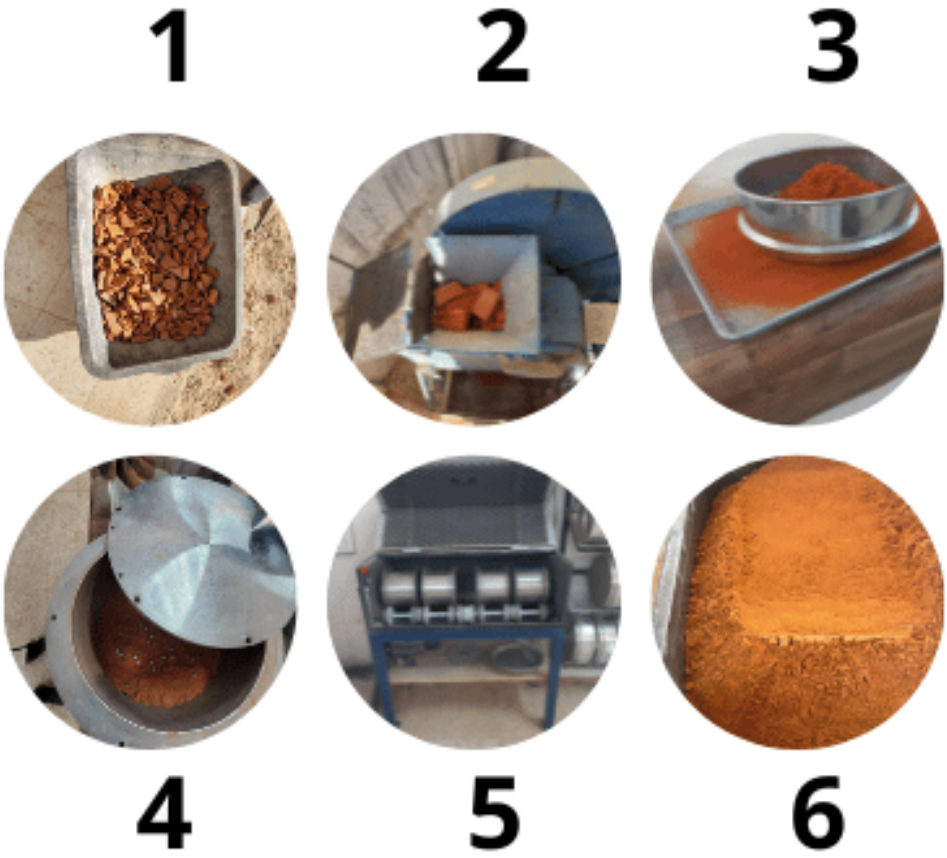


FIGURE II.2 : Étapes de préparation la poudre déchets de briques(LTPS)

II.2.2 Pouzzolane (Pozzolan) :

La pouzzolane est un matériau silico-alumineux d'origine naturelle ou artificielle, possédant des propriétés pouzzolaniques. Elle réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour former des composés cimentaires. Ce matériau est largement utilisé comme ajout minéral dans les bétons et les géopolymères afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité.

La pouzzolane naturelle provient généralement de roches volcaniques riches en silice amorphe, tandis que les pouzzolanes artificielles peuvent être issues de sous-produits industriels tels que les cendres volantes ou les scories.

La préparation de la poudre de pouzzolane (voir la Figure II.3) a été réalisée au laboratoire des Travaux Publics. Les différentes étapes de préparation sont présentées ci-dessous :



FIGURE II.3 : Poudre de pouzzolane(LTPS)

A. Processus de collecte de la pouzzolane : La première étape consiste à collecter la pouzzolane à partir de carrières naturelles ou de dépôts volcaniques. Dans le cas des pouzzolanes artificielles, elles peuvent être récupérées à partir de sous-produits industriels. Le matériau brut est généralement extrait sous forme de blocs ou de fragments de différentes tailles.

B. Processus de concassage et broyage : Après la phase de collecte, la pouzzolane subit des opérations mécaniques de concassage afin de réduire la taille des fragments. Les matériaux sont d'abord introduits dans un concasseur pour obtenir des granulats.

Ensuite, ces granulats sont broyés à l'aide d'un broyeur afin d'obtenir une poudre fine, essentielle pour améliorer la réactivité pouzzolanique. La finesse de la poudre joue un rôle important dans les performances mécaniques du matériau final.



FIGURE II.4 : Étapes de préparation de la poudre de pouzzolane(LTPS)

C. Essai au bleu de méthylène L'essai au bleu de méthylène [NF EN 933-9, 2022], également appelé « test au bleu », est un essai couramment utilisé en géotechnique pour évaluer la propreté des sables, des granulats et des sols, ainsi que pour identifier la présence et la nature des particules argileuses qu'ils contiennent.

L'objectif principal de cet essai est d'estimer la quantité et l'activité de la fraction argileuse présente dans l'échantillon à partir de l'adsorption du bleu de méthylène, phénomène directement lié à la surface spécifique des particules fines.

Mode opératoire :

Dans un premier temps, un échantillon de déchets de briques rouges est préparé puis séché dans une étuve à une température de 110 °C. Après séchage, l'échantillon est tamisé à travers un tamis de 2 mm. La fraction retenue est ensuite pesée afin de déterminer sa masse initiale, notée M_1.

Dans une seconde étape, la suspension est préparée en versant 500 ml d'eau distillée dans un bécher, puis en y introduisant l'échantillon séché. Le mélange est soigneusement agité à l'aide d'une spatule afin d'obtenir une dispersion homogène des particules.

Le bécher est ensuite placé sous un agitateur mécanique fonctionnant à une vitesse de 600 tr/min pendant 5 minutes, puis à une vitesse réduite de 400 tr/min, comme illustré dans la Figure II.5.

Par la suite, des doses successives de solution de bleu de méthylène de 5 cm^3 sont ajoutées

progressivement à la suspension.

Une goutte de la suspension est ensuite prélevée puis déposée sur un papier filtre afin d'observer la formation de l'auréole. Le diamètre de la tache doit être compris entre 8 mm et 12 mm. L'essai est considéré comme positif lorsqu'un halo bleu clair, stable et continu d'environ 1 mm apparaît autour de la tache centrale.

La Figure II.5 présente les différentes étapes expérimentales de l'essai au bleu de méthylène réalisé au laboratoire LTPS.



FIGURE II.5 : Essai au bleu de méthylène réalisé au laboratoire LTPS

II.2.3 Analyse sédimentométrique

La sédimentométrie [NF P 94-057, 1992] est un essai complémentaire à l'analyse granulométrique par tamisage. Elle s'applique principalement aux particules fines dont le diamètre est inférieur à 0,100 mm. L'objectif principal de cet essai est de déterminer la proportion des grains de dimensions inférieures à 80 μm.

La procédure expérimentale débute par la préparation de deux éprouvettes graduées de 2 litres. La

première contient uniquement de l'eau distillée et un défloculant, servant de solution témoin, tandis que la seconde renferme l'échantillon du matériau mélangé à la solution défloculante. Après une période de trempage d'environ 15 heures, destinée à assurer une bonne dispersion des particules fines, la suspension est agitée mécaniquement afin d'obtenir un mélange homogène.

Les lectures hydrométriques sont ensuite réalisées à différents intervalles de temps (0,5 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 minutes, puis après 4 et 23 heures). Le dispositif expérimental ainsi que les différentes étapes de l'essai réalisés au laboratoire LTPS sont illustrés par la Figure II.8.

Les résultats obtenus après correction des lectures hydrométriques sont présentés dans le Tableau II.6, puis exploités pour tracer la courbe sédimentométrique illustrée dans la Figure II.7. Cette courbe met en évidence la répartition des particules fines de la poudre de brique utilisée.

Par ailleurs, la Figure II.6 présente le résultat global de l'essai sédimentométrique obtenu pour le matériau étudié.

FIGURE II.6 : Résultat de l'essai de sédimentométrie(LTPS)

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

. .

ANALYSE
SEDIMENTOMETRIQUE
NFP 94 – 057 Mai 1992

Structure : **U/G**
N° Dossier interne : **RECHERCHE**
Échantillon : **BRIQUE**
Équipements utilisés : **BALANCE/ETUVE**

Lieu de travail : **S$^{CE\ ID}$**
Date : **06.04.2026**
Opérateur :
N° D'inventaire :
L21.09.15/L49.01.91

Température ° C	Temps	Durée de chute	R'=R -1000 R : lecture au densimètre	Correction (C)	Lecture corrigée R1=R'+C Ou R1=R'-C	Diamètre (D)	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon
20°C	**8h10**	**30 ″**	**22**	**+0.000**	**22**	0.075	**100**
20°C	**8h11**	**01'**	**21**	**+0.000**	**21**	0.055	**95**
20°C	**8h12**	**02'**	**20**	**+0.000**	**20**	0.038	**91**
20°C	**8h15**	**05'**	**15**	**+0.000**	**15**	0.025	**68**
19.8°C	**8h20**	**10'**	**14**	**-0.036**	**13.964**	0.017	**63**
19.8°C	**8h30**	**20'**	**14**	**-0.036**	**11.964**	0.012	**54**
19.8°C	**8h50**	**40'**	**12**	**-0.036**	**9.964**	0.008	**45**
19.6°C	**9h30**	**80'**	**10**	**-0.072**	**7.928**	0.006	**36**
19.6°C	**10h50**	**160'**	**08**	**-0.072**	**5.928**	0.004	**27**
19.6°C	**13h30**	**320'**	**06**	**-0.072**	**4.928**	0.003	**22**
20°C	**24 h**	**1440'**	**02**	**+0.000**	**04**	0.002	**18**
20°C	**48h**	-	-	**+0.000**	**02**	0.001	**09**
-	72 h	-	-	-	-	0.0005	-

Remarque :

$$p' = \frac{y}{100} \times p$$ avec y = % du passant à 0.080 mm =**100%**

R1= R' + C Si T° > à 20 ° C
R1= R' - C Si T° < à 20 ° C

L'Opérateur

Visa du responsable

F-5-5b.04

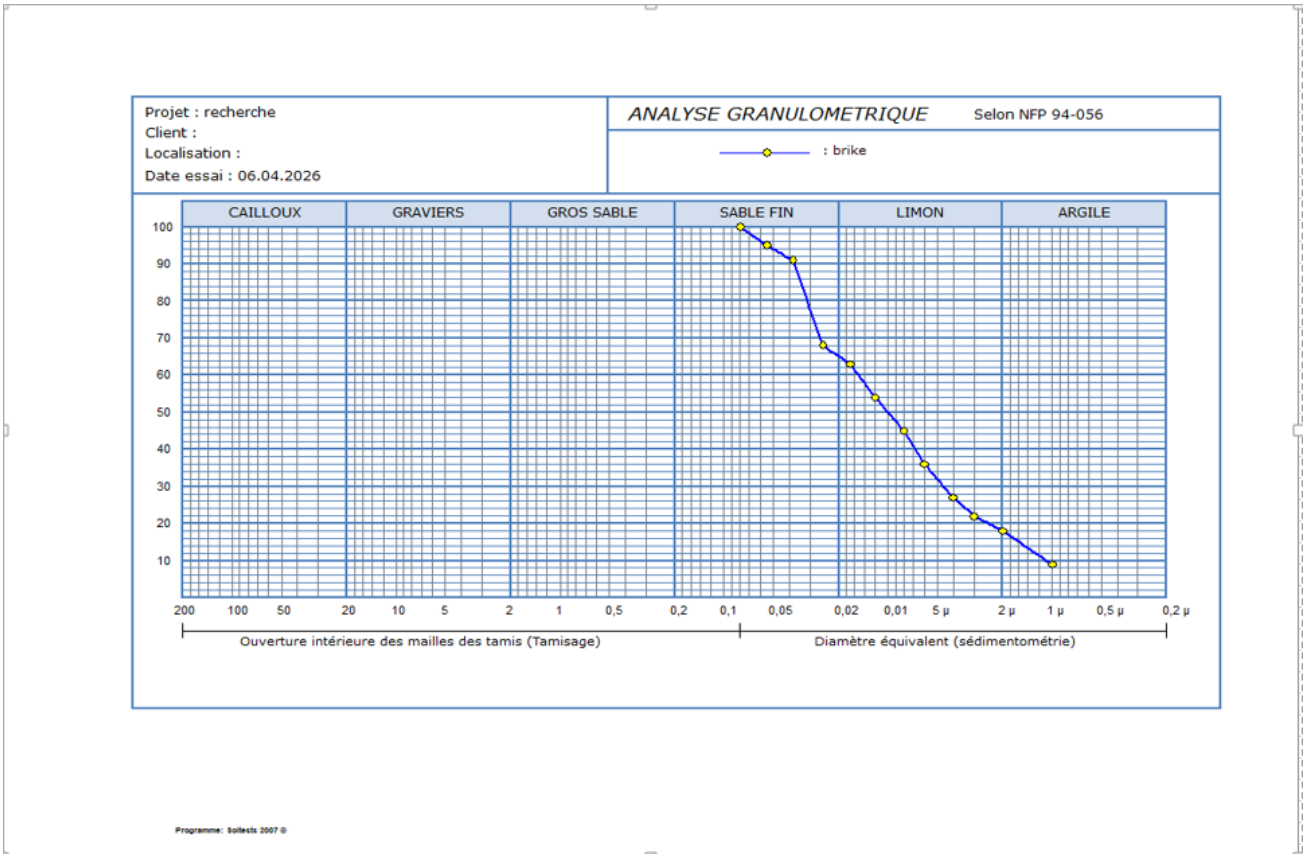


FIGURE II.7 : Courbe granulométrique issue du test de sédimentométrie de la poudre de brique utilisée(LTPS)



FIGURE II.8 : Réalisation de l'analyse sédimentométrique au laboratoire LTPS

II.2.4 Sable

Le sable est un matériau solide granulaire constitué de fines particules issues de la désagrégation de matériaux d'origine minérale, principalement les roches, ou d'origine organique tels que les coquilles et les squelettes de coraux. La taille de ces particules varie généralement entre 0,063 mm (limite des limons) et 2 mm (limite des graviers), conformément à la classification des matériaux granulaires en géologie . Dans le cadre de cette étude, le sable utilisé provient de l'Oued M'Zi, situé dans la région de la ville de Laghouat la **Figure II.9**.



FIGURE II.9 : Sable de oued M'Zi Laghouat

A). Analyse granulométrique L'analyse granulométrique [NF EN 933-1, 2012] est réalisée par tamisage. Elle consiste en une série d'opérations permettant de séparer les particules constituant un échantillon en fonction de leur taille. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une colonne de tamis superposés, dont les ouvertures sont disposées de manière décroissante du haut vers le bas la **Figure II.10**.



FIGURE II.10 : Les tamis utilisé(LTPS)

Objectif de l'essai :

L'objectif de cet essai est de :

— Analyser la granulométrie des particules, dont la taille varie entre 10^{-6} mm et 1000 mm.
— Classer les particules afin de caractériser les différentes dimensions des éléments constituant le sol.
— Établir des courbes granulométriques permettant d'obtenir des informations précises sur la nature et les propriétés du sol étudié.

TABLEAU 2 : Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé (LTPS)

مخبر الأشغال العمومية في جنوب البلاد
LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES GRANULATS
NF P 18- 560 Septembre 1990

Structure: UNITE GHARDAIA
N° Dossier interne: master2
Classe granulaire: SABLE
Prise d'essai: 600 g
Equipement utilisés : BALANCE

Lieu de travail : Service Materiaux
Date : 01/02/2026
Opérateur : recherche
Lieu de Prélevement : sable
N° D'inventaire : -

Ouverture Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant	Observations
80,00					
63,00					
50,00					
40,00					
31.5					
25,00					
20,00					
16,00					
12.5					
10,00					
8,00					
6.3					
5,00	0	0	0,00	100,00	100%
4,00	17,5	17,5	2,92	97,08	97%
3.15					
2.5					
2,00	27,5	45	7,50	92,50	93%
1.60					
1.25					
1,00	49,7	94,7	15,78	84,22	84%
0.80					
0.63					
0.500	212,2	306,9	51,15	48,85	49%
0.400					
0.315					
0.250	208,4	515,3	85,88	14,12	14%
0.200					
0.160					
0.125	73,4	588,7	98,12	1,88	2%
0.100					
0.080	7,4	596,1	99,35	0,65	1%
0,063					

Module de Finesse = 0,00

L'opérateur
recherche

Visa du responsable
etude recherche

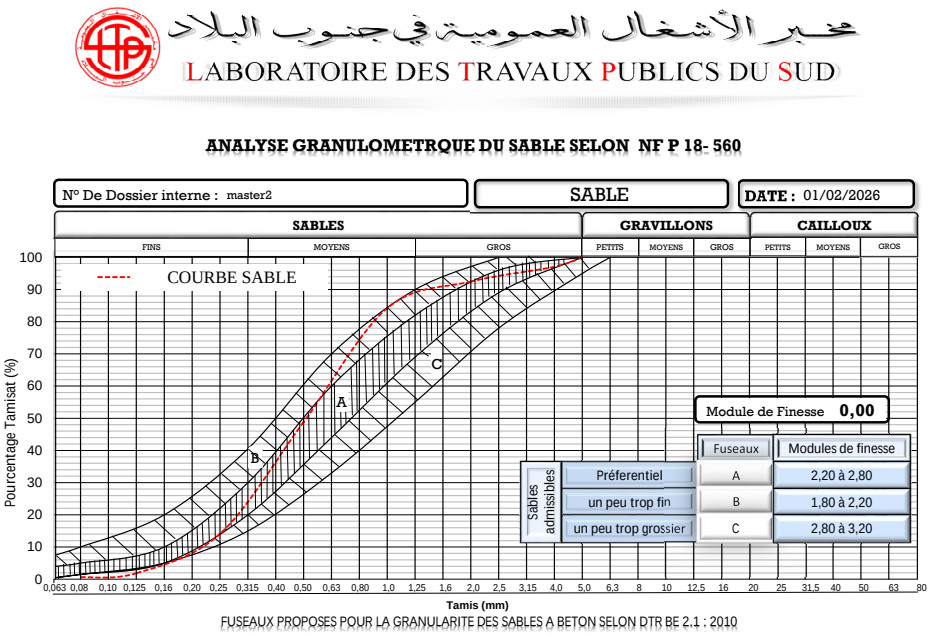


FIGURE II.11 : Courbe granulométrique du sol étudié(LTPS)

B). Equivalent de sable L'essai de l'équivalent de sable [NF EN 933-8, 2012] est une méthode normalisée permettant d'évaluer la propreté des granulats fins (sables ou matériaux concassés), en déterminant la proportion de particules fines ou argileuses présentes dans l'échantillon.

Cet essai est réalisé sur une masse d'échantillon égale à 120 g. Il peut être effectué selon deux méthodes :

— La méthode visuelle,

— La méthode au piston.

Le principe de l'essai repose sur la mesure de deux hauteurs dans une éprouvette :

— h_1 : hauteur correspondant au sable propre additionné des éléments fins,

— h_2 : hauteur correspondant uniquement au sable propre.

L'équivalent de sable (ES) est donné par la relation suivante :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Cet essai permet ainsi de caractériser la qualité du sable et d'évaluer sa teneur en éléments nuisibles.

Tableau 3 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable(LTPS)

Paramètre	Unité	Méthode visuelle	Méthode au piston
H_1	mm	150	155
H_2	mm	88	90
ES (%)	%	58.66	58.06
ES moyen (%)	%	58.36	



Figure II.12 : L'essai de l'équivalent du sable(LTPS)

C1). La masse volumique apparente La détermination de la masse volumique apparente du sable [NF EN 1097-3, 1998] constitue une méthode normalisée permettant de caractériser la densité du matériau dans son état naturel, en tenant compte des vides et des pores présents entre les grains.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Mesure	Masse (g)
P_1	2957.9
P_2	2962.9
P_3	2947.3
P_4	2965.3
Moyenne	**2958.35**

$$M_v = \frac{P}{V} = \frac{2958.35}{2000} = 1.479\ \text{g/cm}^3$$

— P : Masse (ou poids) mesurée en grammes (g).

— V : Volume des agrégats mesuré en centimètres cubes (cm^3).

— M_v : Masse volumique, définie par le rapport entre la masse et le volume :

où :

— P est la masse des agrégats secs,

— V est le volume correspondant.



FIGURE II.13 : La masse volumique apparente

C.2). Masse volumique absolue : Afin de déterminer la masse volumique absolue des granulats [NF EN 1097-6, 2014], un échantillon de sable sec est d'abord prélevé et pesé. Ensuite, le récipient rempli d'eau est également pesé, puis les différentes combinaisons de mesures sont effectuées afin de permettre le calcul du volume déplacé par les agrégats (voir la Figure II.14).

Les résultats expérimentaux obtenus sont regroupés dans le Tableau suivant :

Grandeur	Description	Valeur
P_1	Poids des agrégats secs	350 g
P_2	Poids du récipient plein d'eau	2192.8 g
P_3	$P_1 + P_2$	2394 g
P_4	Poids récipient + agrégats + eau	2410.6 g
V	Volume des agrégats ($P_3 - P_4$)	132.2 cm^3
	Masse volumique	**2.65 g/cm^3**



FIGURE II.14 : Masse volumique absolue.

II.2.5 Le silicate de sodium

La silice représente la forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO_2), largement présente dans la composition de nombreux minéraux. Elle peut exister à l'état libre sous différentes formes, notamment cristallines, amorphes ou encore combinées.

Dans les silicates, les unités de SiO_2 sont associées à divers éléments tels que l'aluminium, le fer, le magnésium, le calcium, le sodium et le potassium. Par ailleurs, la silice amorphe est couramment utilisée comme adjuvant dans la formulation des géopolymères, afin de compenser le manque en oxyde de silicium dans les matières premières aluminosilicatées.

Les solutions de silicate de sodium, également appelées *verre soluble*, sont constituées d'un mélange de Na_2O et de SiO_2 dans des proportions variables. À des concentrations élevées, ces solutions (Na_2SiO_3) se comportent comme une dispersion colloïdale de particules de silicate, de taille comprise entre 1 et 5 nm, au sein d'un milieu aqueux alcalin La figure II.15.

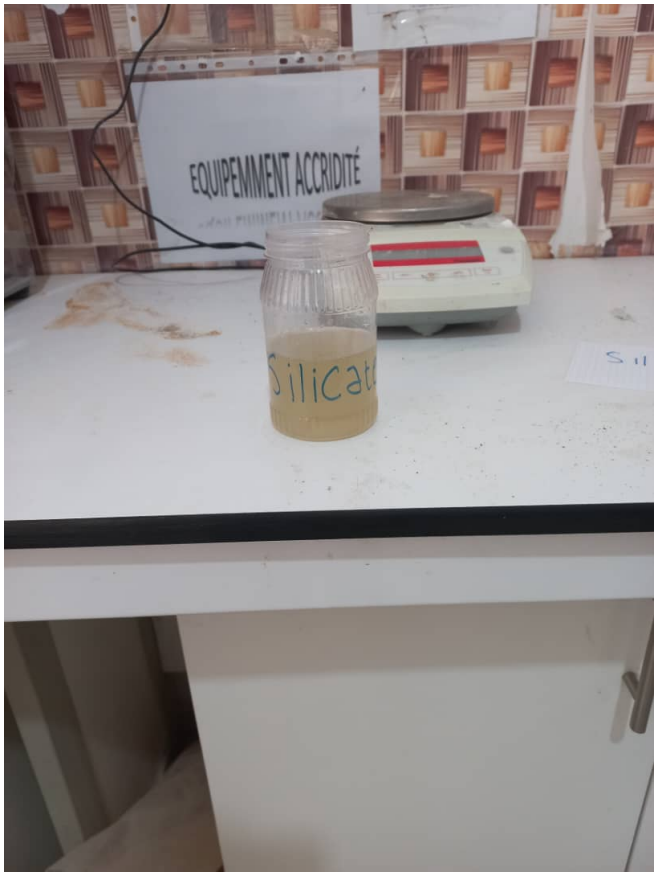


FIGURE II.15 : Le silicate de sodium(LTPS)

II.2.6 Hydroxyde de sodium (NaOH)

En complément des matières premières solides, notamment les aluminosilicates, l'utilisation d'un activateur chimique est indispensable afin d'initier le processus de géopolymérisation. Généralement, les activateurs employés sont des solutions à base d'hydroxydes alcalins ou de silicates alcalins.

Parmi les solutions d'activation les plus simples et les plus couramment utilisées, on retrouve les hydroxydes alcalins tels que l'hydroxyde de potassium (KOH) et l'hydroxyde de sodium (NaOH). Ce

dernier est le plus utilisé en raison de son faible coût, de sa disponibilité et de son efficacité.

Dans cette étude, une solution de NaOH a été préparée au laboratoire LTPS avec deux concentrations différentes, notamment 12 mol/L. La préparation et les manipulations ont été réalisées à l'Université de Ghardaïa.

La figure II.16 illustre le dispositif expérimental utilisé lors de la préparation de la solution.



FIGURE II.16 : Hydroxyde de sodium (NaOH) (Université de Ghardaïa).

II.2.7 Eau de gâchage

Une eau distillée a été utilisée pour la préparation du mortier, afin d'éviter toute influence d'impuretés susceptibles d'altérer les réactions chimiques ou les propriétés finales du matériau.

II.3 Partie expérimentale

II.3.1 Méthode de formulation du mortier géopolymère

Le protocole expérimental suivant a été adopté pour la préparation des mortiers :

— Graisser légèrement les moules afin de faciliter le démoulage, en évitant un excès d'huile pouvant affecter la composition du mortier.

— Préparer l'ensemble des équipements et matériaux nécessaires à la fabrication.

— Effectuer la pesée précise des constituants : sable, déchets de brique, solution alcaline (NaOH à 12 mol), silicate de sodium (SiO_2) et eau distillée.La figure II.17

TABLEAU 4 : Quantités des matériaux utilisés pour les 15 échantillons(LTPS)

Mélange	**Pouzzolane (g)**	**Brique (g)**	**Fumée de silice (g)**	**Sable (g)**	**NaOH (g)**	**Na_2SiO_3 (g)**	**Eau (g)**
M0	0	450	0	1050	93	294	50
SF5	0	428	22	1050	93	301	45
SF10	0	405	45	1050	93	308	40
SF15	0	383	67	1050	93	315	35
P5	22	428	0	1050	93	294	50
P10	45	405	0	1050	93	294	50
PF10	405	0	45	1237,5	95	320	30
PF20	360	0	90	1237,5	95	320	30
PF30	315	0	135	1237,5	95	320	30
PBF10	360	45	45	1237,5	95	320	30
PBF20	315	90	45	1237,5	95	320	30
PBF30	270	135	45	1237,5	95	320	30
PB10	405	45	0	1237,5	95	320	30
PB20	360	90	0	1237,5	95	320	30
PB30	315	135	0	1237,5	95	320	30



FIGURE II.17 : Moule normalisé de 40x40x160 mm à LTPS.

A) Malaxage Le malaxage constitue une étape fondamentale qui influence directement l'homogénéité et la qualité finale du mortier.

La procédure suivie est décrite comme suit :

— Introduire le sable, les déchets de brique ainsi que le matériau pouzzolanique dans le malaxeur, puis mélanger pendant 1 minute à vitesse lente afin d'assurer une distribution homogène des constituants secs.
— Ajouter progressivement la solution alcaline (NaOH et SiO_2) tout en poursuivant le mélange pendant 1 minute à vitesse lente, permettant l'activation initiale des réactions géopolymériques.
— Incorporer l'eau distillée et continuer le malaxage pendant 1 minute afin de favoriser l'hydratation et la cohésion du mélange.
— Arrêter le malaxeur pour racler soigneusement les parois et le fond de la cuve (30 s à 1 min) afin d'éviter toute hétérogénéité locale.
— Reprendre le malaxage pendant 1 minute à vitesse rapide afin d'obtenir un mélange parfaitement homogène et activé.
— Verser immédiatement le mortier dans les moules pour éviter toute prise prématurée.



FIGURE II.18 : Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier [service de Béton –LTPS].

B) Moulage des éprouvettes Après le malaxage, le mortier est introduit dans les moules en utilisant une spatule. Les moules sont ensuite placés sur une table à chocs (60 chocs) afin d'assurer une bonne compacité. L'excédent de mortier est retiré à l'aide d'une règle métallique.



FIGURE II.19 : Le moule est rempli et installé sur la table d'impact (LTPS)

C) Démoulage des éprouvettes Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures, puis placées dans une étuve à 70°*C* pendant des durées variant selon les échantillons.



FIGURE II.20 : Démoulage les échantillons(LTPS).

II.3.2 Essai de traction par flexion

L'essai de flexion [NF EN 196-1, 2016] est réalisé sur des éprouvettes prismatiques âgées de 30 jours. Une charge est appliquée au centre de l'éprouvette, reposant sur deux appuis, jusqu'à rupture.





FIGURE II.21 : Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion(LTPS)

II.3.3 Essai de compression

Les essais de compression [NF EN 196-1, 2016] sont effectués après 30 jours à l'aide d'une presse. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à rupture, et la résistance est déterminée à partir de la charge maximale enregistrée.



FIGURE II.22 : Dispositif de rupture en compression(LTPS)

II.3.4 Vitesse ultrasonique

Cet essai non destructif [NF EN 12504-4, 2021] permet d'évaluer la compacité, l'homogénéité et la qualité du mortier en mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques :

$$V = \frac{L}{t}$$

où V est la vitesse de l'onde, L la distance parcourue et t le temps mesuré.

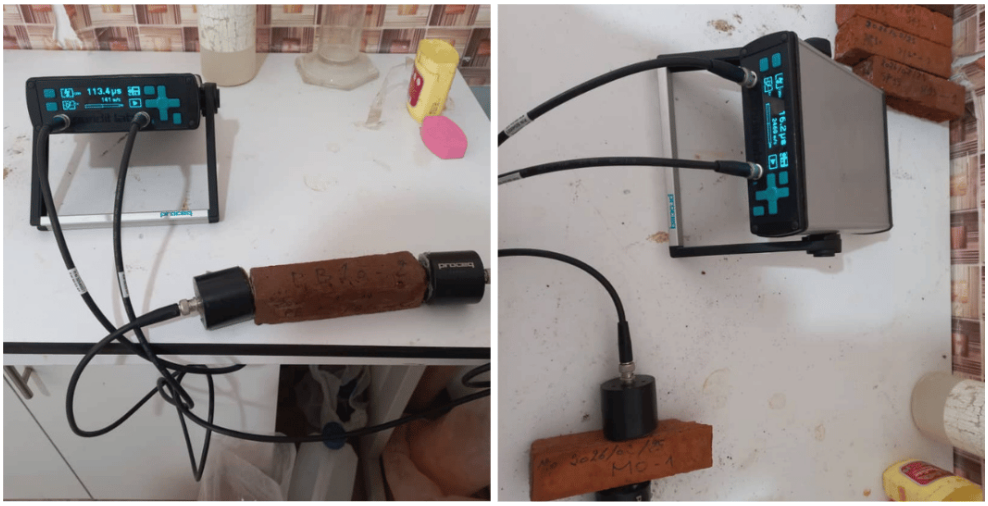


FIGURE II.23 : Dispositif ultrason(LTPS)

II.3.5 Absorption capillaire

L'absorption capillaire [NF EN 1015-18, 2003] est déterminée en mesurant la variation de masse des échantillons immergés partiellement dans l'eau :

$$W = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100$$

où :

— W : taux d'absorption (%)

— M_t : masse à l'instant t

— M_0 : masse sèche initiale



FIGURE II.24 : Absorption capillaire (LTPS)

II.3.6 Porosité accessible à l'eau

La porosité [NF P 18-459, 2010] est déterminée selon la relation suivante :

$$P = \frac{M_{sa} - M_d}{M_{sa} - M_{sw}} \times 100$$

où :

— M_{sa} : masse saturée à l'air

— M_d : masse sèche

— M_{sw} : masse saturée sous l'eau



FIGURE II.25 : Montage pour la mesure de la porosité accessible à l'eau à Université de Ghardaia

II.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les matériaux utilisés ainsi que les méthodes expérimentales adoptées. Le protocole de fabrication du mortier géopolymère à base de déchets de brique a été détaillé, ainsi que les essais réalisés pour évaluer ses propriétés physiques (densité, porosité, absorption capillaire) et mécaniques (résistance à la compression et à la flexion), en fonction de la concentration de NaOH .

CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE III
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus sur les mortiers géopolymères élaborés dans le cadre de cette étude. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de la composition des mélanges ainsi que des conditions de cure thermique sur le comportement physique et mécanique des matériaux.

Les essais réalisés couvrent à la fois les propriétés à l'état frais et à l'état durci. Ils incluent notamment l'observation de l'aspect visuel, l'évaluation de l'ouvrabilité, ainsi que la caractérisation des propriétés physiques telles que la masse volumique, la porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire. En parallèle, une analyse des performances mécaniques est effectuée à travers les essais de résistance à la compression et de résistance à la traction par flexion, complétée par des mesures de vitesse ultrasonique permettant d'apprécier la qualité interne et l'homogénéité des échantillons.

L'ensemble des résultats est présenté sous forme de tableaux et de représentations graphiques, puis interprété de manière approfondie afin de mettre en évidence les tendances générales et les différences entre les différentes formulations étudiées (PF, PBF, SF, PB, etc.). Une attention particulière est accordée à la relation entre la microstructure du matériau (porosité, compacité, homogénéité) et ses performances globales.

Enfin, cette analyse vise à identifier les formulations les plus performantes et à mieux comprendre les mécanismes gouvernant le comportement des mortiers géopolymères, en mettant en évidence l'effet du dosage des ajouts et des conditions de cure sur les propriétés finales du matériau.

III.2 Aspect visuel

Les premières observations visuelles des échantillons de mortier géopolymère, réalisées aux premiers jours de cure, mettent en évidence une évolution progressive et continue de la structure. Cette évolution traduit le développement graduel du réseau géopolymérique, comme illustré sur la figure III.1.

Au début du processus, les échantillons présentent généralement un aspect humide et relativement homogène, avec une couleur encore instable liée à la présence des réactifs alcalins et de l'eau libre. Avec le temps de cure, on observe une diminution progressive de la brillance de surface, accompagnée d'un début de rigidification du matériau.

Par la suite, la matrice devient plus compacte et cohésive, indiquant l'avancement des réactions de polycondensation. Des changements subtils de teinte et de texture peuvent également apparaître, reflétant la formation du gel géopolymérique et la stabilisation de la microstructure. Aucun défaut majeur tel que des fissures importantes n'est généralement observé à ce stade précoce, ce qui confirme un bon démarrage du processus de prise.



FIGURE III.1 : présente des images de mortier geopolymère(LTPS)

III.3 Propriétés à l'état frais

L'essai de l'étalement est un test important qui évalue les propriétés à l'état frais des mortiers. Figure III.2 présente les résultats du diamètre de l'étalement des mortiers géopolymères

confectionnés.

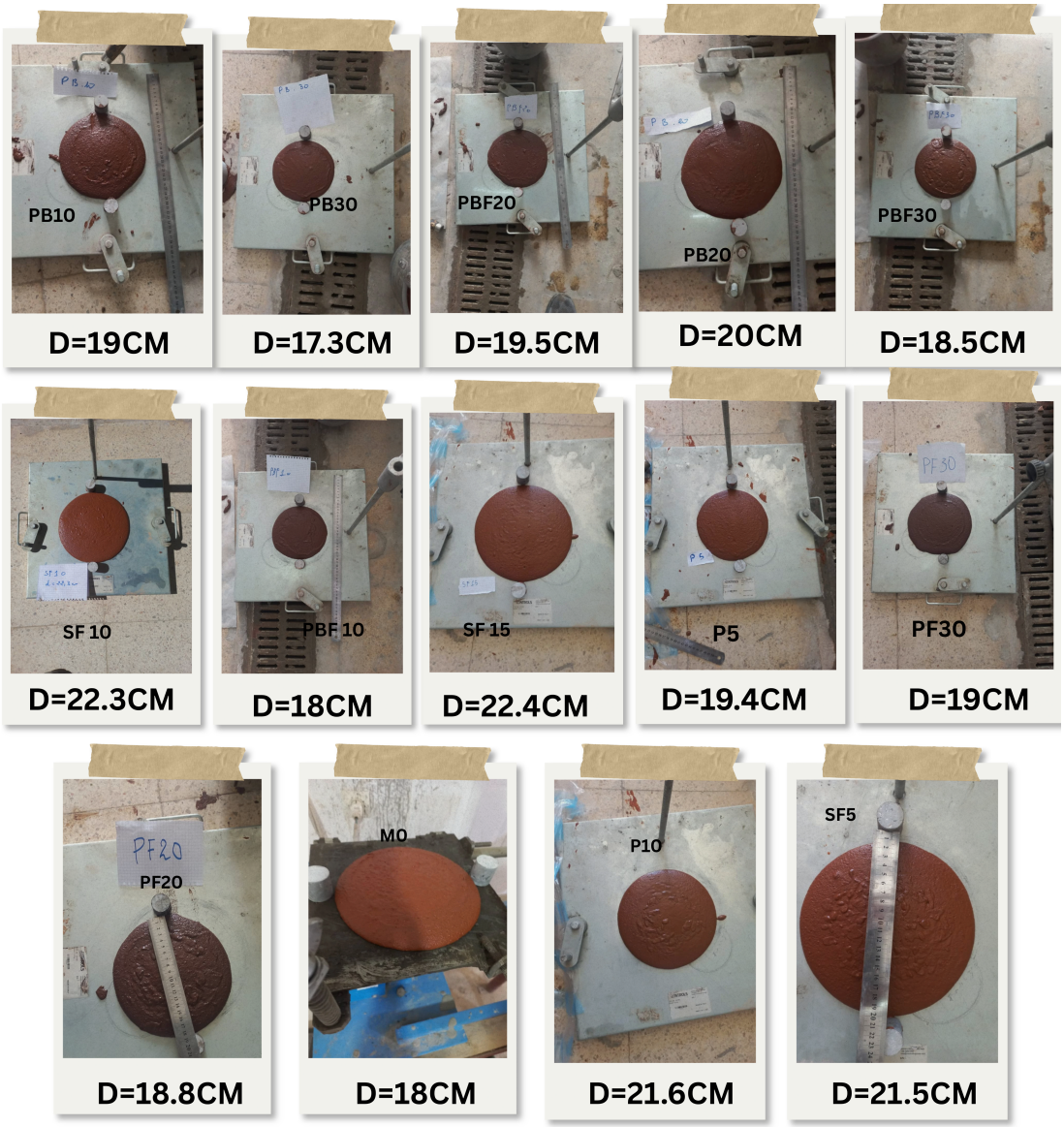


FIGURE III.2 : Propriétés à l'état frais (LTPS)

III.4 Masse volumique

Comme présenté dans le Tableau 5 et illustré par la Figure III.3, l'analyse de la masse volumique apparente des échantillons de géopolymères met en évidence l'évolution de leur microstructure au cours du durcissement. Les valeurs mesurées varient entre 1.7296 g/cm^3 (PF10) et 1.9514 g/cm^3 (FB20), tra-

duisant une dispersion liée aux différences de porosité, de compacité et de degré de géopolymérisation.

La densité moyenne, d'environ 1.86 g/cm^3, reste dans l'intervalle typique des géopolymères, indiquant une structure globalement homogène. Toutefois, les écarts observés révèlent une hétérogénéité liée aux conditions de formulation et à la répartition des constituants.

Les faibles densités (PF10, SF15) correspondent à une porosité plus élevée et à une structure moins compacte, souvent associée à des performances mécaniques réduites. À l'inverse, les fortes densités (FB20, PF30, FB10) traduisent une matrice plus dense et mieux consolidée, donc plus performante mécaniquement.

L'analyse par familles d'échantillons montre que les compositions FB sont globalement plus denses, tandis que les séries PF présentent une variabilité plus importante. Les échantillons SF affichent des densités plus faibles, indiquant une structure plus poreuse.

Enfin, une corrélation directe est observée entre densité et résistance mécanique : une densité élevée implique une meilleure compacité et donc de meilleures performances mécaniques. Cependant, certaines valeurs faibles doivent être interprétées avec prudence car elles peuvent être liées à des défauts de fabrication ou à des microfissures.

Tableau 5 : Densité des échantillons(LTPS)

Échantillon	**Densité (g/cm^3)**
FB10_1	1.9302
FB30_3	1.9041
FB20_1	1.9514
FBP10_2	1.8305
PBF20_3	1.8294
PF30_1	1.9371
SF15_3	1.7850
SF_5	1.8410
M0_2	1.8514
PF10_1	1.7741
PF20_2	1.9105
P10_1	1.8674
P5_2	1.9291
PF10_1	1.7296
PBF30_1	1.8712

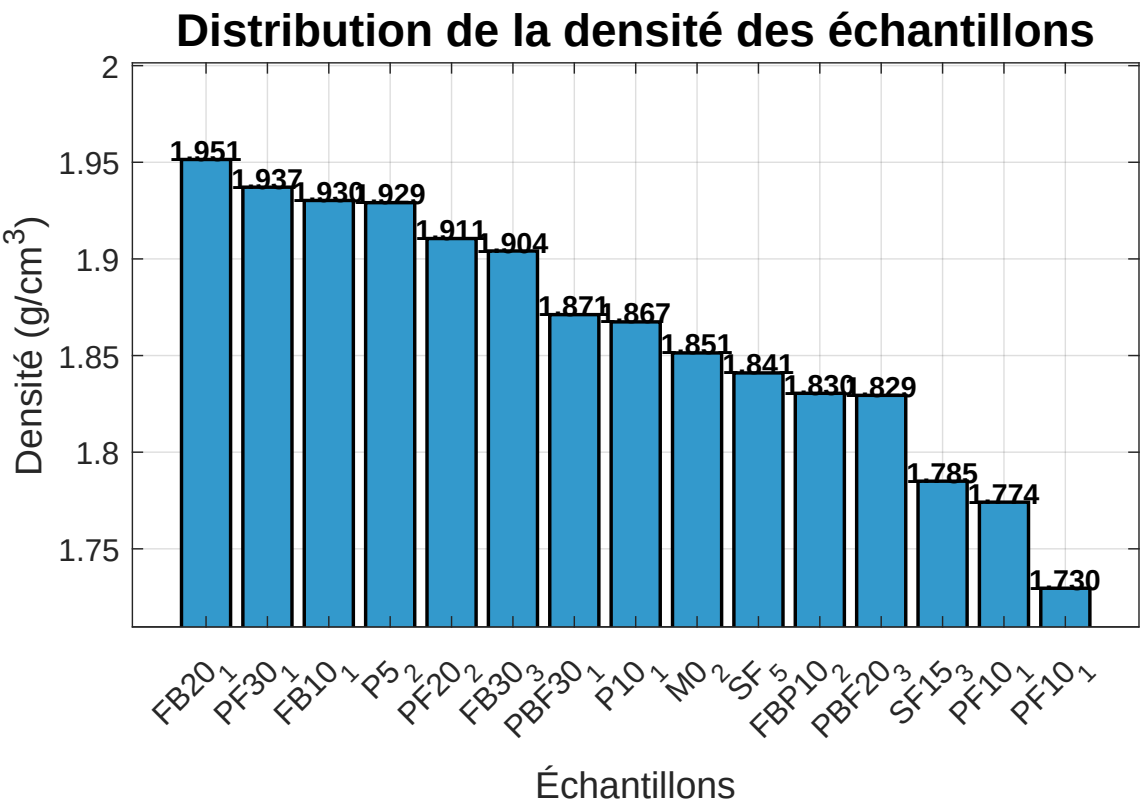


FIGURE III.3 : Distribution de la densité des échantillons(LTPS)

III.5 Résistance à la compression

Les résultats présentés dans le tableau 6 et illustrés par la figure III.4 mettent en évidence une variabilité significative de la résistance à la compression des différentes formulations après 30 jours de cure, avec des valeurs comprises entre 10.5 kN et 46 kN. Cette dispersion traduit l'influence déterminante de la nature et du dosage des ajouts sur les performances mécaniques des mortiers géopolymères.La formulation PF10 se distingue nettement par la résistance la plus élevée (46 kN), indiquant une amélioration notable de la structure interne, probablement liée à une optimisation du processus de géopolymérisation et à une réduction de la porosité. En revanche, les formulations à base de PB présentent globalement les plus faibles performances (entre 10.5 kN et 16 kN), suggérant un effet défavorable de cet ajout, possiblement dû à une faible réactivité ou à une augmentation de la porosité.L'analyse par famille montre que les formulations PBF (PBF10, PBF20, PBF30) offrent un comportement relativement stable avec des résistances comprises entre 30 kN et 32 kN, traduisant une bonne homogénéité et une efficacité modérée de cet ajout. Concernant les formulations PF, un comportement non linéaire est observé : alors que PF10 présente une performance exceptionnelle, une diminution notable est constatée pour PF20 (20 kN), suivie d'une légère amélioration pour PF30 (25.5 kN). Cela met en évidence l'existence d'un dosage optimal autour de 10 %. Par ailleurs, les formulations SF montrent une amélioration progressive

avec l'augmentation du taux d'incorporation, passant de 18 kN (SF5) à 26 kN (SF15).Comparativement à l'échantillon de référence M0 (20 kN), plusieurs formulations, notamment PF10 et les compositions PBF, présentent des performances supérieures, confirmant l'effet bénéfique de certains ajouts lorsqu'ils sont utilisés à des proportions optimales. Globalement, ces résultats soulignent l'importance du choix du type d'ajout et de son dosage dans l'optimisation des propriétés mécaniques des matériaux géopolymères.

Tableau 6 : Résistance à la compression des échantillons après 30 jours de cure(LTPS)

Échantillon	**C (KN) à 30 jours**
PBF20	30.0
SF5	18.0
PBF10	31.0
PF20	20.0
PF30	25.5
PF10	46.0
PB20	15.0
PB10	16.0
SF15	26.0
PB10	10.5
PB30	11.0
M0	20.0
PBF30	32.0
SF10	16.5
P5	18.0

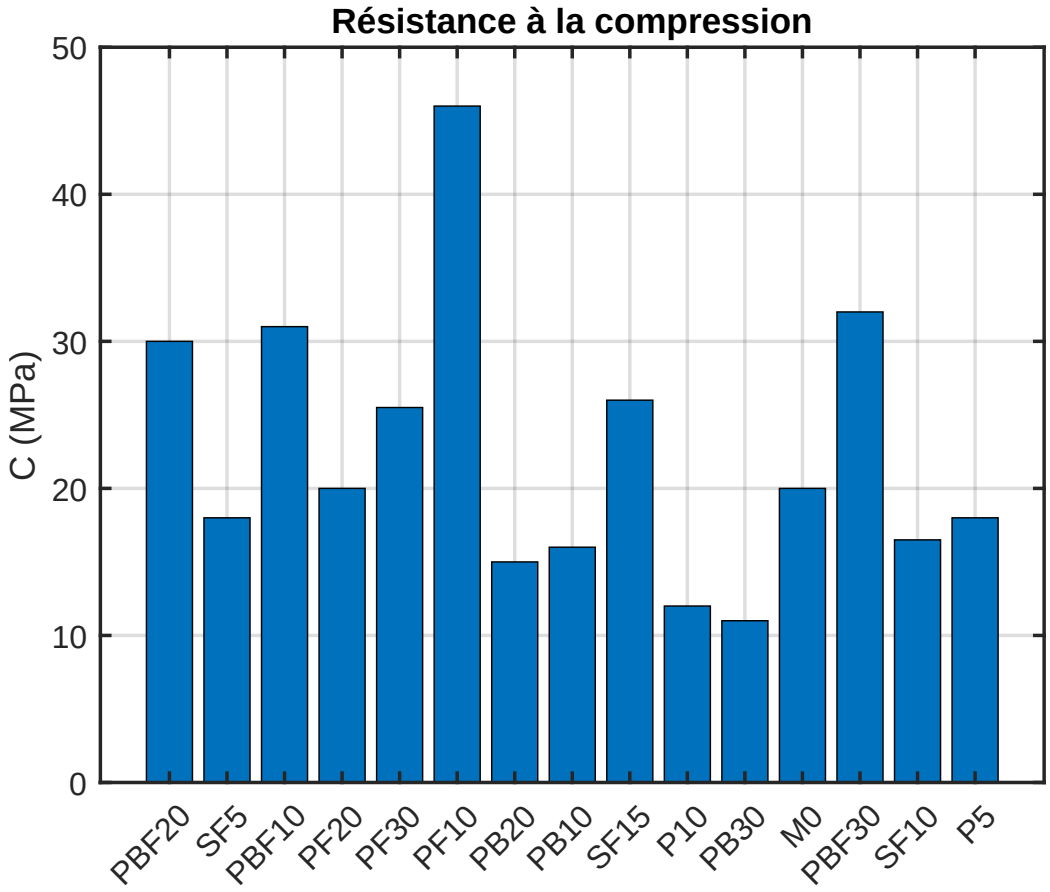


FIGURE III.4 : Résistance à la compression(LTPS)

III.6 Vitesse ultrasonique

Les résultats présentés dans le tableau et illustrés par la figure III.5 mettent en évidence une variation notable des vitesses ultrasoniques mesurées à 4 cm et 16 cm pour les différentes formulations. Ces vitesses, directement liées à la compacité, à l'homogénéité et au degré de porosité des matériaux, varient de manière significative selon la nature et le dosage des ajouts.

À 4 cm, les valeurs les plus élevées sont enregistrées pour les formulations PF10 (3704 m/s), PF20 (3175 m/s) et PF30 (3150 m/s), indiquant une structure interne dense et relativement homogène. En revanche, certaines compositions telles que PBF10 (1333 m/s) et P10 (1747 m/s) présentent des vitesses faibles, traduisant une porosité plus importante ou une structure moins compacte.

À 16 cm, une évolution différente est observée. La formulation PF30 atteint la valeur la plus élevée (3931 m/s), suivie de PBF20 (3397 m/s), ce qui suggère une amélioration de la propagation des ondes ultrasoniques dans des structures mieux consolidées en profondeur. En revanche, certaines formulations comme PF10 montrent une chute importante de la vitesse (1248 m/s), indiquant une

hétérogénéité interne ou la présence de défauts structurels affectant la transmission des ondes.

L'analyse comparative révèle ainsi un comportement non linéaire entre les mesures à 4 cm et 16 cm. Certaines formulations (PBF20, PF30) montrent une amélioration de la compacité interne avec la profondeur, tandis que d'autres (PF10, PB10) présentent une dégradation, suggérant une distribution non uniforme de la porosité ou des défauts internes.

Comparativement à l'échantillon de référence M0 (2469 m/s à 4 cm et 2685 m/s à 16 cm), certaines formulations offrent des performances supérieures, notamment PF30 et PBF20, confirmant l'effet bénéfique de certains ajouts sur la densification du matériau. Globalement, ces résultats mettent en évidence l'importance du type d'ajout et de son dosage dans l'amélioration de la qualité interne et de l'homogénéité des mortiers géopolymères, telle qu'évaluée par les essais ultrasoniques.

Tableau 7 : Comparaison des vitesses ultrasoniques mesurées à 4 cm et 16 cm(LTPS)

Échantillon	**Vitesse (m/s)**	**Vitesse (m/s)**
PF30	3150	3931
PB10	2353	1713
PB20	2899	2207
PB30	2439	2332
PBF10	1333	2694
PBF20	3101	3397
PBF30	2837	2108
PF10	3704	1248
PF20	3175	2279
SF5	2500	1818
SF10	2899	2054
SF15	2649	1963
P5	2740	2556
P10	1747	1822
M0	2469	2685

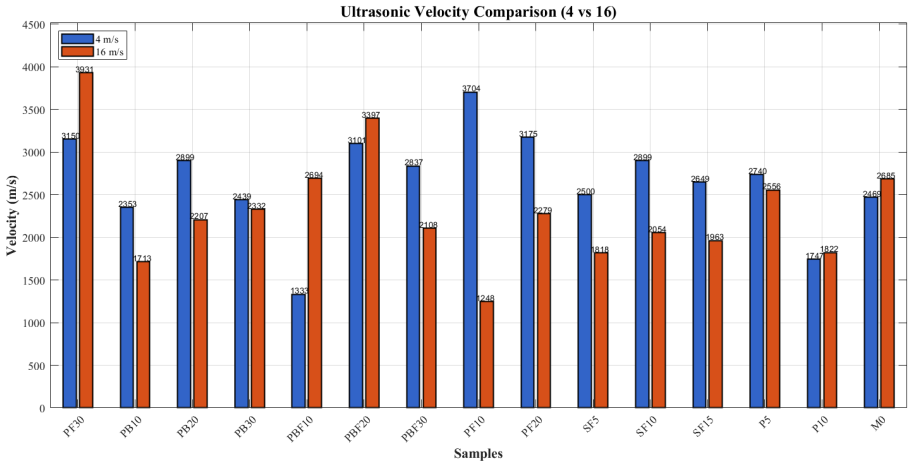


FIGURE III.5 : Comparaison des vitesses ultrasoniques(LTPS)

III.7 Résistance à la traction par flexion

Les résultats présentés dans le tableau 8 et illustrés par la figure III.6 mettent en évidence une variabilité notable de la résistance à la traction par flexion des différentes formulations après 30 jours de cure. Les valeurs mesurées varient entre 1.30 kN et 3.50 kN, ce qui traduit l'influence significative de la nature et du dosage des ajouts sur le comportement mécanique en flexion des mortiers géopolymères.

Les formulations PBF20 (3.50 kN) et PBS20 (3.48 kN) présentent les meilleures performances, suivies de PBF30 (3.20 kN), indiquant une amélioration de la cohésion interne et une meilleure capacité du matériau à résister aux contraintes de traction. Ces résultats suggèrent une interaction favorable entre les constituants, conduisant à une microstructure plus homogène et moins sujette à la propagation des fissures.

À l'inverse, les formulations à base de PB, notamment PB30 (1.30 kN), PB20 (1.60 kN) et PB10 (1.80 kN), présentent les valeurs les plus faibles, traduisant une résistance limitée à la fissuration et une structure interne moins performante. Les formulations SF et PF montrent des performances intermédiaires, avec une certaine variabilité liée au dosage. Par exemple, SF10 et PF10 atteignent des valeurs de l'ordre de 2.50 kN, indiquant une amélioration modérée par rapport à certaines autres compositions.

Comparativement à l'échantillon de référence M0 (1.80 kN), plusieurs formulations, notamment celles à base de PBF et PBS, présentent des performances nettement supérieures, confirmant l'effet bénéfique de ces ajouts sur les propriétés mécaniques en flexion. En revanche, certaines compositions, en particulier celles riches en PB, n'apportent pas d'amélioration significative.

Globalement, ces résultats mettent en évidence l'importance du choix du type d'ajout et de son dosage dans l'optimisation de la résistance à la traction par flexion. Une formulation adaptée permet d'améliorer la cohésion du matériau et de limiter la propagation des microfissures, contribuant ainsi à de meilleures performances mécaniques globales.

Tableau 8 : Résistance mécanique des échantillons après 30 jours de cure(LTPS)

Échantillon	**F (KN) à 30 jours**
PBS20	3.48
SF5	1.9
PBF20	3.50
PF30	2.40
PF30	3.00
PF10	2.50
PB20	1.60
PB10	1.80
SF05	2.45
P10	1.65
PB30	1.30
M0	1.80
PBF30	3.20
SF10	2.50

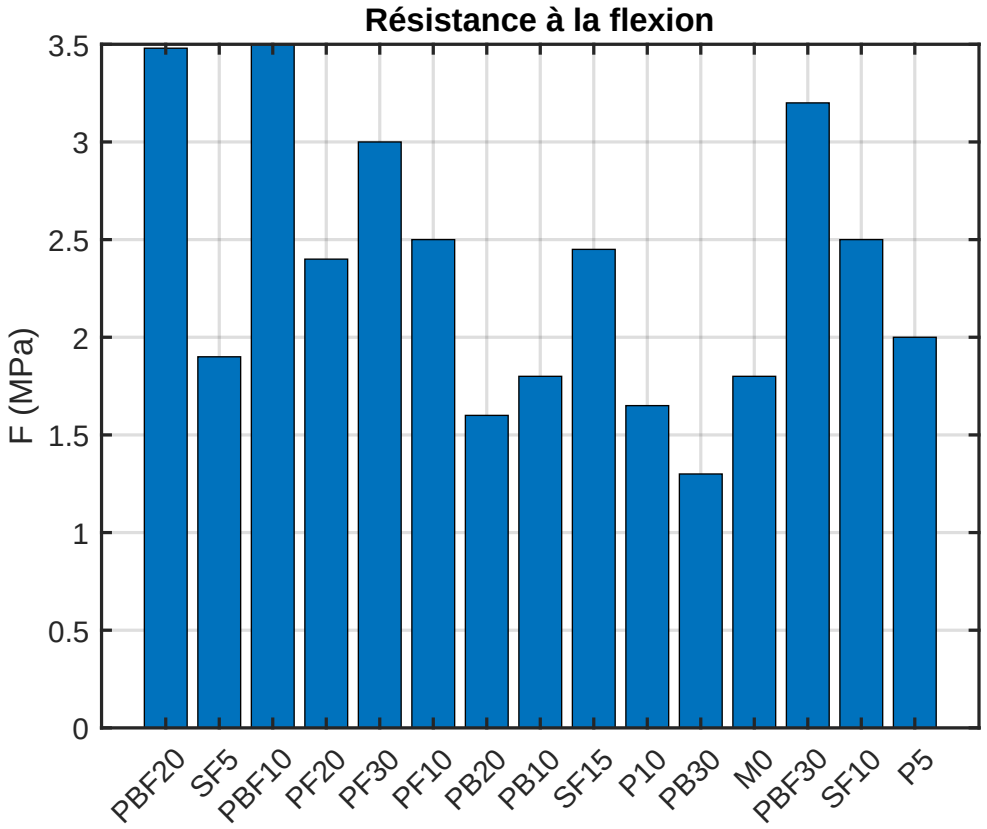


FIGURE III.6 : Résistance à la traction par flexion(LTPS)

III.8 Porosité accessible à l'eau

Les résultats présentés dans le tableau 9 et illustrés par la figure III.7 mettent en évidence une variation significative de la porosité accessible à l'eau des différentes formulations, avec des valeurs comprises entre 1.16 % et 23.50 %. Cette dispersion traduit l'influence directe de la composition et du dosage des ajouts sur la microstructure et la compacité des mortiers géopolymères.

Les formulations PF30 (1.16 %) et PF20 (2.05 %) présentent les plus faibles taux de porosité, indiquant une structure particulièrement dense et homogène, favorable à une meilleure durabilité et à une faible perméabilité. Cette densification peut être attribuée à une optimisation du processus de géopolymérisation et à une réduction significative des vides capillaires.

À l'opposé, les formulations SF5 (23.50 %), PB30 (22.08 %) et PBF30 (jusqu'à 21.86 %) affichent des taux de porosité élevés, traduisant une structure plus ouverte et une présence accrue de pores connectés. Cela peut être lié à une mauvaise répartition des particules ou à une réactivité insuffisante des constituants, conduisant à une matrice moins compacte.

Les formulations PBF20 (13.71 %) et SF15 (13.99 %) présentent des valeurs intermédiaires re-

lativement faibles, indiquant un compromis intéressant entre compacité et stabilité. En revanche, les compositions à base de PB (PB10, PB20, PB30) montrent globalement des porosités élevées (entre 17.59 % et 22.08 %), confirmant leur effet défavorable sur la densification du matériau.

Comparativement à l'échantillon de référence M0 (18.98 %), plusieurs formulations, notamment PF30 et PF20, présentent des performances nettement améliorées, tandis que d'autres montrent une augmentation de la porosité. Globalement, ces résultats confirment que la porosité est fortement dépendante du type d'ajout et de son dosage, et qu'une réduction de la porosité est généralement associée à une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité des matériaux géopolymères.

Tableau 9 : Porosité accessible à l'eau (Eau, 20°C) - Rapport d'essai 13.04.2026(LTPS)

Échantillon	**Masse sèche (g)**	**Masse saturée (g)**	**Masse dans l'eau (g)**	**Porosité (%)**
SF15	227,3	244,2	123,4	13,99
P10	242,5	265,7	141,7	18,71
PF30	245,3	246,7	125,9	1,16
PF10	216,7	232,7	122,2	14,48
SF10	224,1	244,6	122,5	16,79
PB20	277,2	304,3	167,3	19,78
PB10	256,4	278,3	153,8	17,59
SF5	233,8	263,1	138,4	23,50
PBF20	250,3	267,6	141,4	13,71
PB30	260,6	289,3	159,3	22,08
PF20	258,9	261,5	134,8	2,05
PBF30	236,5	258,5	140,5	18,64
P5	257,5	280,9	147,4	17,53
PBF30	254,8	283,3	152,9	21,86
M0	243,0	266,8	141,4	18,98

Note : Calcul selon NF P18-459. Porosité accessible à l'eau $P = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sat}} - M_{\text{eau}}} \times 100$.

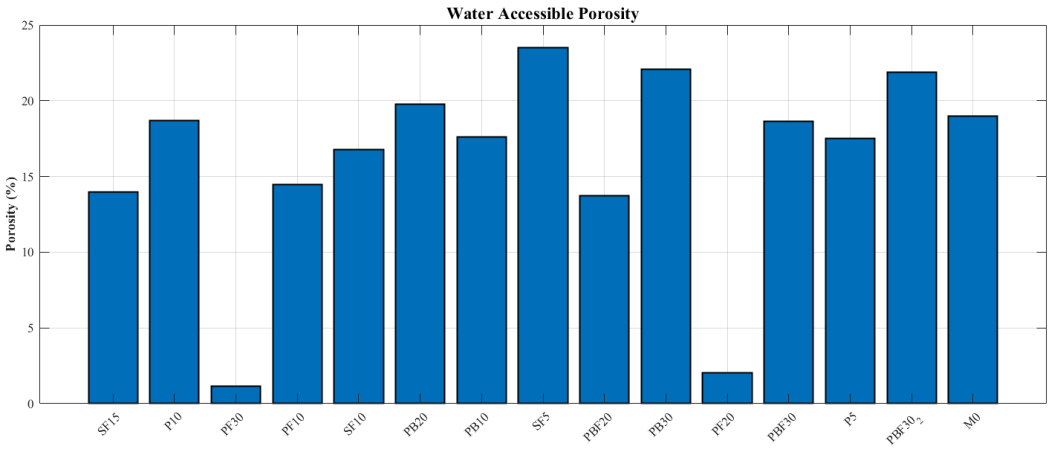


FIGURE III.7 : Porosité accessible à l'eau (Université de Ghardaïa)

III.9 Absorption capillaire

D'après les résultats présentés dans les tableaux et la figure III.8, on observe que la masse des échantillons augmente progressivement avec le temps, ce qui traduit une pénétration continue de l'eau par capillarité.

Au cours des premières minutes (de 5 à 15 min), le taux d'absorption est rapide, indiquant que les échantillons absorbent une quantité importante d'eau en un temps court. Ensuite, entre 30 min et 1 h 30, l'augmentation devient plus lente et progressive, ce qui traduit le début de la saturation des pores.

Après 24 heures, toutes les éprouvettes atteignent une valeur d'absorption quasi stable.

En comparant les différents échantillons, on remarque que les compositions de type PBF et PF présentent les plus faibles taux d'absorption (notamment PBF10 et PF30), ce qui indique une structure plus compacte et moins poreuse. En revanche, les échantillons SF et PB présentent des valeurs d'absorption plus élevées (notamment PB10 et SF5), traduisant une porosité importante et une plus grande facilité de pénétration de l'eau.

L'échantillon P10 présente un comportement particulier, avec une absorption initiale très élevée (supérieure à 8 %), suivie d'une stabilisation rapide, ce qui indique une absorption rapide associée à une saturation précoce.

L'analyse de la figure III.8 confirme ces observations, en montrant une différence nette entre les échantillons en termes d'absorption finale après 24 h. Les échantillons à faibles valeurs (PF et PBF) présentent de meilleures performances, tandis que ceux à valeurs élevées (PB et SF) absorbent davantage

d'eau, ce qui est généralement défavorable pour les matériaux de construction.

En conclusion, l'absorption capillaire est rapide au début puis ralentit avec le temps. Elle dépend fortement de la composition et de la structure du matériau. Les échantillons les plus compacts offrent une meilleure résistance à la pénétration de l'eau.

Tableau 10 : Évolution de la masse des échantillons en fonction du temps (LTPS)

Échantillon	M_0	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	1 h 15	1 h 30	24 h
PBF10	240.44	242.19	242.16	242.47	242.62	242.68	242.76	242.90	243.08	246.00
PBF20	255.40	257.00	256.90	257.31	257.58	258.14	258.38	258.45	258.60	262.63
PBF30	264.62	267.57	267.78	268.33	268.95	269.20	269.71	269.82	270.14	274.61
SF5	235.12	244.53	246.63	248.47	251.93	252.23	252.50	252.58	252.77	254.22
SF10	224.28	230.82	232.22	233.45	236.00	237.69	238.99	239.51	239.93	243.34
SF15	229.48	233.25	233.73	234.36	235.44	236.09	236.67	237.00	237.37	243.20
PB10	256.61	268.22	271.93	273.65	276.67	277.14	277.44	277.75	277.97	282.53
PB20	277.34	289.94	292.75	294.70	298.72	299.45	293.76	300.00	300.19	304.60
PB30	261.22	273.77	275.94	277.37	280.26	280.65	280.90	281.07	281.23	284.02
M0	243.65	251.78	254.68	256.00	261.03	263.53	263.76	263.93	263.95	265.14
PF20	257.83	258.32	258.36	258.53	258.51	258.45	258.63	258.67	258.77	264.92
PF30	243.52	243.89	244.03	244.24	244.20	244.12	244.19	244.28	244.33	249.68
P5	258.33	263.69	265.50	266.71	269.69	272.01	274.14	275.44	276.62	281.84
PF1O	265.13	268.46	269.36	270.17	271.31	272.31	273.17	273.57	273.98	283.15
P1O	123.34	134.00	134.70	134.61	134.60	134.37	134.47	134.59	134.75	133.73

Tableau 11 : Taux d'absorption d'eau $W(\%)$ corrigé

Échantillon	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	1 h15	1 h30	24 h
PBF10	0.73	0.72	0.85	0.91	0.93	0.97	1.02	1.10	2.31
PBF20	0.63	0.59	0.75	0.85	1.07	1.17	1.19	1.25	2.83
PBF30	1.12	1.20	1.40	1.63	1.73	1.92	1.96	2.09	3.77
SF5	3.99	4.89	5.67	7.15	7.27	7.40	7.43	7.51	8.13
SF10	2.92	3.54	4.10	5.22	5.98	6.56	6.79	6.98	8.49
SF15	1.64	1.85	2.12	2.60	2.88	3.13	3.28	3.44	5.97
PB10	4.53	5.97	6.64	7.81	7.99	8.12	8.24	8.32	10.88
PB20	4.54	5.55	6.26	7.71	7.98	5.92	8.16	8.23	9.82
PB30	4.80	5.64	6.19	7.29	7.44	7.55	7.62	7.66	8.73
M0	3.34	4.53	5.06	7.13	8.16	8.26	8.33	8.34	8.82
PF20	0.19	0.21	0.27	0.26	0.24	0.31	0.33	0.36	2.74
PF30	0.15	0.21	0.30	0.28	0.25	0.27	0.31	0.33	2.53
P5	2.07	2.77	3.24	4.40	5.30	6.12	6.62	7.09	9.10
PF1O	1.25	1.59	1.90	2.33	2.72	3.03	3.18	3.34	6.80
P1O	8.65	9.21	9.18	9.17	8.95	9.03	9.12	9.25	8.43

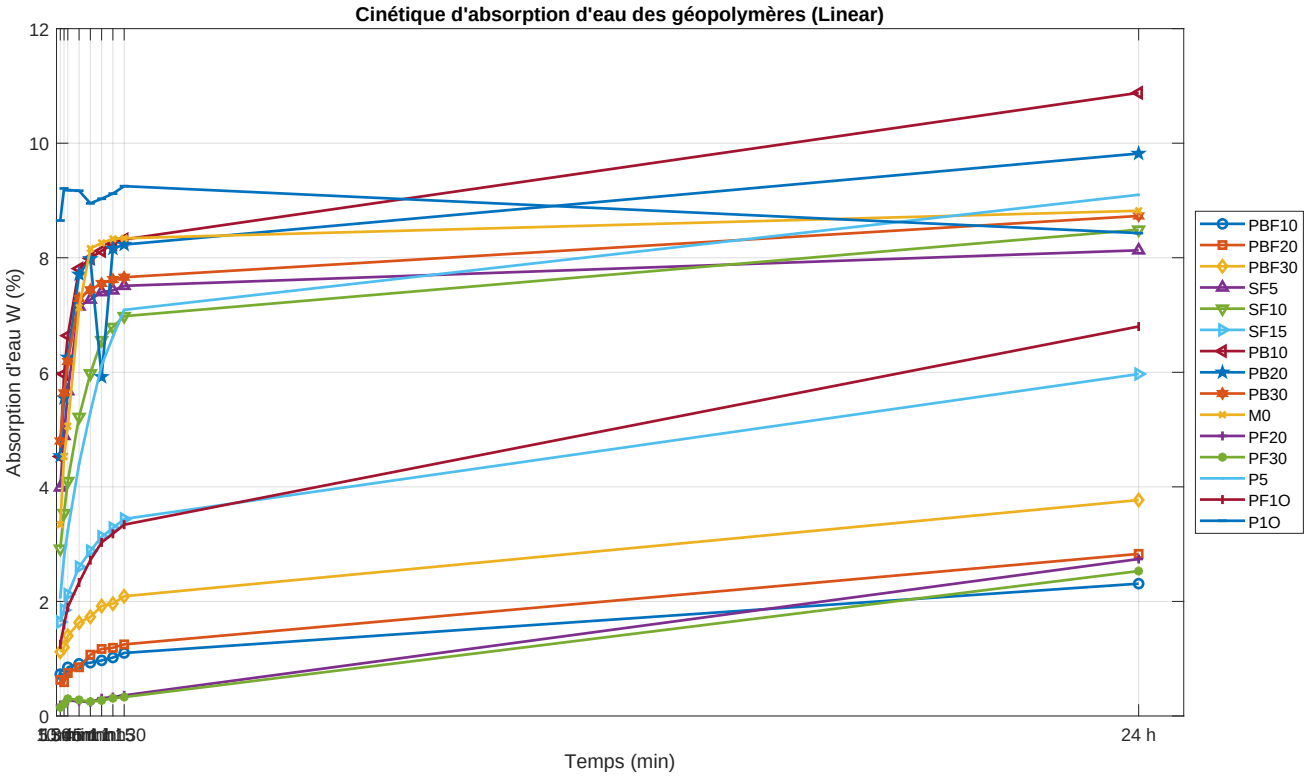


Figure III.8 : Absorption finale après 24h

III.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter et d'analyser l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur les mortiers géopolymères étudiés, en mettant en évidence l'influence de la composition des mélanges ainsi que des conditions de cure thermique sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

L'analyse des propriétés physiques, notamment la masse volumique, la porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire, a montré que la microstructure des matériaux dépend fortement du type et du dosage des ajouts. Les formulations les plus compactes présentent généralement une porosité plus faible et une meilleure résistance à la pénétration de l'eau, tandis que les formulations plus poreuses montrent un comportement inverse.

Sur le plan mécanique, les essais de compression et de traction par flexion ont révélé une variabilité importante des performances en fonction des compositions. Certaines formulations, notamment celles optimisées en ajouts, ont montré une amélioration significative des résistances mécaniques, ce qui confirme l'importance du choix des matériaux et de leur dosage dans la performance globale des géopolymères.

L'analyse par ultrasons a également permis de mettre en évidence l'homogénéité interne des échantillons et de confirmer les tendances observées lors des essais mécaniques et physiques. De manière générale, une corrélation claire apparaît entre la compacité du matériau, sa porosité et ses performances mécaniques.

Enfin, il ressort de ce chapitre que les propriétés des mortiers géopolymères sont fortement influencées par les paramètres de formulation et les conditions de cure. Les résultats obtenus permettent ainsi d'identifier les compositions les plus performantes et de mieux comprendre les mécanismes de formation et de densification de la matrice géopolymérique.

Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de cette investigation expérimentale, il convient de dresser un bilan global des principaux enseignements tirés de cette étude consacrée au développement et à la caractérisation de mortiers géopolymères élaborés à partir de matériaux aluminosilicatés d'origine minérale et de sous-produits industriels et de construction. L'ensemble des résultats obtenus permet non seulement d'apprécier les performances des formulations étudiées, mais également de mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques responsables de leur évolution et de mettre en évidence les conditions nécessaires à l'obtention d'un matériau présentant un compromis satisfaisant entre performances mécaniques, propriétés physiques, durabilité et intérêt environnemental.

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer la faisabilité technique et la pertinence environnementale d'une valorisation conjointe des déchets de terre cuite, de la pouzzolane naturelle et de la fumée de silice, utilisées comme sources d'éléments aluminosilicatés et siliceux dans la formulation de liants géopolymères alternatifs au ciment Portland conventionnel. Cette démarche s'inscrit dans un contexte scientifique et industriel marqué par la nécessité de développer de nouveaux matériaux de construction capables de répondre simultanément aux exigences de performance, de durabilité et de réduction de l'empreinte environnementale. Dans cette perspective, la transformation de déchets et de ressources minérales disponibles localement en matériaux à valeur ajoutée constitue une voie particulièrement intéressante pour promouvoir une économie plus circulaire et plus sobre en ressources.

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que les déchets de brique peuvent effectivement constituer une source intéressante de matière première pour l'élaboration de matériaux géopolymères, à condition que leur préparation, leur composition et leur proportion dans le mélange soient correctement maîtrisées. La présence de phases réactives riches en silice et en alumine leur confère un potentiel pouzzolanique et géopolymérisable susceptible d'être exploité dans un milieu alcalin approprié. Toutefois, l'utilisation de la poudre de brique seule ne permet pas nécessairement d'atteindre les niveaux de performance les plus élevés. Cette observation met en évidence l'importance de la complémentarité entre les différents précurseurs et confirme que l'optimisation d'un matériau géopolymère ne repose pas uniquement sur la quantité de matière réactive introduite, mais également sur sa nature, sa finesse, sa composition chimique et sa capacité à participer aux réactions de dissolution et de polycondensation.

L'analyse comparative des différentes formulations a ainsi permis de mettre en évidence l'influence déterminante de la nature et du dosage des ajouts minéraux. Les résultats montrent notamment que

l'effet des constituants n'est pas strictement additif. Au contraire, des interactions et des phénomènes de synergie apparaissent lorsque plusieurs sources aluminosilicatées et siliceuses sont associées. La pouzzolane naturelle contribue notamment à enrichir le système en phases réactives, tandis que la fumée de silice, caractérisée par sa très grande finesse et sa forte teneur en silice amorphe, joue un rôle particulièrement important dans l'amélioration de la compacité de la matrice. La combinaison de ces constituants avec la poudre de brique permet ainsi de modifier progressivement la structure du réseau géopolymère et de favoriser la formation d'une matrice plus homogène, plus dense et plus cohésive.

Les formulations hybrides étudiées, en particulier les systèmes présentant une combinaison optimisée de poudre de brique, de pouzzolane et de fumée de silice, ont démontré des performances particulièrement encourageantes. Ces formulations montrent qu'une stratégie de substitution raisonnée et de combinaison de plusieurs précurseurs peut conduire à une amélioration significative des propriétés du mortier. L'optimisation obtenue ne semble donc pas uniquement liée à la présence d'un constituant particulier, mais plutôt à l'établissement d'un équilibre entre la disponibilité des espèces réactives, la granulométrie des particules, la quantité d'eau, la concentration de l'activateur alcalin et les conditions de cure.

Du point de vue mécanique, les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'évolution favorable des résistances avec l'optimisation de la formulation et des conditions de maturation. L'augmentation de la résistance à la compression observée pour les formulations les plus performantes peut être associée à une meilleure réaction de géopolymérisation et à la formation progressive d'une matrice plus compacte. La réduction du volume des pores et l'amélioration de la continuité de la phase liante permettent de limiter les zones de faiblesse internes et de favoriser une meilleure transmission des contraintes mécaniques à travers le matériau. Ainsi, la résistance mécanique apparaît comme le résultat macroscopique d'une évolution microstructurale contrôlée à l'échelle des particules et des produits de réaction.

La résistance à la traction par flexion suit également une évolution favorable pour les formulations optimisées. Cette amélioration traduit une cohésion accrue de la matrice et une meilleure interaction entre les différentes phases constitutives du mortier. Bien que le comportement en traction demeure intrinsèquement plus sensible à la présence de défauts et de microfissures que celui observé en compression, les résultats obtenus montrent que l'optimisation de la composition peut contribuer à améliorer la résistance à l'amorçage et à la propagation des fissures. Le comportement mécanique global des formulations étudiées confirme ainsi l'intérêt d'une approche combinant plusieurs précurseurs afin de contrôler simultanément la densité, la cohésion et la distribution des phases solides.

L'étude des propriétés physiques vient compléter et expliquer les observations mécaniques. Les mesures de porosité accessible à l'eau ont notamment mis en évidence une diminution significative de la porosité pour les formulations les plus performantes. Cette évolution constitue un indicateur important de la densification de la matrice. La présence de particules très fines, notamment celles issues de la fumée de silice, favorise le remplissage des espaces intergranulaires et contribue à réduire la connectivité du réseau poreux. Parallèlement, les réactions géopolymériques conduisent à la formation de produits de réaction qui remplissent progressivement une partie des espaces disponibles et assurent une meilleure continuité de la matrice.

Les mesures de vitesse ultrasonique ont également confirmé cette évolution. L'augmentation des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques dans les formulations les plus denses traduit généralement une amélioration de l'homogénéité et de la compacité du matériau ainsi qu'une diminution des défauts internes susceptibles de perturber la propagation des ondes. La concordance entre les valeurs de porosité, les vitesses ultrasoniques et les résistances mécaniques constitue ainsi un élément particulièrement intéressant de l'interprétation des résultats. Elle montre que les différentes méthodes de caractérisation utilisées dans cette étude ne doivent pas être considérées séparément, mais peuvent être exploitées conjointement pour établir une relation cohérente entre la structure interne et les performances macroscopiques du mortier.

Cette relation entre microstructure et propriétés macroscopiques constitue d'ailleurs l'un des enseignements essentiels de ce travail. Une matrice plus dense et plus homogène tend à présenter simultanément une meilleure résistance mécanique, une porosité plus faible et une résistance accrue aux transferts hydriques. Ainsi, les résultats obtenus permettent de confirmer l'existence d'une corrélation étroite entre la compacité de la matrice, la résistance mécanique et le comportement vis-à-vis de l'eau. Cette corrélation représente un indicateur particulièrement pertinent pour l'évaluation de la qualité des matériaux géopolymères, puisque les propriétés de transport de l'eau jouent un rôle déterminant dans les mécanismes de dégradation à long terme.

L'étude de l'absorption d'eau par capillarité a, dans ce contexte, apporté des informations complémentaires sur la structure poreuse des formulations. Les mortiers présentant une porosité réduite ont généralement montré une diminution de leur aptitude à absorber l'eau par effet capillaire. Ce comportement est particulièrement important dans la perspective d'une utilisation en conditions réelles, car la pénétration de l'eau peut favoriser le transport de substances agressives, accélérer certains mécanismes de dégradation et influencer les variations dimensionnelles du matériau. La diminution de l'absorption capillaire observée pour les formulations optimisées constitue donc un résultat encourageant concernant

leur potentiel de durabilité.

Au-delà des performances mécaniques et physiques, l'intérêt de cette étude réside également dans sa dimension environnementale. La valorisation des déchets de brique permet de transformer un matériau initialement considéré comme un déchet de construction ou de démolition en une ressource secondaire susceptible d'être réintroduite dans un nouveau cycle de production. Cette démarche s'inscrit directement dans les principes de l'économie circulaire, selon lesquels les matériaux doivent être maintenus aussi longtemps que possible dans le cycle économique et leur valeur doit être préservée ou augmentée.

La valorisation simultanée de la pouzzolane naturelle et de la fumée de silice renforce cette approche en permettant de concevoir un système de liant fondé sur la complémentarité de différentes ressources et sous-produits. Une telle stratégie peut contribuer à réduire la consommation de matières premières vierges et à limiter la quantité de déchets destinés au stockage ou à l'élimination. Elle offre également la possibilité de développer des matériaux adaptés aux ressources disponibles localement, ce qui pourrait présenter un intérêt particulier dans les régions où les déchets de terre cuite sont abondants et où les matériaux cimentaires conventionnels nécessitent des ressources et des procédés de fabrication fortement consommateurs d'énergie.

L'intérêt environnemental des géopolymères doit néanmoins être considéré avec nuance. Si leur utilisation peut permettre de réduire une partie des impacts associés à la fabrication du ciment Portland, leur bilan environnemental dépend également de la nature et du dosage des activateurs alcalins, de leur procédé de fabrication, des températures de cure éventuellement appliquées, du transport des matières premières et de la durée de vie effective du matériau. L'évaluation environnementale complète d'une formulation géopolymère nécessite donc une approche globale intégrant l'ensemble du cycle de vie du matériau. Dans cette perspective, les résultats de la présente étude constituent une base expérimentale intéressante, mais des analyses complémentaires de type Analyse du Cycle de Vie (ACV) seraient nécessaires afin de quantifier avec précision les gains environnementaux potentiels.

Sur le plan scientifique, cette étude met également en évidence la complexité des mécanismes qui gouvernent la géopolymérisation. Les performances finales du mortier résultent de l'interaction de nombreux paramètres : composition chimique des précurseurs, rapport Si/Al, concentration de l'activateur alcalin, rapport liquide/solide, finesse des particules, conditions de mélange, température et durée de cure ainsi que conditions de conservation après démoulage. Une modification relativement faible de l'un de ces paramètres peut entraîner des variations importantes de la cinétique de réaction et,

par conséquent, des propriétés finales du matériau. L'optimisation d'une formulation géopolymère doit donc être considérée comme un problème multidimensionnel nécessitant une approche expérimentale rigoureuse.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche montrent également l'intérêt particulier des formulations à base de poudre de brique associée à des additions réactives. Cette approche permet non seulement de valoriser un déchet, mais également de compenser certaines de ses limitations intrinsèques. La fumée de silice, par exemple, peut contribuer à améliorer la compacité et la continuité de la matrice grâce à sa finesse exceptionnelle et à sa richesse en silice réactive. La pouzzolane naturelle peut, quant à elle, participer au développement de la structure géopolymérique et offrir une source complémentaire de constituants réactifs. L'association de ces matériaux apparaît ainsi comme une stratégie permettant d'obtenir un équilibre plus favorable entre valorisation des déchets et performances du produit final.

Parmi les formulations étudiées, la formulation optimisée PF10 s'est notamment distinguée par son niveau de performance mécanique, avec une résistance à la compression atteignant environ 46 kN dans les conditions expérimentales considérées. Ce résultat illustre concrètement l'importance du dosage optimal des constituants et montre qu'une augmentation de la quantité d'un ajout ne conduit pas nécessairement à une amélioration continue des propriétés. Au contraire, l'existence d'un dosage optimal suggère qu'un excès de certaines additions peut perturber l'équilibre physico-chimique du système, modifier la demande en eau ou en activateur et affecter la compacité ainsi que la cinétique de réaction. Cette observation souligne l'importance de l'optimisation plutôt que de la simple maximisation des quantités incorporées.

Il convient toutefois de souligner que les résultats de cette étude doivent être interprétés dans le cadre précis des matériaux, proportions, conditions de préparation et protocoles expérimentaux utilisés. La variabilité intrinsèque des déchets de brique constitue notamment un facteur susceptible d'influencer fortement les performances. La température de cuisson initiale des briques, leur composition minéralogique, leur degré de vitrification, leur finesse après broyage et leur origine géographique peuvent modifier leur réactivité. Une formulation optimisée pour une source particulière de déchets ne peut donc pas être automatiquement généralisée à l'ensemble des déchets de terre cuite sans une caractérisation préalable.

De même, les conditions de cure jouent un rôle essentiel dans le développement des propriétés du matériau. La température et la durée de cure peuvent modifier la cinétique de dissolution des précurseurs et accélérer ou ralentir la formation des produits géopolymériques. Une meilleure compréhension de

l'influence de ces paramètres permettrait d'identifier des conditions de cure plus simples et plus économes en énergie, compatibles avec une production à grande échelle et, surtout, avec les conditions climatiques locales.

Les perspectives scientifiques ouvertes par ce travail sont donc nombreuses. Une première orientation consiste à approfondir la caractérisation microstructurale et minéralogique des formulations optimisées. Des techniques telles que la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB/EDS), la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), l'analyse thermogravimétrique (ATG/DSC) et la porosimétrie permettraient d'identifier avec davantage de précision les phases formées, leur évolution au cours du temps et leur contribution aux performances mécaniques et physiques.

Une deuxième perspective concerne l'étude de la durabilité à long terme. Il serait particulièrement pertinent d'examiner le comportement des mortiers optimisés vis-à-vis de la carbonatation, de la pénétration des chlorures, des attaques sulfatiques, des cycles de séchage-humidification, des cycles de gel-dégel ainsi que des températures élevées. Ces essais permettraient de déterminer dans quelle mesure la faible porosité observée expérimentalement se traduit effectivement par une amélioration de la durée de vie dans des environnements agressifs.

Une troisième voie de recherche pourrait porter sur l'optimisation des activateurs alcalins. Bien que les activateurs soient indispensables au déclenchement des réactions géopolymériques, leur coût et leur impact environnemental peuvent représenter un obstacle au développement industriel de ces matériaux. La réduction de leur dosage, le remplacement partiel de certains composants ou le développement d'activateurs alternatifs issus de ressources disponibles localement constituent donc des axes de recherche particulièrement prometteurs. L'objectif serait de conserver un niveau de performance élevé tout en diminuant le coût global et l'empreinte environnementale du liant.

Il serait également pertinent d'étudier l'effet de la granulométrie des déchets de brique. Une optimisation de la distribution granulométrique pourrait améliorer simultanément le remplissage des vides, la demande en eau, la réactivité et la compacité du mélange. L'utilisation de différentes classes granulométriques, combinée à une optimisation statistique ou à des méthodes de plans d'expériences, pourrait permettre d'identifier avec précision les interactions entre les différents paramètres de formulation.

Sur le plan technologique, le passage du mortier de laboratoire vers des applications réelles constitue une étape supplémentaire qui nécessiterait l'étude de plusieurs aspects pratiques. La reproductibilité des formulations, la disponibilité des déchets, leur collecte et leur traitement, les besoins énergétiques liés au

broyage, les conditions de stockage des matières premières ainsi que la stabilité des activateurs devront être pris en considération. Une étude technico-économique complète permettrait alors de déterminer les conditions dans lesquelles cette technologie pourrait devenir compétitive par rapport aux matériaux conventionnels.

L'élargissement de cette approche à des bétons géopolymères constitue également une perspective particulièrement intéressante. Après validation du comportement des mortiers, il serait possible d'étudier l'introduction de granulats naturels ou recyclés afin de développer des bétons destinés à différentes applications. Cette démarche permettrait d'aller au-delà de la simple substitution du liant et d'envisager une valorisation plus importante des déchets issus du secteur de la construction.

Par ailleurs, l'utilisation de déchets de brique provenant de différentes régions pourrait permettre d'établir une base de données sur leur composition chimique, leur minéralogie et leur réactivité. Une telle base de données faciliterait la classification des déchets selon leur potentiel géopolymérique et permettrait d'adapter les formulations aux caractéristiques locales des matières premières. Cette approche serait particulièrement intéressante dans une perspective de développement territorial et de valorisation des ressources disponibles à proximité des lieux de production des déchets.

En définitive, les résultats de cette étude montrent que la valorisation des déchets de brique, combinée à l'utilisation de pouzzolane naturelle et de fumée de silice, constitue une voie scientifiquement pertinente pour le développement de mortiers géopolymères à performances améliorées. L'association judicieuse de ces différents constituants permet d'obtenir une matrice présentant une meilleure compacité, une porosité réduite, une absorption capillaire maîtrisée et des performances mécaniques encourageantes. Ces résultats confirment que les déchets issus du secteur de la construction peuvent être considérés non seulement comme une problématique environnementale, mais également comme une source potentielle de matières premières secondaires pour la fabrication de matériaux à haute valeur ajoutée.

Cette recherche met ainsi en évidence une idée fondamentale : la performance d'un matériau géopolymère ne dépend pas uniquement de la nature individuelle de chacun de ses constituants, mais surtout de la manière dont ceux-ci sont associés et de l'équilibre établi entre leur réactivité, leur granulométrie, leur proportion et les conditions de synthèse. La recherche de cet équilibre constitue donc la clé permettant de transformer un mélange de déchets et de ressources minérales en un matériau présentant des propriétés contrôlées et reproductibles.

Cependant, le passage d'une validation expérimentale en laboratoire à une utilisation industrielle

nécessite encore des investigations complémentaires. La durabilité à long terme, la reproductibilité des performances, la variabilité des déchets, la réduction du coût des activateurs, l'optimisation des procédés de préparation et l'évaluation environnementale complète constituent autant de paramètres qui devront être approfondis avant d'envisager une généralisation de cette technologie.

Ainsi, loin de constituer un point d'arrivée définitif, ce travail représente une étape dans une démarche plus large visant à repenser la conception des matériaux de construction selon les principes de la valorisation des déchets, de l'économie circulaire et de la réduction des impacts environnementaux. Il montre qu'un déchet de démolition tel que la brique peut, après traitement et formulation appropriés, retrouver une nouvelle valeur fonctionnelle au sein d'un matériau cimentaire alternatif.

À plus long terme, l'enjeu ne sera donc plus simplement de remplacer un matériau conventionnel par un autre, mais de concevoir des matériaux dont l'ensemble du cycle de vie est pensé dès leur origine : choix des matières premières, réduction de la consommation énergétique, valorisation des déchets, optimisation des performances, durabilité des ouvrages et possibilité de réutilisation ou de recyclage en fin de vie. Dans cette perspective, les mortiers géopolymères à base de déchets de brique, de pouzzolane naturelle et de fumée de silice constituent une piste particulièrement intéressante pour contribuer à l'évolution vers une construction plus durable, plus économe en ressources et davantage intégrée aux principes de l'économie circulaire.

En définitive, cette étude apporte une contribution expérimentale à la compréhension et à l'optimisation de matériaux géopolymères élaborés à partir de ressources et de déchets disponibles. Les résultats obtenus confirment le potentiel de cette stratégie tout en mettant en évidence la nécessité de poursuivre les investigations afin de mieux maîtriser les mécanismes de réaction, la durabilité et les conditions de mise en œuvre. La valorisation des déchets de brique apparaît ainsi non seulement comme une solution possible à un problème de gestion des déchets, mais également comme une opportunité de développer une nouvelle génération de matériaux de construction plus responsables.

Ce travail ouvre donc la voie à de nouvelles recherches susceptibles de rapprocher progressivement ces formulations du domaine de l'application pratique. La combinaison entre caractérisation approfondie, optimisation expérimentale, modélisation, analyse environnementale et évaluation technico-économique permettra, à terme, de transformer les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire en solutions concrètes pour le secteur de la construction. Ainsi, la démarche engagée dans cette étude s'inscrit dans une vision où les déchets d'aujourd'hui peuvent devenir les ressources de demain et où l'innovation dans les matériaux de construction constitue l'un des leviers essentiels d'une transition

vers une industrie plus durable.

Références

[1] BELAIDI, Mourad, *Elaboration et caractérisation d'un mortier de chaux pour la restauration des anciens bâtis (Cas de la piscine romaine de Guelma)*, Thèse de Doctorat, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés, 2022.

[2] BELKORCHIA, Bouzid et BEN MAMMAR, Messaoud, *Étude des propriétés mécaniques et de durabilité d'un mortier géopolymère à base de déchets de verre et de fines de béton démoli*, Mémoire de Master, Université de Bordj Bou Arreridj, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil, 2024.

[3] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, Institut Géopolymère, 2008.

[4] R. Pouhet, *Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers* (Thèse de doctorat), Université de Toulouse, 2015.

[5] S. Zhang et al., "A comprehensive review of synthesis kinetics and formation mechanism of geopolymers," *RSC Advances*, vol. 14, no. 1, pp. 446-462, 2024.

[6] P. Steins et al., "Structural Evolution during Geopolymerization from an Early Age to Consolidated Material," *Langmuir*, vol. 28, no. 22, pp. 8502-8510, 2012.

[7] C.Y. Heah et al., "Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 912-921, 2012.

[8] T. Cakmak & I. Ustabas, "Investigating experimentally the potency of divergent sodium hydroxide and sodium silicate molar proportions on silica fume and obsidian-based geopolymer mortars," *Structural Concrete*, vol. 26, no. 2, pp. 1962-1987, 2025.

[9] S. Manzi et al., "Formulating Geopolymer Mortars through Construction and Demolition Waste," *PMC*, vol. 15, no. 8, p. 3421, 2023.

[10] J. Davidovits, "Ciment géopolymère à base de laitier/cendres volantes," *Techniques de l'Ingénieur*, ref. N3301, 2014.

[11] F. Wang et al., "Value-added recycling of waste brick powder and waste sand to develop eco-friendly engineered geopolymer composite," *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, p. 139876, 2024.

[12] P. Duxson et al., "The role of Si/Al ratio in geopolymer formation," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917-2933, 2007.

[13] L. Monteiro et al., "Viabilité mécanique et écologique d'un liant géopolymère," *Revue AUGC*, vol. 11, no. 2, pp. 112-125, 2023.

[14] G. Noh et al., "Geopolymer Composites : Potential as Repair and Strengthening Materials for Concrete Structures," *ACI Structural Journal*, vol. 122, no. 5, pp. 165-179, 2025.

[15] G. D'Angelo et al., "Crushed Bricks : Demolition Waste as a Sustainable Raw Material for Geopolymers," *MDPI Materials*, vol. 14, no. 15, p. 4217, 2021.

[16] F. El Inaty et al., "Durabilité des géopolymères à base de métakaolin," *Revue AUGC*, vol. 12, no. 1, pp. 45-58, 2025.

[17] N. Youssef et al., "Reuse of waste bricks : a new generation of geopolymer bricks," *Discover Applied Sciences*, vol. 1, p. 1252, 2019.

[18] N. Mir et al., "Construction and demolition waste-based geopolymers for 3D additive manufacturing," *ScienceDirect*, vol. 350, p. 128902, 2022.

[19] A. Roy et al., "Geopolymer using different size fractions of recycled brick-based mixed demolition waste," *Cleaner Materials*, vol. 11, p. 100224, 2024.

[20] BELHAMITI, Yasmine et BEKHEDDA, Chima, *Elaboration et caractérisation d'un ciment géopolymère à base d'aluminosilicates*, Mémoire de Master Académique (Génie des procédés des matériaux), Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie des Procédés, soutenu le 18 juin 2023.

[21] KAID, N., CYR, M. et KHELAF, H., *Characterization of an Algerian natural pozzolan for its use in eco-efficient cement*, International Journal of Civil Engineering, Vol. 13, No. 4A, Transaction A : Civil Engineering, Décembre 2015.

[22] R. Siddique, *Utilization of Silica Fume in Concrete*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing, 2011.

[23] Carbonaide Oy, "How does geopolymer concrete compare to Portland cement for sustainability ?" *Carbonaide Knowledge Base*, 2026.

[24] P. Cong, "Comparison and assessment of carbon dioxide emissions between alkali-activated materials and OPC cement concrete," *ScienceDirect*, 2024.

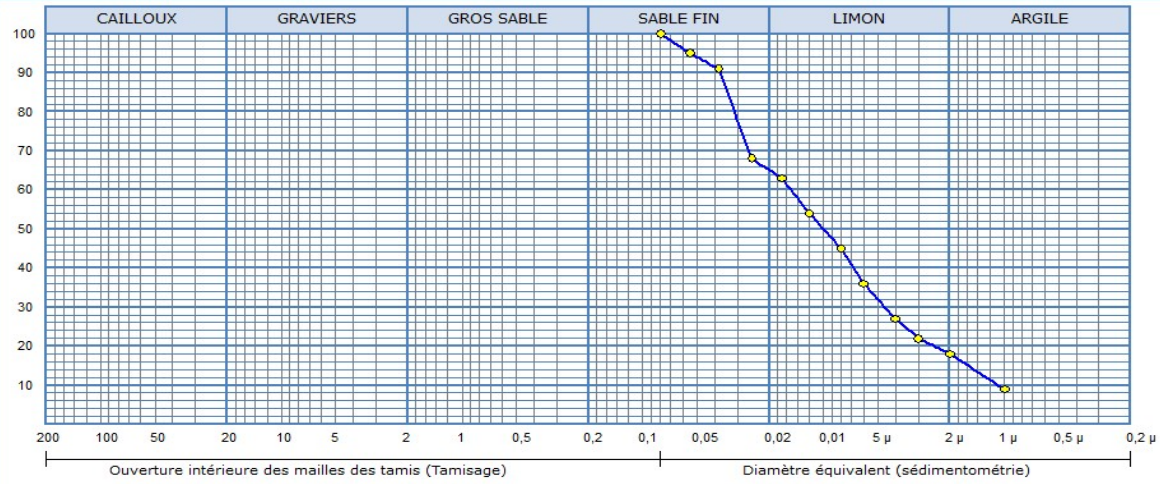
[25] Geopolymer Institute, "False CO values published in scientific papers," *Technical Paper #24*, 2015.

de l’annexe

Projet : recherche
Client :
Localisation :
Date essai : 06.04.2026

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Selon NFP 94-056

: brike



Programme: Soltests 2007 ©

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

. .

ANALYSE SEDIMENTOMETRIQUE NFP 94 – 057 Mai 1992

Structure : **U/G**
N° Dossier interne : **RECHERCHE**
Échantillon : **BRIQUE**
Équipements utilisés : **BALANCE/ETUVE**

Lieu de travail : **S$^{CE\ ID}$**
Date : **06.04.2026**
Opérateur :
N° D'inventaire :
L21.09.15/L49.01.91

Température ° C	Temps	Durée de chute	R'=R -1000 R : lecture au densimètre	Correction (C)	Lecture corrigée R1=R'+C Ou R1=R'-C	Diamètre (D)	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon
20°C	**8h10**	**30 "**	**22**	**+0.000**	**22**	0.075	**100**
20°C	**8h11**	**01'**	**21**	**+0.000**	**21**	0.055	**95**
20°C	**8h12**	**02'**	**20**	**+0.000**	**20**	0.038	**91**
20°C	**8h15**	**05'**	**15**	**+0.000**	**15**	0.025	**68**
19.8°C	**8h20**	**10'**	**14**	**-0.036**	**13.964**	0.017	**63**
19.8°C	**8h30**	**20'**	**14**	**-0.036**	**11.964**	0.012	**54**
19.8°C	**8h50**	**40'**	**12**	**-0.036**	**9.964**	0.008	**45**
19.6°C	**9h30**	**80'**	**10**	**-0.072**	**7.928**	0.006	**36**
19.6°C	**10h50**	**160'**	**08**	**-0.072**	**5.928**	0.004	**27**
19.6°C	**13h30**	**320'**	**06**	**-0.072**	**4.928**	0.003	**22**
20°C	**24 h**	**1440'**	**02**	**+0.000**	**04**	0.002	**18**
20°C	**48h**	**-**	**-**	**+0.000**	**02**	0.001	**09**
-	72 h	-	-	-	-	0.0005	-

Remarque :

$$p' = \frac{y}{100} \times p$$ avec y = % du passant à 0.080 mm =**100%**

R1= R' + C Si T° > à 20 ° C
R1= R' - C Si T° < à 20 ° C

L'Opérateur

Visa du responsable

F-5-5b.04

مخبر الأشغال العمومية في جنوب

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

FEUILLE DE PAILLASSE
QUALIFICATION DES FINES - ESSAIS AU BLEU DE METHYLENE
NF EN 933-9 : 2022

Structure	U/G	**N° Dossier**	Recherche Master
Lieu de travail	SCE ID	**Échantillon**	Sable

	Équipement	N° Inventaire ou N° série		Constat*	Valeur de correction**
Vérification des équipements *(étalonnage, vérification et état)*	Thermomètre	1724364		C	
	Étuve	L.039.15.S.002		C	
	Balance	L.022.15.S.009		C	
	Tamis 02 mm (0.125 ou 2)	7020788		C	
	Burette	/		C	
	Agitateur	L.091.15.S.002		C	
	Reference Solution 10g/l	*N° PV*	06	Date	14.02.2024
	Réactifs (N° Lot)	*Bleu M poudre*	/	Eau distillée	08.2025

Description de l'échantillon : /

(*) : C= conforme, NC=non conforme.
(**) **Important :** Toutes les valeurs mentionnées doivent être corrigées par les valeurs de correction

N°	ETALE	EXIGENCE	VALEUR
			8h40
1	*Date et Heure Début D'essai*	23.02.24	
2	*Choisir la méthode de travail*	• Fraction 0/2 mm • Fraction 0/0.125 mm	☒ ☐
3	*Réduire l'échantillon de laboratoire. Tamiser l'échantillon réduit.*	• Par division ou quartage • Tamis 2 ou 0.125 mm • Pour obtenir deux sous-échantillons ≥ 200 g	Tamis = 02 mm M = 278,10 g M_0 = 200 g
5	*Placer l'un des sous-échantillons tamisés « M » à l'étuve*	• À 110 °C ± 5 °C pour les matériaux non sensibles à la chaleur • À 40°C ± 5 °C pour les matériaux sensibles à la chaleur	Tare : I Masse Tare 123,35g Température d'étuvage : Mo °C Heure d'étuvage : 8h43
6	*Assurer que la masse constante « M' » est atteinte et calculer la teneur en eau*	• La durée entre deux pesées successive (M_i et M_{i+1}) est au minimum 1 h • $R = \frac{M_i - M_{i+1}}{M_i} \times 100 < 0.1\ \%$	1h / h / h / h / h m0 m0 m0 m0 m0 277,90 / / / / / R= 0,07 (%)

		• $\omega = \left\lvert \frac{M-M'}{M'} \right\rvert \times 100$	M' = 237,30 g ω = 0,07 (%)
7	Verser (500 ± 5) ml d'eau distillée dans le bécher et ajouter la prise d'essai « M_0 » dans le cas de la fraction 0/2 et ajouter la prise d'essai « M_{1F} » dans le cas de la fraction 0/0,125 et	• En remuant bien avec la spatule • $M_{1F} = 30 + (0,3 \times \omega)$	M_{1F} / M_0 = 200 g
8	Agiter la solution colorée et remplir la burette de solution colorée	-	☐
9	Mettre en marche l'agitateur et déclencher le minuteur.	• Positionner les ailettes à environ 10 mm du fond du bécher ; • Agiter le contenu du bécher pendant 5 min à (600 ± 60) tr/min ; • Réduire la vitesse de l'agitateur à (400 ± 40) tr/min et agiter continuellement pendant la poursuite de l'essai.	☐
10	Test à la tache	• Par dose de 5 ml avec 1 mn d'agitation ; • Auréole persiste pendant 5 min (6 taches) • Si l'auréole disparait dans 4 minutes : ajouter une autre dose de 5 ml • Si l'auréole disparait dans la 5ème minute : ajouter une autre dose de 2 ml • Si la quantité des fines est faible, ajouter la Kaolinite comme suite : - 30,0 ± 0,1 g séchée à (110 ± 5) °C à masse constante ; - V' ml de solution colorée dans le bécher où $V' = 30\,MB_K$ $M_1 = \frac{M_0}{1+\left(\frac{\omega}{100}\right)}$ $MB = \frac{V \times 10}{M_1}$ $MBF = \frac{V_{ES}}{M_{ES}} \times 10$	ω = 0,07 (%) M_{1F}/M_0 = 200 g V' = 1 ml V_{ES} = 25 ml M_1 = 199,86 g MBF = 1,25 g/kg MB = 0,125
11	Date et heure de fin d'essai	28.02.2025	9h54

Observation :

/

Nom et Prénom du Technicien : /	Visa /

Nom et Prénom du Contrôleur : Dibonou Hyacinthe		Contrôle et vérification	Oui / Non
Date 28.02.2025		Qualification du technicien	✓
Visa		Renseignement correct	✓
		Vérification du matériel	✓
		Calcul correct	✓

الجمهـــورية الجـــزائرية الديمقـــراطية الشعـــبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعلـــــيم العـــــالي والبحـــث العلـــمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جـــامعة غـــرداية

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Hydraulique et Génie Civil

كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم العلوم والتكنولوجيا

Université de Ghardaïa

Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures.

Autorisation d'impression d'un mémoire du Master

Les membres du jury	Nom et prénom	Signature
Président de jury	**MATALLA Zineb**	
Examinatrice	**DEHANE Sarra**	
Encadreur	**AZIEZ Mohammed Nadjib**	

Je soussigné M^me^ : : Matallah Zineb

Président de jury des étudiants :

1. **Oulad Saïd Mohamed Rafik**
2. **Aloui Walid**

Thème

Élaboration et caractérisation d'un mortier géopolymère activé Alcalinement

J'autorise les étudiants mentionnés ci-dessus d'imprimer et déposer leur manuscrit final au niveau du département.

Président de jury : **Le chef de département :**