



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **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.

## **DEDECACE**

A ma mère et à mon père, quoi que je fasse ou dis, je ne pourrai pas vous remercier comme je le devrais. A mes chers frères et sœurs, que Dieu vous donne la santé, le bonheur et surtout la réussite.

***BENSANIA ABDELLAH***

Pour mes parents. À ma famille. À mes amis et collègues, et à tous ceux qui m'ont aidé et motivé à continuer. Merci à tous pour qui je suis aujourd'hui.

***SALMI YUCEF***

## Résumé

La recherche de nouveaux matériaux de construction est aujourd'hui un grand défi, car elle nécessite de prendre en compte de nombreux critères tels que le coût, la durabilité et le respect de l'environnement. Les scientifiques travaillent à trouver des solutions innovantes adaptées aux différentes applications dans ce domaine. Dans le même temps, les déchets de construction sont devenus un défi et un problème environnemental.

Le mortier géopolymère est constitué de sable et de géopolymère composé de matériaux contenant des d'aluminate et de silice qui ont été activés par l'adoption d'une solution alcaline pour servir de liant. L'étude des propriétés et de l'application du mortier de géopolymère a attiré une attention croissante de la part des chercheurs et des industries du ciment en raison de ses avantages. Dans ce travail, Le mortier géopolymère a été produit à partir de déchets de brique et activé avec des silicates de sodium et l'hydroxyde de sodium. Les propriétés des mortiers géopolymères, y compris les propriétés physiques, les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction, performance à la flexion). Le rapport entre le déchet de brique et la solution était de 1,45, et entre les silicates de sodium et l'hydroxyde de sodium était de 2,5. Pour examiner l'effet de traitement thermique pendant la cure, les échantillons après le démoulage ont été exposés aux différentes périodes de durcissement de 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 jours à une température de 55 °C. L'effet de concentration de la solution alcaline a été aussi étudié. Les résultats obtenus montrent que la température et la concentration de la solution alcaline ont des effets remarquables sur les propriétés du mortier géopolymère.

**Mots clé** :géopolymère, activation, déchet de brique, traitement thermique.

## Abstract

The search for new construction materials is a major challenge today, as it requires a number of criteria to be taken into account, such as cost, durability, and respect for the environment. Scientists are working to find innovative solutions adapted to the various applications in this field. At the same time, construction waste has become a challenge and an environmental problem.

Geopolymer mortar is made up of sand and geopolymer composed of materials containing aluminate and silica that have been activated by adopting an alkaline solution to act as a binder. The study of the properties and application of geopolymer mortar has attracted increasing attention from researchers and the cement industry due to its advantages. This work produced geopolymer mortar from brick waste and activated it with sodium silicates and sodium hydroxide. The properties of geopolymer mortars include physical and mechanical properties (compressive strength, tensile strength, and flexural performance). The ratio between brick waste and the solution was 1.45, and the ratio between sodium silicates and sodium hydroxide was 2.5. To examine the effect of heat treatment during curing, the samples after demolding were exposed to different curing periods of 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 days at a temperature of 55°C. The effect of the concentration of the alkaline solution was also studied. The results show that the alkaline solution's temperature and concentration have remarkable effects on the properties of the geopolymer mortar.

**Keywords:** geopolymer, activation, brick waste, heat treatment.

## ملخص

يمثل البحث عن مواد بناء جديدة اليوم تحديًا كبيرًا، لأنه يتطلب مراعاة العديد من المعايير مثل التكلفة والمتانة واحترام البيئة. يعمل العلماء على إيجاد حلول مبتكرة تتكيف مع التطبيقات المختلفة في هذا المجال. في الوقت نفسه، أصبحت نفايات البناء تحديًا ومشكلة بيئية.

المونة الجيوبوليمرية مصنوعة من الرمل والجيوبوليمر المكون من مواد تحتوي على ألوميناتوسيليكا والتي تم تنشيطها من خلال اعتماد محلول قلوي ليكون بمثابة مادة رابطة.

اجتذبت دراسة خصائص وتطبيق ملاطالجيوبوليمر اهتمامًا متزايدًا من الباحثين وصناعات الأسمنت نظرًا لفوائدها. في هذا العمل ، تم إنتاج ملاط جيوبوليمر من مخلفات الطوب وتنشيطه بسيليكات الصوديوم وهيدروكسيد الصوديوم. خصائص ملاط الجيوبوليمر ، بما في ذلك الخواص الفيزيائية ، الخواص الميكانيكية (قوة الانضغاط ، قوة الشد ، أداء الانحناء). كانت نسبة نفايات الطوب إلى المحلول 1.45 ، وكانت نسبة سيليكات الصوديوم إلى هيدروكسيد الصوديوم 2.5. لفحص تأثير المعالجة الحرارية أثناء المعالجة ، تعرضت العينات بعد إزالة القوالب لفترات معالجة مختلفة من 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 ، 6 و 7 أيام عند درجة حرارة 55 درجة مئوية. كما تمت دراسة تأثير تركيز المحلول القلوي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن درجة حرارة وتركيز المحلول القلوي لهما تأثيرات ملحوظة على خواص الهاون الجيوبوليمر.

**الكلمات المفتاحية:** الجيوبوليمر ، التنشيط ، نفايات الطوب ، المعالجة الحرارية.

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS.</b>	I
<b>DEDICACES</b>	II
<b>RESUME</b>	III
<b>ملخص</b>	IV
<b>ABSTRACT</b>	V
<b>TABLE DES MATIERES</b>	VI
<b>LISTE DES FIGURES</b>	VIII
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	X
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>CONTEXTE</b>	6
<b>CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LES GEOPOLYMERES CIMENT</b>	7
Introduction :	8
1. Historique :	8
2. Définition des géopolymères :	11
3. Mécanisme de la géopolymérisation :	12
4. Activateurs chimiques :	13
5. Différents types de géopolymère :	13
5.1. Géopolymères à base de cendres volantes :	13
5.2. Géopolymères à base de métaux alcalins :	13
5.3. Géopolymères à base de sols :	14
5.4. Géopolymères à base de ciments :	14
6. Les ciments géopolymères :	14
7. Application des géopolymères :	15
8. Paramètres influençant les propriétés des géopolymères :	18
9. Concentration ou molarité de la solution alcaline :	18
10. Mode de cure ou régime de durcissement des matériaux géopolymères :	19
11. Rapport Si/Al de précurseur :	21
12. Différents types des déchets :	21
13. Valorisation des déchets de brique :	22
14. Types de brique :	22
15. Technique de la production de la brique :	23
16. Les avantages et les inconvénients des briques en terre cuite :	27
17. Recyclage de la brique de terre cuite :	27
Conclusion :	28
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES</b>	30
Introduction :	31
1. Caractérisation des matériaux utilisés :	31
1.1. Poudre Déchet de Brique (Waste brick Powder) :	31
A. Processus de collecte des déchets de briques :	32
B. Processus de concassage de brique :	32
C. Analyse chimique de déchet de brique :	33
D. Analyse sédimentométrique:	33
E. Essai au bleu méthylène :	35
1.2. Sable :	37
A. Analyse granulométrique :	38
B. Equivalent de sable :	39



C. La masse volumique apparente et absolue de sable :	40
D. La teneur en eau :	42
E. Caractérisation chimique de sable :	42
1.3. Le silicate de sodium :	42
1.4. Hydroxyde de sodium (NaOH) :	43
1.5. Eau de gâchage :	44
2. Partie expérimentales :	44
2.1. Méthode de formulation de mortier cimentaire :	44
A. Le malaxage :	45
B. Moulage des éprouvettes :	46
C. Démoulage des éprouvettes :	47
D. Conservation :	47
2.2. la densité :	48
2.3. Essais à la traction par de flexion :	48
2.4. Essai de compression :	49
2.5. Vitesse ultrasonique :	49
2.6. Absorption capillaire :	50
2.6. Porosité accessible à l'eau :	51
Conclusion :	52
<b>CHAPITRE III: RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	<b>53</b>
Introduction :	54
1. Aspect visuelle :	54
2. La Masse volumique :	55
3. Résistance à la Compression :	56
4. Vitesse ultrasonique :	58
5. Résistance à la traction par flexion :	59
6. Porosité accessible à l'eau :	60
7. Absorption capillaire :	62
Conclusion :	64
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCE</b>	<b>67</b>
<b>ANNEXE A</b>	<b>74</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Les émissions de CO <sub>2</sub> .	2
<b>Figure 2.</b> Les gaz à effet de serre.	3
<b>Figure 3.</b> Ciment géopolymère.	4
<b>Figure 4.</b> Déchet de brique .	5
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES GEOPOLYMERES CIMENT</b>	7
<b>Figure I.1.</b> Une pierre moulée les pyramides d'Égypte.	11
<b>Figure I.2.</b> Mécanisme de la géopolymérisation.	12
<b>Figure I.3.</b> Ciments géopolymères	15
<b>Figure I.4.</b> Le nouvel aéroport« Brisbane West Wellcamp » en Australie réalisé avec un béton géopolymère.	16
<b>Figure I.5.</b> Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994	17
<b>Figure I.6.</b> L'institut GCI (The Global Change Institute) à l'université du Queensland, Australie, 2013	18
<b>Figure I.7.</b> Extraction et stockage de l'argile	23
<b>Figure I.8.</b> Préparation de l'argile pour fabriquer la brique rouge	24
<b>Figure II.9.</b> Le Façonnage de brique rouge.	24
<b>Figure I.10.</b> Séchage de briques	25
<b>Figure I.11.</b> La Cuisson de brique rouge	25
<b>Figure I.12.</b> L'Emballage de brique rouge	26
<b>Figure I.13.</b> Les différents processus de fabrication de brique rouge	26
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE</b>	30
<b>Figure II.1.</b> Poudre déchet de brique.	31
<b>Figure II.2.</b> Étapes de préparation la poudre déchets de briques.	32
<b>Figure II.3.</b> Analyse sédimentométrique à LTPS.	35
<b>Figure II.4 :</b> La courbe granulométrique selon le test de sédimentométrique de brique utilisé.	35
<b>Figure II.5.</b> Essai au bleu méthylène à LTPS.	36
<b>Figure II.6.</b> Le volume de bleu injecté dans la prise d'essai à LTPS.	37
<b>Figure II.7.</b> Sable de oued M'Zi Laghouat	38
<b>Figure II.10.</b> La courbe granulométrique de sable utilisé.	39
<b>Figure II.11.</b> L'essai de l'équivalent du sable.	40
<b>Figure II.12.</b> Masse volumique absolue.	41
<b>Figure II.13.</b> Le silicate de sodium.	43
<b>Figure II.14.</b> Hydroxyde de sodium (NaOH).	44
<b>Figure II.16.</b> Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier [service de Béton – LTPS].	46
<b>Figure II.17.</b> Le moule est rempli et installé sur la table d'impact.	46

<b>Figure II.18.</b> Démoulage les échantillons.	47
<b>Figure II.19.</b> Balance de 0.01g à LTPS.	48
<b>Figure II.20.</b> Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion.	48
<b>Figure II.22.</b> Dispositif ultrason.	50
<b>Figure II.23.</b> Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire .	51
<b>CHAPITRE III :RESULTATSEXPERIMENTAUXETINTERPETATIONS</b>	53
<b>La Figure III.1</b> présente des images de mortier geopolymère.	54
<b>FigureIII.2.</b> Résultats de la masse volumique de mortier avec 8mol.	55
<b>FigureIII.3.</b> Résultat des masses volumiques des variantes étudiées (10mol).	56
<b>Figure III.4.</b> Résistance de compression à 55° (8Mol).	57
<b>Figure III.5.</b> Résistance de compression à 55° (10Mol).	57
<b>Figure III.6.</b> Vitesse des ultrasonique.	58
<b>FigureIII.7.</b> Résistance à la traction par flexion à 55° (8Mol).	60
<b>FigureIII.8.</b> Résistance à la traction par flexion à 55° (10Mol).	60
<b>FigureIII.9.</b> Porosité accessible à l'eau 8mol (NaOH).	62
<b>FigureIII.10 :</b> Porosité accessible à l'eau 10mol (NaOH).	62
<b>Figure III.11.</b> Absorption capillaire (%) en fonction de temps pour les échantillons de 8 mol.	63
<b>Figure III.12.</b> Absorption capillaire (%) en fonction de temps pour les échantillons de10 mol.	63

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES**

Tableau II. 1 : Analyse chimique de déchet de brique.	<b>33</b>
Tableau II. 2 : Résultat de l'essai de sédimentométrique.	<b>34</b>
Tableau II. 3 : Résultat de l'essai de au bleu de méthylène.	<b>37</b>
Tableau II. 4 : Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé.	<b>39</b>
Tableau II. 5 : Résultat de l'essai de l'équivalent du sable utilisé.	<b>40</b>
Tableau II. 6 : Résultats de la masse volumique apparente de sable.	<b>40</b>
Tableau II.7. Propriétés physiques de sable	<b>42</b>
Tableau II. 8 : Analyse chimique du sable utilisé.	<b>42</b>
Tableau II. 9 : Quantités de matériaux utilisés.	<b>44</b>
Tableau II. 10 : Mode de conservation.	<b>47</b>

### **CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS**

Tableau III. 1: La masse volumique pour les mélanges de 8mol.	<b>55</b>
Tableau III. 2 : La masse volumique pour les mélanges de 10mol	<b>55</b>
Tableau III. 3 : Résistance de compression à 55 °C (8Mol).	<b>57</b>
Tableau III. 4 : Résistance de compression à 55° C (10Mol).	<b>57</b>
Tableau III. 5: Résistance à la traction par flexion à 55° (8Mol).	<b>59</b>
Tableau III. 6: Résistance à la traction par flexion à 55° (10Mol).	<b>59</b>
Tableau III. 7 : Porosité accessible à l'eau 8 mol (NaOH).	<b>61</b>
Tableau III. 8 : Porosité accessible à l'eau 10 mol (NaOH).	<b>61</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE

Le monde se réchauffe actuellement plus rapidement qu'à n'importe quel moment de l'histoire enregistrée. Au fil du temps, la hausse des températures entraîne des changements dans les conditions météorologiques et des perturbations de l'équilibre habituel de la nature. Ce qui présente de nombreux dangers pour les humains et toutes les autres formes de vie sur Terre. La fabrication et l'industrie génèrent des émissions, dont la plupart proviennent de la combustion de combustibles fossiles pour produire de l'énergie pour fabriquer des choses comme le ciment, le fer et l'acier, l'électronique, les plastiques, les vêtements et d'autres biens. L'exploitation minière et d'autres processus industriels libèrent également des gaz, tout comme l'industrie de la construction. Les machines utilisées dans le processus de fabrication fonctionnent souvent au charbon, au pétrole ou au gaz et sont l'un des contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre dans le monde.



**Figure 1. Les émissions de CO<sub>2</sub>.**

Le béton, au cours des dix dernières années, a connu de grands progrès techniques, comprenant les phénomènes physiques, chimiques et physico-chimiques qui sous-tendent le comportement du béton, et s'est imposé comme le matériau de construction le plus utilisé. C'est aussi le plus demandé dans les pays qui sont en train de développer des infrastructures et des structures telles que des barrages, des ponts, etc. Il a également d'importantes émissions de gaz et la grande énergie nécessaire pour le produire.

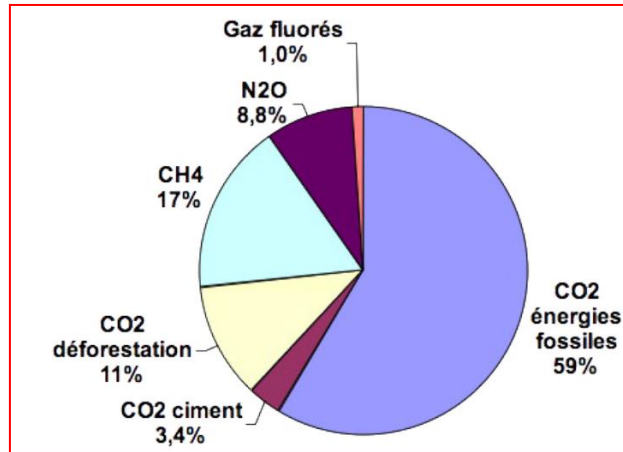


Figure 2. Les gaz à effet de serre.

En effet, la production du ciment nécessite des températures allant autour de 1450°C et émet près de 8% de la quantité totale de CO<sub>2</sub> issus des activités humaines [1]. C'est pourquoi les défauts de l'industrie cimentière ont obligé les chercheurs à trouver de nouveaux liants comme alternative au béton de ciment traditionnel afin de consommer moins d'énergie et de matières premières avec moins d'émissions de gaz.

Les composites polymères remplacent désormais leurs homologues traditionnels dans une grande variété d'applications et sont utilisés dans une variété de domaines technologiques tels que l'aérospatiale, l'automobile, et la construction. Optimiser leurs performances et leurs caractéristiques est donc un enjeu mondial. À ce jour, les chercheurs scientifiques continuent de rechercher de nouveaux matériaux composites légers, recyclables, peu coûteux et performants à base de matrices polymères.

Les géopolymères sont des matériaux inorganiques synthétisés par activation d'une source aluminosilicatée à l'aide d'une solution alcaline silicatée à une température inférieure à 100°C [2]. Ils furent tout d'abord synthétisés par Purdon[3] puis par Glukhovsky[4] vers 1959. Le terme « géopolymère » a ensuite été introduit par le français Joseph Davidovits[5] en 1978 afin de désigner le caractère inorganique (« géo ») et le caractère amorphe des polymères. Les géopolymères présentent une résistance à la compression élevée, leur permettant d'être utilisés dans l'industrie du bâtiment ou pour la construction de pistes d'atterrissage [5]. De plus, l'utilisation d'argilites du Callovo-Oxfordien calcinées comme source aluminosilicatée a permis de développer des géopolymères résistant à haute

température pour être utilisés dans des applications de tenue au feu [6, 7]. Les géopolymères possèdent également une inertie et une résistance aux agressions chimiques (acides) [8, 9] et ont servi pour la stabilisation de métaux lourds et de radium ou pour la consolidation de boues d'uranium issues des mines [5]. Les géopolymères peuvent être broyés et recyclés à hauteur de 20 % pour l'élaboration de nouveaux géopolymères[10]. De plus, bien que les calculs d'émission de CO<sub>2</sub> restent controversés [11], les géopolymères émettraient une faible quantité de CO<sub>2</sub> lors de leur fabrication par rapport aux ciments de Portland. Une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> allant jusqu'à 80% par rapport aux ciments de Portland a notamment été calculé par Davidovits lors de l'élaboration de géopolymères[12].

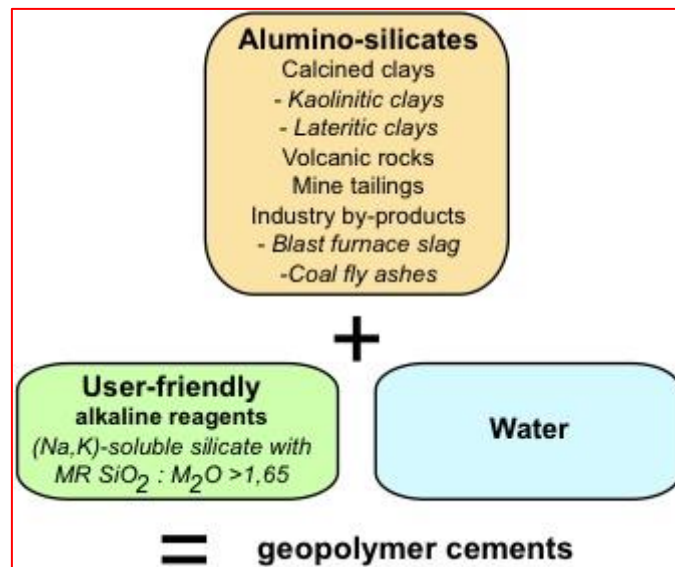


Figure 3. Ciment géopolymère.

Les traitements thermiques jouent un rôle essentiel dans le développement des propriétés des géopolymères. Ils permettent d'améliorer la résistance mécanique, la durabilité et la structure des géopolymères. Les traitements thermiques comprennent le séchage à basse température et la cuisson à haute température. Le séchage à basse température permet d'éliminer l'excès d'humidité de la pâte géopolymère, réduisant ainsi la porosité et améliorant la résistance mécanique du matériau [13]. La cuisson à haute température, également connue sous le nom de calcination, consolide les liaisons chimiques et réorganise la structure du matériau géopolymère, ce qui entraîne une augmentation significative de sa résistance mécanique et de



sa durabilité [13]. Ces traitements thermiques peuvent être ajustés en fonction des formulations spécifiques des géopolymères et des propriétés souhaitées du matériau, offrant ainsi une flexibilité dans la production de géopolymères adaptés à différentes applications.

Ces dernières années, la construction et l'urbanisme sont devenus un élément essentiel de la vie humaine, car ils génèrent une grande quantité de déchets solides, directement ou indirectement (fabrication de matériaux ou démolition), en particulier des déchets résultant des activités de divers secteurs industriels de matériaux de construction, En plus de ceux liés à l'industrie de la brique rouge pleine et creuse, selon les statistiques, la quantité de déchets solides est en augmentation, en raison de la demande croissante pour les besoins de la population.



**Figure 4. Déchet de brique [14].**

Aujourd'hui, le recyclage des déchets est une solution adaptée qui peut fournir de nouvelles ressources renouvelables et durables qui contribuent au processus de construction et à la protection de l'environnement. Les déchets de briques sont une alternative intéressante. Car ces déchets sont facilement disponibles et sont en grande partie abandonnés sur les chantiers. A travers ce travail expérimental, nous essayons de les utiliser comme composant de base des mortiers géopolymères

En particulier :

→ Les déchets de briques rouges peuvent-ils être utilisés comme additif au mortier géopolymère ?

→ L'ajout de déchets de briques rouges au mortier géopolymère est-il efficace en termes d'amélioration des propriétés mécaniques et physiques ?

L'objectif général de cette recherche est :

- Formulation de mortier géopolymère
- Etude des propriétés mécaniques et physiques du mortier géopolymère à partir de déchets de briques rouges
- Etude des effets de la température et de la concentration en NaOH sur mortier géopolymérique

### **Contexte :**

Le manuscrit est structuré en trois chapitres en plus du présent parti par l'introduction générale et des dernières parties consacrées à la conclusion, Ces trois Les chapitres sont résumés de la façon suivante :

- La première chapitre de ce travail, une synthèse bibliographique des connaissances sur géopolymère ciment.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'identification des matériaux utilisés. Ainsi une caractérisation physico-chimique, a été effectuée en plus essais de sable, mélanges des mortiers.
- Le troisième chapitre une synthèse des résultats expérimentaux obtenus dans d'étudie l'influence les caractéristiques physiques et mécaniques a les échantillons de mortier.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITE SUR LES GEOPOLYMERES CIMENT**

## CHAPITRE I

### GENERALITE SUR LES GEOPOLYMERE CIMENT

#### **Introduction :**

L'industrie de la construction et la recherche connaissent un véritable essor technologique. Dans le but de remplacer partiellement ou totalement le ciment Portland traditionnel, de nouveaux liants appelés géopolymères à moindre impact environnemental et à moindre coût énergétique ont été proposés. Les géopolymères apparaissent comme des alternatives prometteuses aux matériaux cimentaires conventionnels.

Les géopolymères sont fabriqués par la réaction d'une source alcaline telle que l'hydroxyde de sodium ou l'hydroxyde de potassium avec une source siliceuse telle que les cendres volantes. Cette réaction crée une structure tridimensionnelle solide et durable qui peut être utilisée dans une variété d'applications de construction [15].

Ce chapitre présente d'abord l'histoire des géopolymères, en se concentrant sur une compréhension générale du mécanisme de durcissement des systèmes géopolymères à base de métakaolin et de laitier. Par conséquent, une discussion détaillée sur la composition, les applications et la caractérisation des géopolymères est fournie.

#### **1. Historique :**

Le géopolymère est un matériau technique moderne et innovant qui est préparé en faisant réagir des agrégats solides (tels que le sable et le gravier) avec des liants spécifiques appelés "silicates alcalins", qui sont un mélange d'alcalis et d'oxydes de silicium.

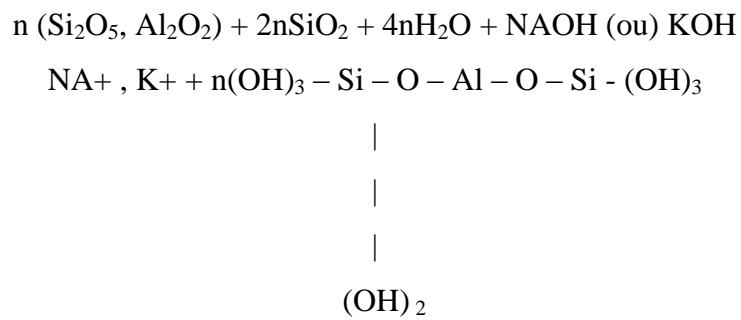
D'activation alcaline ne sont pas une nouveauté en soi, des études (Barsoum, Ganguly et Hug 2006; MacKenzie et al. 2011; Davidovits, 2006) ont montré que l'activation alcaline était utilisée dès l'Egypte antique.

Selon (Davidovits, 1989), de nombreux incendies en France entre 1970 et 1973 ont été le point de départ du développement des géopolymères, la recherche de polymères inorganiques résistants à la chaleur et ininflammables.

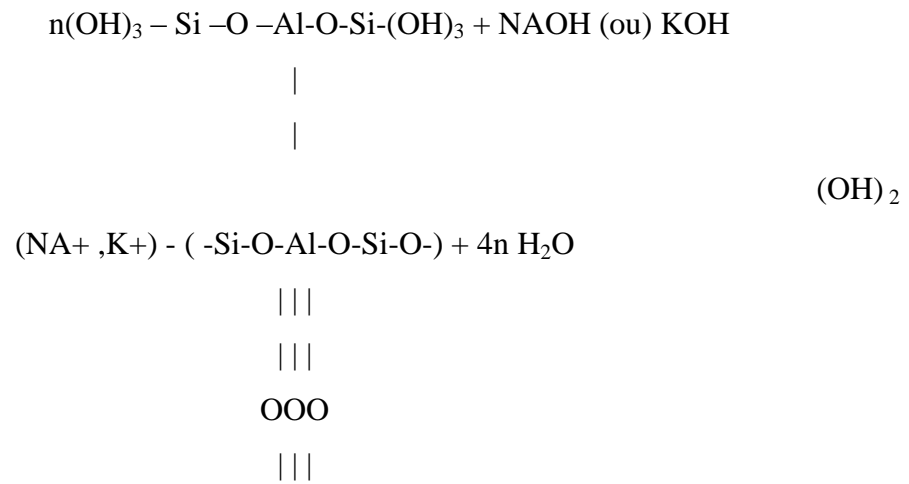
Pour pallier ce danger, Davidovits décide de se lancer activement dans cette réflexion en créant sa propre société en 1972. Tout le problème était de parvenir à réaliser des matières plastiques qui ne brûlent pas et qui ne fassent pas appel à des produits carbonés. La solution était d'utiliser des éléments minéraux, telle que la silice, mais à basse température. C'est ainsi que Davidovits découvre qu'il existe des réactions minérales tout à fait similaires à certaines réactions en chimie organique appelées polymères minéraux [16].

En 1983, le premier ciment géopolymère est né, qui présente des caractéristiques mécaniques et une résistance aux acides intéressants. La résistance à la compression de ce ciment est de 20 MPa, après un maintien à 20 °C pendant 4 heures [17, 18]. Ces matériaux sont actuellement considérés comme des substituts au ciment Portland, plastiques et céramiques, de plus en plus des travaux de recherche sont menés partout dans le monde, en vue de les utiliser dans divers domaines [19, 20,21].

Davidovits a proposé qu'un liquide alcalin puisse être utilisé pour réagir avec le silicium (Si) et l'aluminium (Al) dans un matériau source d'origine géologique ou dans des matériaux de sous-produits tels que les cendres volantes pour produire des liants, car la réaction chimique qui a lieu dans ce cas est un processus de polymérisation qui a conduit au terme «géopolymères» pour représenter ces liants. Les géopolymères font partie de la famille des polymères inorganiques. La composition chimique du matériau géopolymère est similaire à celle des matériaux zéolithiques naturels, mais la microstructure est amorphe. Le processus de polymérisation implique une réaction chimique rapide dans des conditions alcalines sur les minéraux Si-Al, qui se traduit par une chaîne polymère tridimensionnelle une structure cyclique constituée de liaisons Si-O-Al. Le processus de géopolymérisation et la structure de base peuvent être représentés respectivement par les deux équations (1) et (2) [22].



(Processus de géopolymérisation) ----- (1)



(Structure de base des géopolymères) ----- (2)

Cette nouvelle technologie des géopolymères a été déjà présente dans l'antiquité et il s'agit d'une science «redécouverte»; Selon les archéologues, les ancienne civilisations ont utilisés de la pierre taillée pour construire les ancienne villes, il s'agit des pierres de formes différentes pesant de quelques kilogrammes à des dizaines de tonnes, la méthode de taille des pierres, du transport et de la mise en place reste toujours une problématique, c'est une théorie

qui a duré très longtemps, néanmoins et suite aux dernières découvertes scientifique, cet avis a été remplacé par une nouvelle approche qui estime qu'il s'agit des pierres artificielles qui ont été moulées sur site (voir FigureI.1 )[\[23\]](#).



**Figure I.1. Une pierre moulée les pyramides d'Égypte**[\[23\]](#).

### **2. Définition des géopolymères :**

Les géopolymères font partie de la famille des aluminosilicates résultant de la synthèse d'un silicate alcalin et d'oxydes pulvérulents d'aluminium et de silicium à une température inférieure à 100° C, ils peuvent être assimilés à des polymères minéraux qui présentent une bonne stabilité à la température, aux attaques acides et de bonnes propriétés mécaniques [\[24\]](#).

Les géopolymères sont des matériaux de construction innovants utilisés dans les projets d'ingénierie civile et de construction. Ils sont composés de silicates alcalins, de matériaux de base tels que les cendres volantes et les scories, ainsi que d'un activateur alcalin. Contrairement aux matériaux de construction traditionnels tels que le ciment Portland, les géopolymères ne nécessitent pas de cuisson à haute température pour durcir.

Les géopolymères sont connus pour leur résistance, leur durabilité et leur capacité à résister à l'usure et aux agents environnementaux. Ils sont également considérés comme étant respectueux de l'environnement, car ils produisent moins de CO<sub>2</sub> que les matériaux de construction traditionnels.

Les géopolymères sont utilisés dans une variété d'applications d'ingénierie civile, y compris la construction de routes, de ponts, de bâtiments et d'ouvrages de génie civil tels que les tunnels

et les barrages. Ils sont également utilisés dans les industries de l'énergie et de l'environnement pour la construction de conduites d'eau et de canalisations.

En résumé, les géopolymères sont une alternative durable et respectueuse de l'environnement aux matériaux de construction traditionnels et offrent de nombreux avantages pour les projets d'ingénierie civile et de construction.

### 3. Mécanisme de la géopolymérisation :

La Figure I.2 montre le mécanisme réactionnel général de la géopolymérisation.

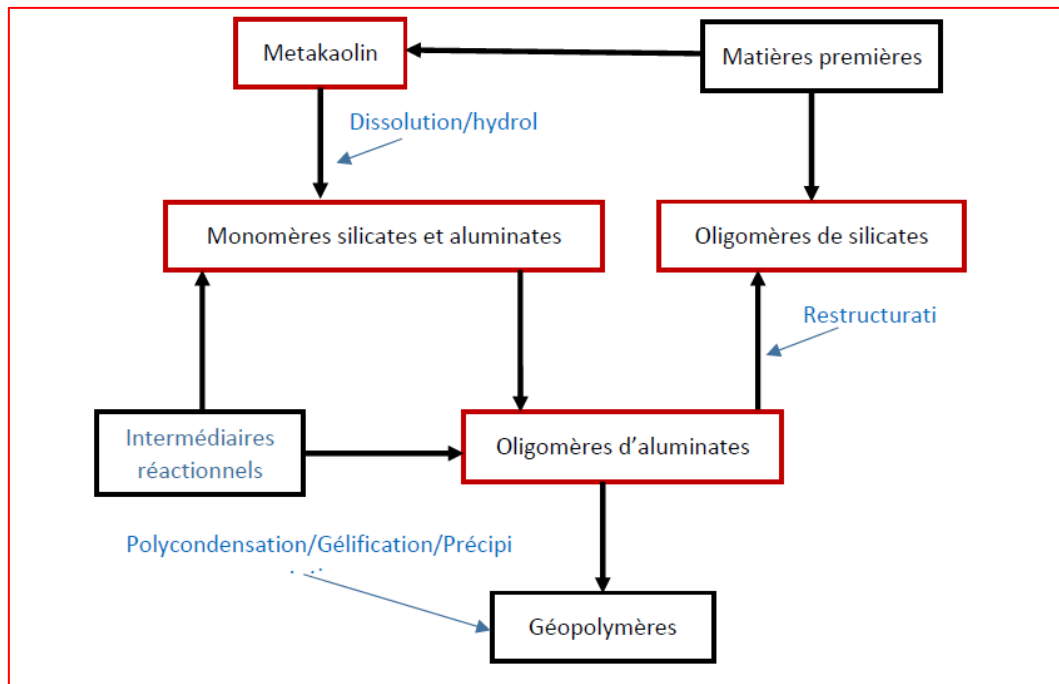


Figure I.2. Mécanisme de la géopolymérisation[25].

Dans les années 1950, Glukhovsky a proposé un mécanisme général pour l'activation alcaline de matériaux qui se composent principalement de silice et d'alumine réactive. Le modèle de Glukhovsky divise le processus en trois étapes : a) destruction-coagulation ; b) coagulation-condensation ; c) condensation-cristallisation [26,27].



Dans l'article de Duxson et al. 2006 [27], Les auteurs ont tenté de décrire les différentes étapes de la géopolymérisation. Cependant, encore aujourd'hui, il existe certaines idées fausses sur les différentes étapes de la polymérisation géologique.

#### **4. Activateurs chimiques :**

Dans son étude de 1981, Glukhovsky a classifié les activateurs chimiques en 6 différents types groupes [28], avec M : est un ion alcalin

- 1- Alcalins MOH
- 2- Sels acides faibles  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF.
- 3- Silicates  $M_2O \cdot nSiO_3$
- 4- Aluminates  $M_2O \cdot nAl_2O_3$ .
- 5- Aluminosilicates  $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$ .
- 6- Sels acides forts,  $M_2SO_4$ .

Katz [29] a étudié l'activation des laitiers par des alcalis (NaOH) et a montré une augmentation de la résistance mécanique lorsque la concentration de l'activateur augmente. D'autres auteurs ont signalé le même comportement en utilisant du métakaolin activé par un alcali [28].

Le silicate de sodium (water glass) favorise le processus de polymérisation conduisant à un produit de réaction avec plus de Si et plus de résistance mécanique. Fernandez-Jimenez et Palomo [30,31] ont signalé une augmentation de 40 à 90 MPa juste après un jour de durcissement, lorsqu'un activateur alcalin (silicate de soude ou carbonate de sodium) avec NaOH est utilisé au lieu de seulement NaOH.

#### **5. Différents types de géopolymère:**

##### **5.1. Géopolymères à base de cendres volantes :**

Ces géopolymères sont produits en mélangeant des cendres volantes avec une solution alcaline. Les cendres volantes sont des résidus de combustion de charbon et sont largement disponibles dans le monde entier. Ces géopolymères ont des propriétés mécaniques élevées, une bonne résistance à l'usure et une bonne résistance à la chaleur [32,34].

### 5.2. Géopolymères à base de métaux alcalins :

Ces géopolymères sont produits en mélangeant des aluminosilicates avec des solutions de métaux alcalins, comme le sodium ou le potassium. Ils ont des propriétés mécaniques élevées, une faible porosité et une bonne résistance à la corrosion[33,35].

### 5.3. Géopolymères à base de sols :

Ces géopolymères sont produits en mélangeant des sols naturels avec des solutions alcalines. Ils ont des propriétés mécaniques élevées, une bonne résistance à la chaleur et une faible porosité[33].

### 5.4. Géopolymères à base de ciments :

Ces géopolymères sont produits en mélangeant des ciments Portland avec des solutions alcalines. Ils ont des propriétés mécaniques élevées, une bonne résistance à la corrosion et une faible porosité[33,36].

## 6. Les ciments géopolymères :

Sont des matériaux polymères inorganiques qui font prise et qui durcissent à température ambiante comme les ciments Portland conventionnels [37]. En revanche, ils possèdent des processus de durcissement et de prise, ainsi que des propriétés mécaniques et physico-chimiques différents vis-à-vis des ciments Portland [38].

Pour l'élaboration d'un ciment géopolymère, deux types de matières premières sont généralement utilisés :

- **Des matériaux sources d'aluminosilicates** : les kaolinites, les argiles, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux et des minéraux naturels [40] sont les principaux matériaux utilisés comme sources de  $Si^{4+}$  et de  $Al^{3+}$  réactifs. Leur réactivité est déterminable par des caractérisations microstructurales (DRX, RMN et FTIR).
- **Des activateurs** : Les activateurs dans la géopolymérisation sont essentiellement des alcalins, des alcalino-terreux voire parfois des silicates d'alcalins (type silicate de

soude). Ils sont mis en solution et permettent à la fois d'augmenter la dissolution des matériaux aluminosilicatés et d'enrichir le milieu en silicium libre (disponible et réactif)[41].

L'activation est assurée par une solution alcaline qui est souvent à base de silicate de sodium ou de potassium. Lorsque les matières premières aluminosilicates entrent en contact avec la solution alcaline, une matrice amorphe se forme à travers un processus chimique complexe, nommé « géopolymérisation » [39]. Le mécanisme de prise et de durcissement des ciments Portland est différent de celui des géopolymères.

Dans le cas des ciments Portland, le durcissement est principalement le résultat d'une hydratation du silicate de calcium  $C_3S$  en silicate de calcium hydraté (C-S-H) et hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$ . Quant aux géopolymères, la prise et le durcissement se font à travers une réaction de polycondensation où des chaînes macromoléculaires se forment à partir de petites molécules d'aluminates de silicates[42].



**Figure I.3.** Ciments géopolymères [41].

### **7. Application des géopolymères :**

Les géopolymères sont des matériaux cimentaires alternatifs qui peuvent être utilisés dans une variété d'applications, allant de la construction de routes et de ponts à la production de

panneaux de béton préfabriqués et de blocs de construction. Dans cet article, nous explorerons quelques-unes des utilisations les plus courantes des géopolymères.

Aujourd'hui, les géopolymères sont intégrés comme un «matériau» écologique dans les différents ouvrages de construction et des travaux publics en raison de ses avantages environnementaux et des performances par rapport au béton de ciment Portland conventionnel; Cette technologie qui économise beaucoup d'énergie, elle est maintenant passée du domaine des études universitaires à des projets de construction de taille commerciale ; En effet, il est possible de remplacer le béton ordinaire par des géopolymères. L'aéroport de « Brisbane West Wellcamp » en Australie a été inauguré en 2014 (Figure I.4), marquant une étape très importante dans l'ingénierie, c'est le plus grand projet de béton géopolymère moderne au monde, il s'agit de la construction des chaussées d'avions à usage intensif, d'une superficie de 50.500 m<sup>2</sup> et d'une épaisseur de 435 mm ; En plus des chaussées, 15.000 m<sup>3</sup> supplémentaires de béton géopolymère ont été utilisés dans diverses applications, notamment un pont d'entrée à l'aéroport, des barrières de trottoir et de route, des éléments préfabriqués, des panneaux d'inclinaison moulés sur le site, des semelles et des réservoirs d'égout.

Dans ce projet, une réduction de 6600 tonnes de CO<sub>2</sub> qui auraient dégagées en cas d'utilisation de béton ordinaire[43].



**Figure I.4. Le nouvel aéroport« Brisbane West Wellcamp » en Australie réalisé avec un béton géopolymère. [43]**

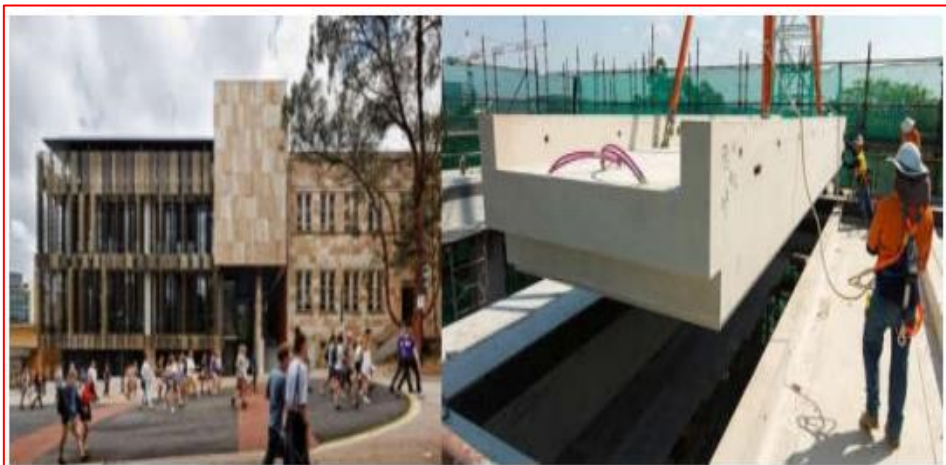
Côté ingénierie, on note le développement de nouveaux ciments géopolymères comme American Cement PYRAMENT, qui est sur le marché aux USA depuis 1988 et qui est ultra-rapide et performant. C'est un produit idéal pour l'entretien et la construction de plates-formes d'atterrissage en béton [44].

Entre 1986 et 1994, l'entreprise russe Tsentrmetallurgremonta réussi à réaliser une série de bâtiments en utilisant des bétons géopolymères à base de Laitier. [45](Figure I.5)



**Figure I.5. Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994[46].**

Toujours en 2013, le béton géopolymère à base de laitier et de cendres volantes a été utilisé par la société australienne Wagners pour mettre en œuvre GCI (Global Change Institute) et Innovation à l'Université du Queensland, en Australie. (Figure I.6)



**Figure I.6. L'institut GCI (The Global Change Institute) à l'université du Queensland, Australie, 2013[46].**

### **8. Paramètres influençant les propriétés des géopolymères :**

Les propriétés des différents constituants du géopolymère et la composition chimique du géopolymère influent les propriétés mécaniques et thermiques du géopolymère. La réaction de géopolymérisation est très sensible aux paramètres suivants :

- Caractéristique de la matière première (distribution de granulométrie, degré de cristallisation, etc.),
- Nature de l'activateur alcalin : hydroxyde de sodium / potassium, silicate de sodium/potassium,...etc.),
- Rapports Si / Al,
- Rapport Solution/Précurseur,
- Conditions de durcissement (température, degré d'humidité, temps et conditions de durcissement,...etc.)[42].

### **9. Concentration ou molarité de la solution alcaline :**

La concentration d'hydroxyde alcalin affecte significativement les propriétés physiques et mécaniques des géo-matériaux. La solution alcaline favorise la solubilité et la dissolution des aluminosilicates et accélère également la vitesse de réaction de géopolymérisation[47]. La concentration alcaline détermine le nombre d'ions nécessaires pour le processus de dissolution. En général, l'augmentation de la concentration de NaOH dans la gamme de 4 M – 12 M augmente par conséquent la résistance des matériaux géopolymères. Selon l'analyse des DRX, la phase amorphe a augmenté avec l'augmentation de concentration de NaOH[48]. La cinétique de la réaction augmente également avec l'augmentation de la concentration en hydroxyde alcalin. Pendant la réaction, l'ion Na<sup>+</sup> et l'ion OH<sup>-</sup> seront couplés. Lorsque la teneur en sodium est faible, il y aura à la fois insuffisance de OH pour dissoudre complètement Si<sup>4+</sup> et Al<sup>3+</sup> à partir des sources d'aluminosilicates et insuffisance en Na<sup>+</sup>

pour permettre une réaction de géopolymérisation complète. Par conséquent, la résistance à la compression du géopolymère était faible [49].

Néanmoins, plusieurs chercheurs ont montré que la haute alcalinité est néfaste pour les propriétés mécaniques des matériaux géopolymères. En effet, la Rc des géopolymères augmente avec l'augmentation de la concentration de NaOH puis elle diminue après une concentration optimale. Par exemple, Zuhua et al.[50] ont trouvé que la concentration optimale de NaOH pour fabriquer des géopolymères à base de métakaolin est de 9M. Au-dessus de cette valeur, la réaction de polymérisation n'est pas favorisée. La concentration élevée de NaOH conduit à une solution d'activation très visqueuse qui perturbe la dissolution des ions Si et Al à partir de la source d'aluminosilicate. Cette viscosité élevée permet la précipitation prématurée des gels de géopolymère et la détérioration de propriétés mécaniques du produit final à cause du matériau résiduel [51]. D'autre part, pour une gamme de concentration de NaOH légèrement plus élevée (10M-18M), Alonso &Palomo[52] ont montré que l'augmentation de la concentration de NaOH est responsable de la diminution de taux de polycondensation. Dans ces conditions l'augmentation de la concentration retarde le processus de polymérisation puisqu'une grande quantité d'ions a été dissoute provoquant ainsi la saturation et limite le contact entre les espèces polymérisées et les structures coagulées formées[52]. Il est aussi important de noter que la concentration alcaline doit être suffisante pour équilibrer les charges de réseau géopolymérique et ne pas avoir un excès en cation alcalin qui provoque la carbonatation [53]. Les teneurs en Si, Al et Na affectent de manière significative les propriétés finales des géopolymères. Même si la plupart des chercheurs ont varié la composition du mélange, les matériaux géopolymères restent toujours influencés par les différentes phases réactives des sources d'aluminosilicate [42].

### **10. Mode de cure ou régime de durcissement des matériaux géopolymères :**

Les géopolymères sont généralement durcis à la température ambiante ou à une température légèrement élevée après la synthèse. Couramment, un durcissement adéquat est nécessaire pour obtenir une meilleure performance mécanique durable [54]. Par exemple, Davidovits[55] a proposé une température de durcissement entre 60 ° C et 95°C. À 75 ° C, la formation des géopolymères s'achève presque après 4 heures de durcissement et arrive à une Rc

satisfaisante de 39,8 MPa, sans traitement supplémentaire [56]. L'augmentation de la température est bénéfique pour augmenter la réaction et en accélérant la dissolution des espèces de silice et d'alumine à partir d'une source d'aluminosilicate et en facilitant le processus de condensation et le durcissement de la matrice de géopolymère[57]. Une température de durcissement élevé contribue à une forte résistance mécanique précoce, mais elle risque de détériorer cette résistance à long terme [58].

Selon x.yao et al. [59], le durcissement des matériaux géopolymères à la température ambiante est très lent tandis que le durcissement à 50 ° C n'améliore pas les performances mécaniques. Ceci est probablement dû à la structuration rapide de structure géopolymère sur la surface des particules qui empêche la dissolution supplémentaire des aluminosilicates. Rovnanik[60] a montré qu'une température de durcissement élevée entraînait une formation de gros pores et agit négativement sur la résistance des géopolymères puisque le durcissement à 60 ° C et à 80 ° C conduit à des produits de haute résistance qui a diminué après 28 jours. Au contraire, les géopolymères traités à 20 ° C ou 40 ° C présentent des performances mécaniques de la Rc durant les 28 jours.

Le durcissement à haute température présente des mauvaises conséquences sur les propriétés finales des matériaux géopolymères. La température de durcissement élevé engendre la vaporisation rapide de l'eau de mélange qui empêche le développement de la performance mécanique recherchée. L'élévation de température de durcissement conduit certainement à l'amplification de la tendance à la fissuration dans les produits géopolymères[42]

Le développement de la structure ou des réseaux des géopolymères varie aussi avec le temps de durcissement. L'étude de durcissement des géopolymères à 65 ° C pendant 1h, 4h, 48h et 72h a abouti à un temps de durcissement optimal de 72h à 65 ° C [61]. Plusieurs méthodes de durcissement ont été envisagées telles que le traitement par autoclave ou hydrothermal saturé à la vapeur ont été étudiées par Kani& Al [62]. Le traitement hydrothermal s'effectue à une température plus basse et un temps plus court que le durcissement en autoclave. Le traitement à l'autoclave à 210 ° C pendant 30 h après 7 jours de pré-durcissement augmente la résistance des géopolymères à (108,7 MPa) sans formation de microfissures structurelles. Le pré-durcissement à 75 ° C pendant 3h suivies par durcissement à température ambiante pour 28 jours est recommandé pour produire des géopolymères à base de métakaolin de haute



résistance mécanique de (51.06 MPa) [63]. Un long pré-durcissement dans une atmosphère humide est aussi avantageux pour le développement de la résistance des matériaux [62]. Un régime de durcissement approprié doit être appliqué pour la dissolution appropriée et la condensation des espèces de silice et d'alumine. Un régime de durcissement inapproprié pourrait entraîner un effet néfaste sur les propriétés mécaniques des produits finaux [64].

### **11. Rapport Si/Al de précurseur :**

La silice et l'alumine sont les principaux précurseurs de la réaction de géopolymérisation, et le rapport Si/Al est le facteur fondamental qui affecte le plus les propriétés du géopolymère. Le rapport en masse de silice ( $\text{SiO}_2$ ) par rapport à l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans le précurseur devrait de préférence être dans la plage de 2,0 à 3,5 pour obtenir un bon béton soit des rapports molaires Si/Al compris entre 1,733 à 3,033. Les rapports molaires Si/Al dans le béton géopolymère produit par Hardjito [65] sont d'environ 1,779 et 1,883.

### **12. Différents types des déchets :**

Les déchets peuvent être classés en plusieurs types en fonction de leur origine, de leur composition, de leur dangerosité ou de leur gestion. Voici les principaux types de déchets selon la norme de classement des déchets :

#### **- Déchets ménagers et assimilés :**

Ce sont les déchets produits par les ménages, tels que les déchets alimentaires, les emballages, et les appareils électriques.

#### **- Déchets industriels généraux :**

Ce sont les déchets produits par les entreprises et les industries, tels que les cartons, les papiers, les plastiques, les métaux et les bois

#### **- Déchets dangereux :**

Ce sont les déchets qui présentent des risques pour la santé et l'environnement, tels que les produits chimiques, les batteries, les huiles usagées, et les produits pharmaceutiques.

#### **- Déchets médicaux :**

Ce sont les déchets produits par les établissements de santé, tels que les seringues, les pansements, les produits chimiques et les équipements médicaux.

- **Déchets verts :**

Ce sont les déchets organiques produits par les jardins et les parcs, tels que les feuilles, les brindilles et les arbres.

- **Déchets de construction et de démolition :**

Déchets générés lors des opérations de construction et de démolition tels que briques, tuiles, métaux et plastiques.

Il existe d'autres classifications possibles en fonction de différents critères tels que la source, la nature, le mode de traitement ou de gestion des déchets.

**13. Valorisation des déchets de brique :**

Les déchets se réfèrent à tout type de matériel ou de substance qui est considéré comme inutile ou indésirable et qui doit être éliminé. Cela peut inclure des déchets solides tels que les emballages, les déchets alimentaires, les déchets de jardin, les matériaux de construction, les appareils électroniques ou les pneus usagés, ainsi que des déchets liquides tels que les eaux usées, les huiles usées ou les produits chimiques toxiques. Les déchets sont produits par les ménages, les entreprises, les industries, les établissements publics et les collectivités, et leur élimination peut poser des défis environnementaux, sanitaires et économiques importants. Les méthodes courantes de gestion des déchets comprennent la collecte, le tri, le traitement et l'élimination, mais de plus en plus d'efforts sont déployés pour réduire la quantité de déchets produits et pour encourager le recyclage, la réutilisation et la valorisation des déchets.

**14. Types de brique :**

Les briques pleines se déclinent en de nombreuses variétés avec différents aspects de surface Parmi eux :

- Brique de terre cuite
- Brique silico-calcaire
- Brique de l'adobe
- Briques réfractaires
- la brique de terre crue
- la brique de terre compressée.
- la brique cuite pleine

- la brique légère et isolante
- la brique cuite creuse
- la brique de chanvre
- la brique non gélive.
- la brique réfractaire

Il existe plusieurs types de briques, chacune ayant des propriétés et des usages spécifiques. [66,67].

### 15. Technique de la production de la brique :

La production de briques peut varier en fonction du type de matériau utilisé pour les fabriquer. Cependant, voici les étapes générales impliquées dans la production de briques en argile :

- **Extraction :** L'argile est extraite des carrières et stockée dans des silos. Ensuite, il est humidifié et pétri jusqu'à ce qu'il devienne une consistance uniforme (Figure I.7).



Figure I.7. Extraction et stockage de l'argile [68,69].

- **La préparation de la pâte :** La préparation consiste en deux opérations principales : Broyage et mélange des matières premières, dosage et mélange. Le but est d'obtenir une masse de lisier très homogène (Figure I.8).



Figure I.8. Préparation de l'argile pour fabriquer la brique rouge [69].

- **Broyage et malaxage :** Ces opérations ont pour but de rendre la masse d'argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage des briques. Cette opération a également pour but de réduire les inclusions solides éventuellement présentes dans l'argile pouvant influencer négativement la structure du produit en terre cuite [70].
- **Façonnage :** Selon la forme, on distingue différents types de briques:(Figure I.9)
  - Briques moulées main.
  - Briques pressées.
  - Briques étirées.



Figure II.9. Le Façonnage de brique rouge. [69].

- **Séchage :** En effet, le séchage est nécessaire pour sécher légèrement les briques d'argile avant cuisson. Les briques moulées sont placées sur des claies pour sécher à l'air pendant plusieurs jours. Ils peuvent également être séchés au four à des températures plus basses pour accélérer le processus. (Figure I.10)



**FigureI.10. Séchage de briques [68].**

- **Cuisson :** Les briques séchées sont cuites dans des fours à haute température (entre 800 et 1000 degrés Celsius) pendant plusieurs heures. Cette étape permet de durcir les briques et de leur donner leur couleur finale. (Figure I.11)



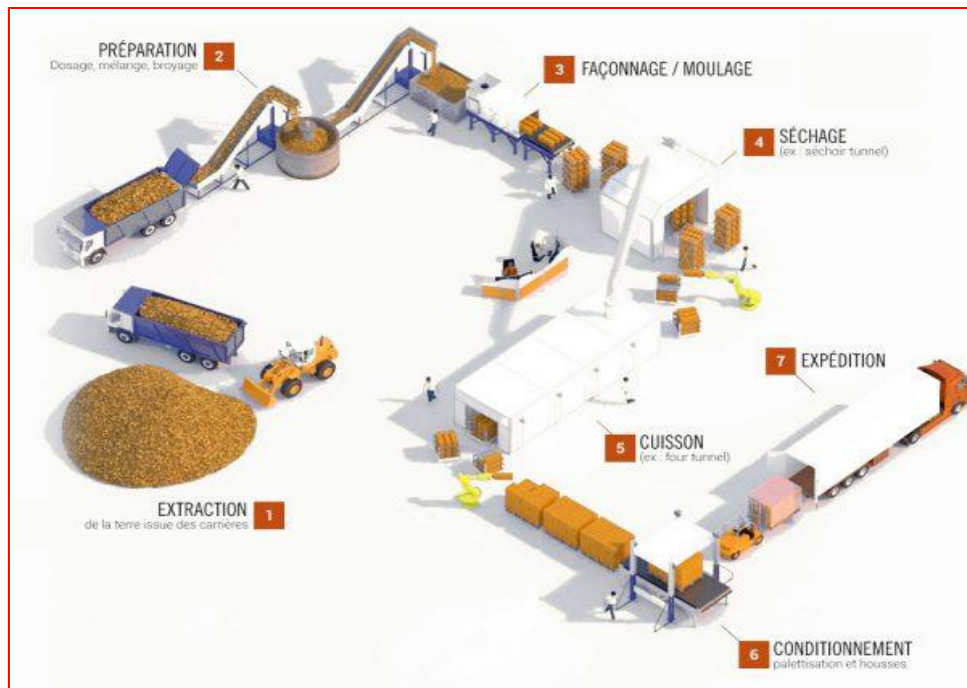
**Figure I.11. La Cuisson de brique rouge[69].**

- **Emballage :** Après la cuisson, les briques sont prêtes à être transportées et livrées sur chantier. Pour des raisons de facilité et de sécurité, elles sont préalablement empilées

sur des palettes et emballées de façon à minimiser la quantité d'emballage utilisé [71] (Figure I.12).



FigureI.12. L'Emballage de brique rouge[69]



FigureI.13. Les différents processus de fabrication de brique rouge[72].

### **16. Les avantages et les inconvénients des briques en terre cuite :**

Les briques en terre cuite sont un matériau de construction couramment utilisé dans de nombreuses régions du monde en raison de leurs propriétés mécaniques et de leur durabilité.

Voici certains des avantages et des inconvénients des briques en terre cuite :

- **Résistance** : Les briques en terre cuite résistent au feu, aux intempéries et aux chocs
- **Durabilité** : Les briques d'argile ont une durée de vie élevée qui peut atteindre des siècles sans nécessiter de réparations majeures.
- **Isolation thermique** : La brique en terre cuite a une faible conductivité thermique, ce qui la rend efficace en isolation thermique, ce qui réduit les coûts de climatisation et de chauffage.
- **Esthétique** : Les briques d'argile sont disponibles dans une grande variété de couleurs et de formes, permettant la création de bâtiments uniques et esthétiques.
- **Matériau naturel** : la brique en terre cuite est à la fois artisanale et écologique.
- **Facile à installer** : Installation rapide et facile d'un mur de briques

#### **Inconvénients :**

- **Impact environnemental**: Les briques en terre cuite peuvent produire de grandes irrégularités qui peuvent provenir d'une mauvaise fabrication ou lors de travaux, ce qui affecte l'environnement.
- **Fragilité**: Les briques en terre cuite sont relativement fragiles et se cassent facilement, surtout si elles sont exposées au gel, car leur résistance mécanique est faible
- **La brique rouge poreuse ne peut pas être utilisée comme matériau de construction dans les zones à forte humidité.**

### **17. Recyclage de la brique de terre cuite :**

Le recyclage est le processus de restauration et de réutilisation des matériaux des produits ou des déchets dont la vie se termine. Le recyclage est un moyen important de protéger l'environnement et d'améliorer le développement durable.

A petite échelle, certaines entreprises de démolition récupèrent les briques en les nettoyant du mortier. Elles peuvent alors être réutilisées pour des travaux de restauration ou pour des nouvelles constructions auxquelles elles donnent un certain cachet .Si la réutilisation de

briques et tuiles reste marginale à l'heure actuelle, on peut s'attendre à une croissance dans le cadre de la démolition sélective des bâtiments[73].

La brique de terre cuite peut être recyclée pour réduire les déchets de construction et minimiser l'impact environnemental. Voici quelques méthodes courantes de recyclage de la brique de terre cuite :

- Réutilisation: Un exemple dans les champs de construction est généralement cassé pour le convertir en décombres. Ensuite, il est utilisé pour remplir et installer certaines méthodes.
- Tennis Fields: Les briques sont utilisées pour peindre les courts de tennis. La technique consiste à la broyer pour entrer dans la formation de surfaces d'argile.
- Terre : les briques d'argile peuvent être utilisées pour créer des bassins de compost, car il peut aider à conserver l'humidité et à maintenir une température fixe. Il peut également être utilisé comme engrais pour planter les plantes

En recyclant les briques de terre cuite, il est possible de réduire les déchets de construction et de prolonger la durée de vie de ce matériau de construction durable.

### **Conclusion :**

En résumé, les géopolymères sont des matériaux de construction innovants et durables qui peuvent être utilisés dans de nombreux domaines de la construction. Ils sont fabriqués à partir de matières premières abondantes et disponibles localement telles que les cendres volantes, les scories, l'argile et le sable, ce qui les rend moins chers et plus respectueux de l'environnement que les matériaux traditionnels tels que le ciment Portland. il est idéal pour une utilisation dans des structures exposées à des environnements extrêmes.

Cependant, malgré leurs avantages, les géopolymères évoluent encore et nécessitent des recherches et des expérimentations supplémentaires pour améliorer leurs propriétés et leur durabilité à long terme. La production de géopolymères nécessite également des compétences particulières et des techniques de fabrication avancées, ce qui peut rendre les projets de construction plus coûteux.

Dans l'ensemble, les géopolymères sont des alternatives prometteuses aux matériaux de construction traditionnels, offrant des performances supérieures dans certains cas tout en contribuant à réduire l'impact environnemental de l'industrie du génie civil. Par conséquent, il



est important de soutenir davantage la recherche et le développement des géopolymères pour améliorer leurs propriétés et leur large éventail d'applications dans l'industrie.

Le recyclage des déchets de briques est un domaine d'intérêt croissant dans le domaine de la gestion des déchets et de la protection de l'environnement. Dans le but de trouver des solutions durables pour traiter les déchets de briques et les transformer en une ressource utile à moindre impact environnemental.

Les déchets de briques sont généralement générés lors de la construction, de la démolition ou de la rénovation d'un bâtiment. Cela comprend briques endommagées, les briques brisées, la poussière de brique et d'autres matériaux connexes. Au lieu de simplement les traiter comme des déchets qui doivent être éliminés, le recyclage des déchets de briques explore les moyens de recycler et de réutiliser de différentes manières.

Une façon courante d'utiliser les déchets de briques est le recyclage. Les briques peuvent être triées, lavées et concassées pour produire des granulats ou des granulats de briques recyclées. Ces matériaux recyclés peuvent être utilisés dans la construction de nouvelles structures telles que des trottoirs, des dalles, des murs de soutènement et des remblais. Le recyclage des déchets de briques aide à préserver les ressources naturelles en évitant l'extraction de nouvelles matières premières et en réduisant la quantité de déchets qui se retrouvent dans les décharges.

Outre le recyclage et la réutilisation, les déchets de briques peuvent également être utilisés pour fabriquer des matériaux de construction alternatifs tels que les briques composites. Ces briques sont fabriquées en mélangeant des déchets de briques avec d'autres matériaux tels que des déchets industriels et plastiques pour former un nouveau produit de construction à la fois durable et résilient.

Le recyclage des déchets de briques présente de nombreux avantages. Contribuez à réduire les déchets, à conserver les ressources naturelles, à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir une économie circulaire. De plus, des opportunités économiques peuvent être créées en créant de nouveaux marchés pour les matériaux recyclés et en encourageant l'innovation dans le secteur de la construction.

**CHAPITRE II**  
**MATERIAUX ET PROCEDURESEXPERIMENTALE**

## CHAPITRE II MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

### **Introduction :**

Les matériaux sont omniprésents dans notre vie quotidienne et constituent un élément fondamental de la plupart des objets que nous utilisons. Ils sont utilisés dans divers domaines tels que la construction, la fabrication, l'automobile et la technologie. Les propriétés des matériaux varient considérablement en fonction de leur type et de leur composition. Il est important de comprendre comment ces propriétés affectent l'utilisation et de prendre en compte des propriétés telles que la résistance, la flexibilité, la conductivité, la densité et la durabilité afin de déterminer le meilleur matériau pour une application particulière.

Dans ce chapitre, nous fournirons une explication complète des matériaux (leurs propriétés, types, classifications, etc.), ainsi que les procédures que nous avons appliquées dans cette étude.

### **1. Caractérisation des matériaux utilisés :**

#### **1.1. Poudre Déchet de Brique (Waste brick Powder):**

Les briques sont des éléments architecturaux, généralement de forme rectangle, fabriqués à partir d'argile crue séchée au soleil (briques crues) ou cuites au four, principalement utilisées pour la construction de murs.

La préparation de la poudrette de déchet de brique rouge (voir la Figure II.1), a été réalisée au niveau du laboratoire des Travaux Publics de Ghardaïa Sud. Les étapes de préparation de la poudrette sont comme suit :



**Figure II.1. Poudre déchet de brique.**

**A). Processus de collecte des déchets de briques :**

Le premier est la collecte des déchets de briques inadaptées et cassées des fabriques de briques et des décombres des maisons de démolition, car la production de grosses briques génère généralement une grande quantité de déchets à chaque étape de fabrication.

**B). Processus de concassage de brique :**

D'abord nous mettons les chutes de briques dans la machine de concassage de pierre (concasseur) et nous obtenons de petits granulés de briques. Ensuite, ont été écrasés dans la machine concasseur, nous l'écrasons également et le broyons dans une machine Micro-Deval (MDE), nous mettons 500 g de granulés de brique avec 5 kg de fer (Les boulets à mélanger avec l'échantillon), nous les mettons dans une machine de Micro Deval pour qu'ils tournent 1200 tours, d'obtenir des mélanges granulés plus petits que les précédents. Ensuite la poudre de brique qu'on a obtenue a été tamisée par le tamis 0.08mm (voir la Figure II.2).



**Figure II.2. Étapes de préparation la poudre déchets de briques.**

**C). Analyse chimique de déchet de brique [EN P 15-461] :**

Le tableau II.1 présente l'analyse chimique de déchet de brique.

**Tableau II.1. Analyse chimique de déchet de brique.**

<b>Echantillon</b>	<b>Déchet de brique</b>
<b>Insolubles (%)</b>	81.5%
<b>Carbonate CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	07%
<b>Sulfate SO<sub>3</sub><sup>-2</sup> (%)</b>	1.37%

**D). Analyse sédimentométrique [NFP 94-057] :**

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage du sol, s'applique aux éléments de moins de 0,100 mm de diamètre. Le but de l'essai est quantifier des grains < 80µm, et le mode opératoire comme suit :tout d'abord, nous apportons deux tubes à essai de 2 litres, puis nous remplissons un tube avec de l'eau et le dé flocculant (témoin) et le deuxième tube nous mettons la substance et dé flocculant (trempage pendant 15 heures), puis on agite les matériaux, et enfin on lit l'hydromètre à 0,5, 2, 5, 10, 20, 40, 80 minutes, 4 et 23 heures(voir la Figure. II.3, II.4).Ramener la lecture au % de passant à 80 µM (Tableau II.2).

Tableau II.2 : Résultat de l'essai de sédimentométrie.

Tempér ° C	Temps	Durée de chute	R'=R -1000 R : lecture au densimètre	Correction (C)	Lecture corrigée R <sub>1</sub> =R'+C Ou R <sub>1</sub> =R'-C	Diamètre (D)	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon
20.2C°	8h25	30 "	16	+0.038	16.038	0.075	100
20.2C°	8h26	01'	15.5	+0.038	15.538	0.055	97
20.2C°	8h27	02'	15	+0.038	15.038	0.038	94
20.2C°	8h30	05'	14	+0.038	14.038	0.025	88
20.2C°	8h35	10'	12.5	+0.038	12.538	0.017	78
20.2C°	8h45	20'	11	+0.038	11.038	0.012	69
20.4C°	9h05	40'	09	+0.108	9.108	0.008	57
20.4C°	9h45	80'	07	+0.108	7.108	0.006	44
20.8C°	11h05	160'	05	+0.152	5.152	0.004	32
21.2C°	13h45	320'	03	+0.226	3.226	0.003	20
20C°	24 h	1440'	01	+0.000	1.000	0.002	06
20 C°	48h	-	0.5	+0.000	0.500	0.001	03
-	72 h	-	-	-	-	0.0005	-

Remarque :

$$p' = \frac{y}{100} P$$

Avec y = % du passant à 0.080 mm = 100

R<sub>1</sub> = R' + C Si T° > à 20 ° C

R<sub>1</sub> = R' - C Si T° < à 20 ° C



Figure II.3. Analyse sédimentométrique à LTPS.

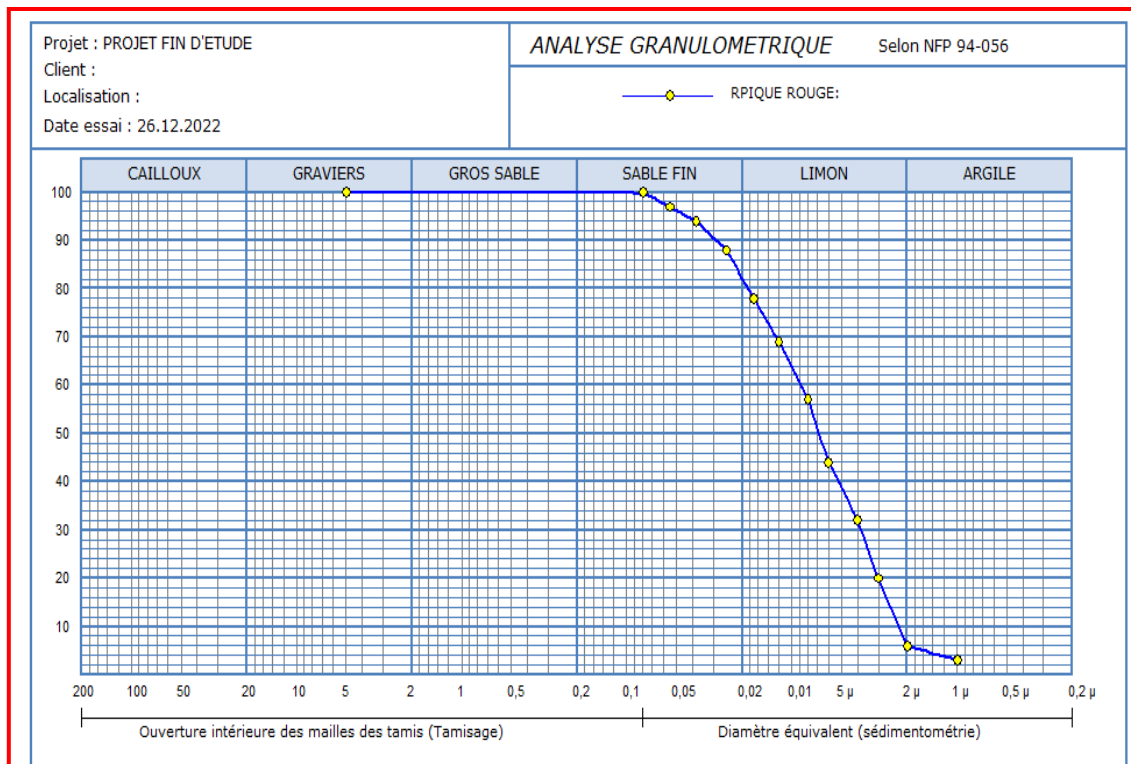


Figure II.4 : La courbe granulométrique selon le test de sédimentométrique de brique utilisé.

**E). Essai au bleu méthylène [NFP 94-068] :**

Le test au bleu de méthylène, également connu sous le nom de "test bleu", est un test utilisé en géotechnique pour déterminer la pureté des sables, des agrégats, des sols en général et des différents types d'argiles qu'ils contiennent.

L'objectif de l'essai est d'évaluer la quantité et la qualité de la fraction argileuse, à partir de la surface spécifique.

**Mode opératoire :**

Nous préparons un échantillon de déchets de briques rouges, le mettons dans un hammam à 110°C, puis le passons à travers un tamis de 2 mm. L'échantillon restant (en grammes) est ensuite pesé (M1).

Deuxièmement, préparer la suspension. Verser 500 ml d'eau distillée dans le bécher et ajouter l'échantillon séché en remuant bien avec une cuillère.

On met le bécher sous le mélangeur à 600 tr/min pendant 5 minutes, puis à 400 tr/min (voir la Figure II.5).

On ajoute des doses successives de la solution bleue 5 cm<sup>3</sup>.

Un diamètre compris entre 8 mm et 12 mm doit être obtenu à partir de la goutte prélevée. Le test est considéré comme positif si un halo bleu clair ferme d'environ 1 mm de diamètre apparaît. Les résultats sont présentés dans le Tableau II.5 et la Figure II.6).



**Figure II.5. Essai au bleu méthylène à LTPS.**



Tableau II.3. Résultat de l'essai de au bleu de méthylène.

GRANULOMETRIE (PASSANTS A)				LIMITES D'ATTERBERG		ES	VB	VB <sub>t</sub>
05 mm	2 mm	0.4 mm	0.08 mm	WL	IP			
PRISE D'ESSAI M <sub>n</sub> = 60grs				VOLUME DE BLEU INJECTE DANS LA PRISE				
CALCUL DE LA TENEUR EN EAU				D'ESSAI V = <b>05 cm<sup>3</sup></b>				
TARE N°	A		E					
PT	<b>183,58</b>		<b>193,15</b>	VALEUR AU BLEU DE LA PRISE D'ESSAI				
Ph + T	<b>183,57</b>		<b>193,14</b>	PASSANT A :				
Ps + T	<b>125,01</b>		<b>126,74</b>					
Ps	<b>0,01</b>		<b>0,01</b>	$VB = \frac{V}{M_s} = \frac{5}{59.99} = 0.08$				
W (%)	<b>0.02</b>		<b>0.02</b>					
W <sub>moy</sub> (%)	<b>0.02</b>							
CALCUL DE LA MASSE SECHE DE LA								
PRISE D'ESSAI M <sub>s</sub> :				$VB_t = \frac{VB * t\%}{100} = 1$				
W % = Ph-Ps .100 = <b>0.02</b>								
$P_s = \frac{Ph * 100}{100 + W\%} = 59.99$								

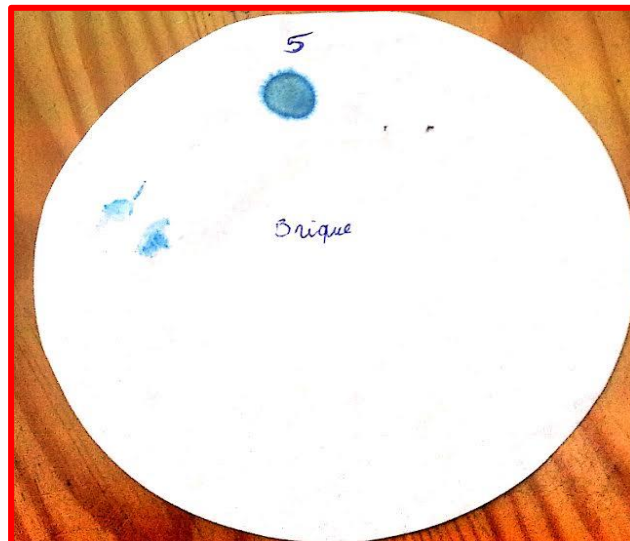


Figure II.6. Le volume de bleu injecté dans la prise d'essai à LTPS.

### 1.2. Sable :

Le sable est une matière solide granulaire constituée de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale(essentiellement des roches) ou organique (coquilles, squelettes de coraux, etc.) dont la dimension est comprise entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie [74]. Le sable de

l'Oued M'Zi de la région de la ville de Laghouat a été utilisé dans cette étude (voir la Figure II.7).



Figure II.7. Sable de oued M'Zi Laghouat [75].

**A). Analyse granulométrique [NF P 18- 560] :**

L'analyse granulométrique peut être définie par tamisage. C'est une suite d'opérations qui séparent les éléments qui composent l'échantillon selon leur taille, en imbriquant les tamis les uns sur les autres afin que les dimensions des ouvertures diminuent de haut en bas (voir la Figure II.8).



Figure II.8. Les tamis utilisé



Figure II.9. Balance utilisé

**Objectif d'essai :**

Le objectif de l'essai se matérialise par :

- ✓ La granulométrie varie entre 10-6 mm et 1000 mm.
- ✓ Classification pour caractériser des particules de différentes tailles.
- ✓ Création de courbes granulométriques qui fournissent des informations très précises sur le sol étudié.

Tableau II.4. Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé.

Les tamis	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Pourcentage refus %	Pourcentage passant %
2.5	4	4	0.75	99.25
1.25	20	24	3.42	96.58
1	9	33	4.71	95.29
0.5	106	139	19.85	80.15
0.25	172	311	44.42	55.58
0,125	132	443	63.28	36.72
0,08	23	466	66.57	33.43

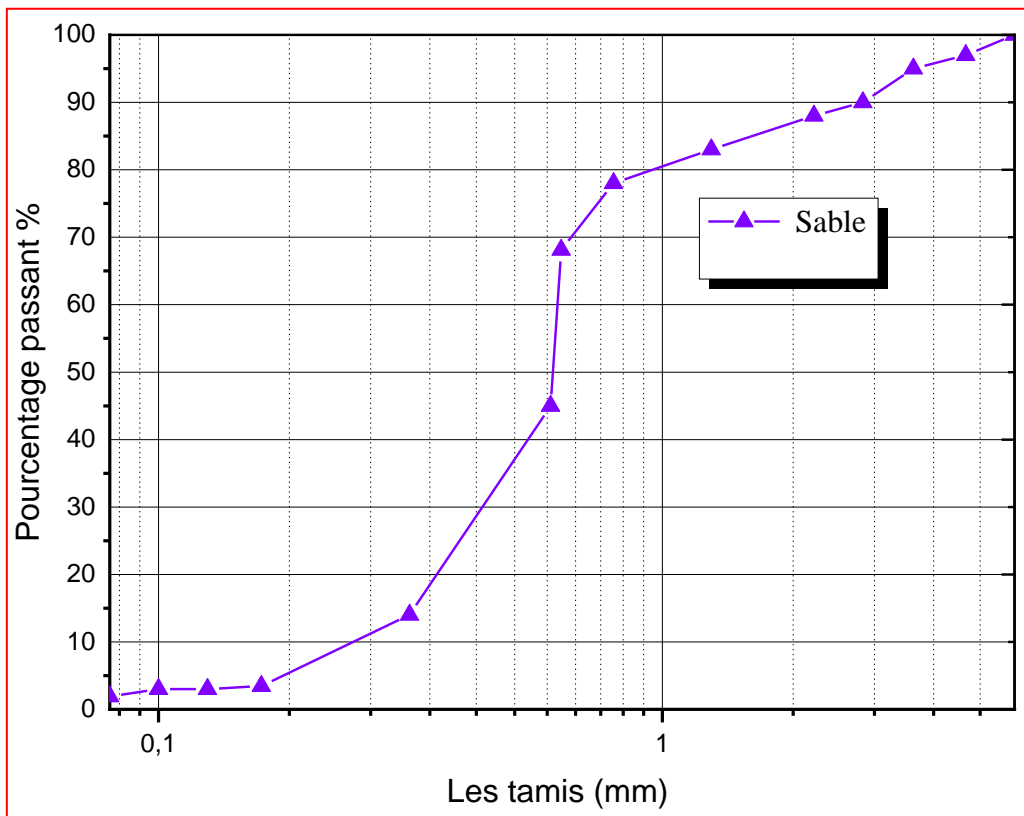


Figure II.10. La courbe granulométrique de sable utilisé.

**B). Equivalent de sable [NF EN 933-8] :**

L'équivalent sable est une méthode normalisée d'évaluation de la propreté des granulats fins (sable ou pierre concassée) par rapport au pourcentage de particules fines ou nocives dans l'échantillon: s'il est égal à 120 g, ce test est effectué après avoir effectué deux méthodes. L'une est la méthode visuelle et l'autre est la méthode du piston(voir la Figure II.11).

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

Où :

- Hauteur  $h_1$  : sable propre + éléments fins.
- Hauteur  $h_2$  : sable propre seulement.

Tableau II.5. Résultat de l'essai de l'équivalent du sable utilisé.

Paramètre	Unité	Equivalent de sable visuel	Equivalent de sable par piston
$H_1$	Cm	11	10.9
$H_2$	Cm	8.8	8.9
ES	%	80	81.65
ES moyenne	%	80.83	



Figure II.11. L'essai de l'équivalent du sable.

**C). La masse volumique apparente et absolue de sable [NF P18-555] :**

**C.1). Masses volumiques apparentes :**

Déterminer les masses volumiques apparentes du matériau, c'est-à-dire sa densité à l'état naturel (en présence des pores).

Tableau II.6. Résultats de la masse volumique apparente de sable.

N° d'essai	Masse (g)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Essai 1	3037	1,519	1.517
Essai 2	3033	1,517	
Essai 3	3029	1,515	
Essai 4	3032	1.516	

**M** : la masse de l'échantillon sans poids du récipient.

La masse volumique apparente du sable est déterminée par la formule :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Où :

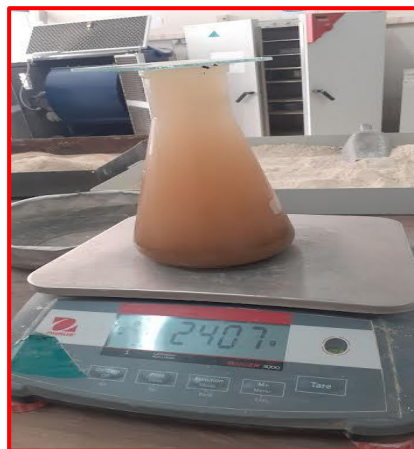
$\rho_{app}$  : la masse volumique apparente.

**V** : volume de récipient est connu 2000 cm<sup>3</sup>.

**C.2). Masse volumique absolue :**

Tout d'abord, nous prélevons un échantillon de sable sec et le pesons, puis nous pesons le récipient rempli d'eau (voir la **Figure II.12**).

- Poids de sable secs → P<sub>1</sub>= 352g
- Poids du récipient plein d'eau → P<sub>2</sub>= 21846g
- P<sub>3</sub>=P<sub>1</sub>+P<sub>2</sub>= 2536.6g
- Poids récipient + sable + eau → P<sub>4</sub>= 2484.3g
- Volume des sable →V= P<sub>3</sub>+P<sub>4</sub>= 129.6



**FigureII.12. Masse volumique absolue.**

**Tableau II.7. Propriétés physiques de sable**

<b>Propriétés physiques</b>	
<b>Masse volumique absolue en (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2,72</b>
<b>Masse volumique apparente en (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,52</b>
<b>Module de finesse</b>	<b>1,98</b>
<b>Equivalent de sable (%)</b>	<b>80,83</b>

**D). La teneur en eau [NF P18-554]:**

Le test de teneur en eau permet de déterminer le pourcentage massique (W%) d'eau dans le sable testé. La teneur en eau est donnée par la formule :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 (\%)$$

Où :

$M_h$  : la masse de sable humide (g).

$M_s$  : la masse de sable sec (g).

**E). Caractérisation chimique de sable [EN P 15-461] :**

Ces essais ont été réalisés au Laboratoire des Travaux Publics de Ghardaïa Sud (LTPS) et sont regroupés dans le tableau :

**Tableau II.8. Analyse chimique du sable utilisé.**

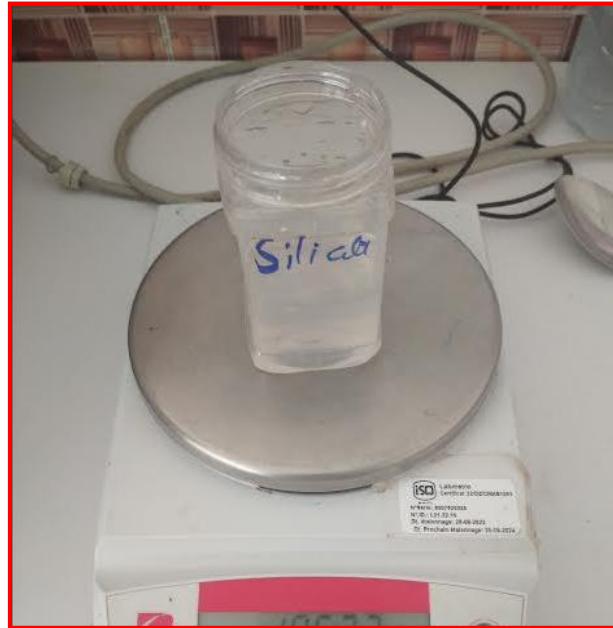
<b>Echantillon</b>	<b>Sable</b>
<b>Insolubles %</b>	<b>92.5</b>
<b>Carbonate CaCO<sub>3</sub> %</b>	<b>05</b>

**1.3.Le silicate de sodium :**

La silice est la forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) qui entre dans la composition de nombreux minéraux. Elle existe à l'état libre sous différentes formes cristallines, amorphes ou combinées. Dans les silicates, les groupes SiO<sub>2</sub> sont liés à d'autres éléments comme l'Aluminium, le Fer, le Magnésium, le Calcium, le Sodium et le Potassium. La silice amorphe

peut être utilisée comme adjuvant dans la production des géopolymères pour compenser le déficit en oxyde de silicium dans la matière première d'aluminosilicate [76].

Les solutions de silicate de sodium aussi appelées verre soluble sont des solutions de  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{SiO}_2$  combinés sous différents rapports. A de fortes concentrations, les solutions de silicate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) sont considérées comme une dispersion colloïdale de particules (entre 1 et 5nm) de silicate dans une phase aqueuse alcaline [77](voir la FigureII.13).



**Figure II.13. Le silicate de sodium.**

#### **1.4.Hydroxyde de sodium (NaOH) :**

En plus de la source de réactifs solides, c'est-à-dire les aluminosilicates, un activateur chimique est nécessaire pour initier la géopolymérisation. Généralement, des sources d'hydroxyde ou de silicate alcalin sont utilisées.

Les solutions d'activation les plus simples restent les solutions d'hydroxyde alcalin comme la potasse (KOH) et la soude (NaOH). NaOH est l'activateur le plus largement utilisé dans la famille des hydroxydes en raison de son faible coût et de sa disponibilité immédiate.

Une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) a été préparée au laboratoire LTPS, avec deux concentrations différentes, la première avec une concentration de 8 mol et la seconde avec une concentration de 10 mol.(Voir la FigureII.14).



Figure II.14. Hydroxyde de sodium (NaOH).

### 1.5. Eau de gâchage :

De l'eau distillée a été utilisée dans la préparation du mortier car elle est considérée comme de l'eau pure et exempte d'impuretés.

## 2. Partie expérimentales :

### 2.1. Méthode de formulation de mortier cimentaire :

Le protocole suivant a été répété à chaque fois pour préparer le mortier de géo polymère:

- Huilez légèrement l'intérieur du moule pour faciliter le démoulage. Portez une attention particulière à la couche d'huile que vous appliquez, car trop d'huile peut affecter le mélange de mortier
- Préparez tout l'équipement et les matériaux nécessaires à la fabrication du mortier.
- Préparer les pesées des matériaux à utilisés [sable, SiO<sub>2</sub>, NaOH (8mol ou/et 10mol), eau, déchet de brique]. (voir la [Figure II.15](#)).

Tableau II.9. Quantités de matériaux utilisés.

matériaux	Brique (g)	Sable (g)	Eau (ml)	SiO <sub>2</sub> (ml)	NaOH (ml) (8mol (ou/et) 10mol)	Liquide/Brique
Quantités	450	1050	50	185	74	0.6





**Figure II.15. Moule normalisé de 40x40x160 mm à LTPS.**

**A). Le malaxage :**

Le mélange joue un rôle important dans la fabrication du mortier, son style et son temps doivent donc être maîtrisés et respectés.

- D'abord le sable puis les déchets de briques sont placés dans un malaxeur à mortier standard pendant 1 minute à vitesse lente.
- Deuxièmement, nous commençons à verser la solution alcaline préparée auparavant  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NaOH}$  (8 mol ou/et 10 mol) dans le mélangeur pendant une minute à basse vitesse.
- Troisièmement, nous versons de l'eau distillée dans le mélange pendant une minute à basse vitesse.
- Quatrièmement, arrêtez le mélangeur et raclez les parois et le fond du réservoir pendant 30 secondes à 1 minute.
- Puis on reprend le pétrissage pendant 1 minute à grande vitesse afin d'homogénéiser la pâte.
- Enfin, le mélange est versé directement dans les moules.

Le malaxage de nos mortiers a été réalisé avec un malaxeur de laboratoire pour mortier à axe vertical, constitué d'une cuve et d'une palette centrale tournante à deux vitesses lente et rapide, de capacité de 5 litres(voir la FigureII.16).



**Figure II.16. Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier [service de Béton –LTPS].**

**B). Moulage des éprouvettes :**

Nous déchargeons l'échantillon immédiatement après la fin du mélange du mortier dans chacune des compartiments du moule à l'aide d'une spatule appropriée et l'installons sur la table à chocs

Nous utilisons la table à chocs (60 chocs) avec soin et gardons une trace de la quantité de mortier dans chacune des compartiments du moule jusqu'à ce qu'elle soit pleine.

Retirez délicatement le moule de la table d'impact, retirez immédiatement l'excédent de mortier à l'aide d'une règle métallique (voir la **FigureII.17**)



**FigureII.17. Le moule est rempli et installé sur la table d'impact.**

**C). Démoulage des éprouvettes :**

Après 24 heures, les échantillons sont démoulés, et placés dans une étuve à une température de 55° pendant une durée de (1 jour, 2 jours, 3 jours, 4 jours, 5 jours, 6 jours, 7 jours) selon chaque échantillon (voir la **Figure II.18**).



**Figure II.18. Démoulage les échantillons.**

**D). Conservation :**

Afin de déterminer les propriétés mécaniques et physiques, les moules contenant les mortiers ont été recouverts d'un film plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Les échantillons ont été démoulés après 24 h et conservés dans des boîtes en plastique jusqu'aux tests 30 J. Alors que les échantillons utilisés pour déterminer l'influence de la durée de temps sur la résistance à la chaleur, nous le mettons dans un four à différentes durées (24 h jusqu'à 168 h) dans une température constante de 55 °C.

**Tableau II.10. Mode de conservation.**

		Durée	
8 mol	Mix 1	1d	24h
	Mix 2	2d	48h
	Mix 3	3d	72h
	Mix 4	4d	96h
	Mix 5	5d	120h
	Mix 6	6d	144h
	Mix 7	7d	168h
10 mol	Mix 1	1d	24h
	Mix 2	2d	48h
	Mix 3	3d	72h
	Mix 4	4d	96h
	Mix 5	5d	120h
	Mix 6	6d	144h
	Mix 7	7d	168h

## 2.2. Ladensité :

La masse est déterminée à partir d'essais en laboratoire. Le principe de ce test est de déterminer la masse d'un échantillon de chaque lot d'échantillons placés à 55°. Pesez avec une précision de 0,01 g (voir la [Figure II.19](#)).



Figure II.19. Balance de 0.01g à LTPS.

## 2.3. Essais à la traction par de flexion :

Avec le test de résistance, le test de flexion est l'un des types de contrainte les plus courants, ce qui est particulièrement important pour les tests.

Le test est réalisé sur des échantillons prismatiques, à l'âge de 30 jours, une bande de matériau à tester est placée sur deux colonnes et une force est appliquée au centre de la bande jusqu'à la rupture (voir la [Figures II.20](#)).

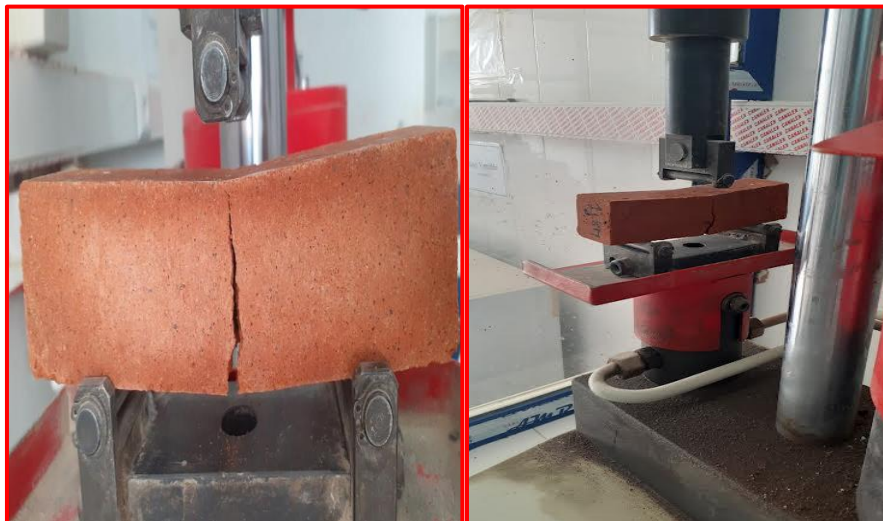


Figure II.20. Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion.

#### 2.4. Essai de compression :

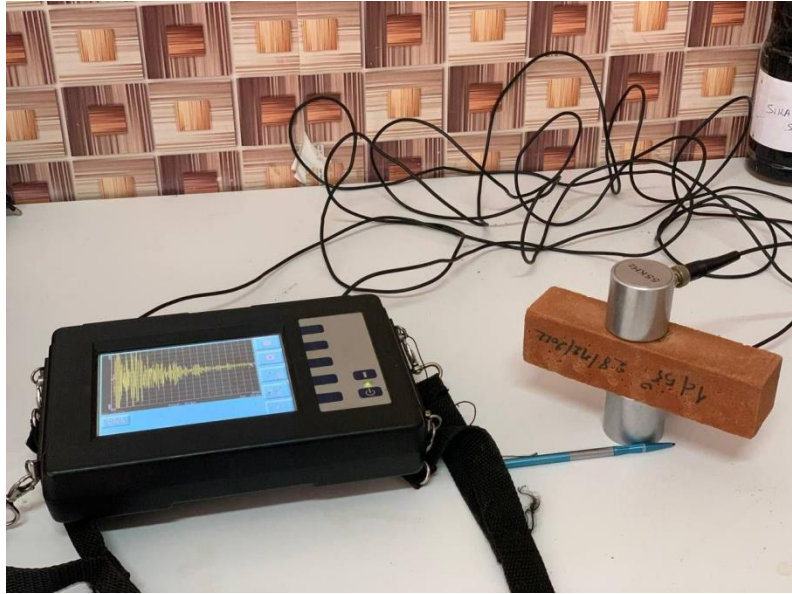
Les tests de pression sont effectués en laboratoire, dans un appareil à pression, après 30 jours. Nous plaçons l'échantillon entre deux plaques de piston, la plaque supérieure est fixe et la plaque inférieure est mobile. Le corps de l'échantillon est écrasé par la hauteur de la plaque inférieure en appliquant progressivement une tension à vitesse constante de montée (vitesse 3). La valeur de la charge maximale est donnée dès le début de l'affaissement. Nous utilisons la valeur de cette charge maximale pour déterminer la résistance reçue (voir la **Figure II.21**).



**Figure II.21. Dispositif de rupture en compression [78].**

#### 2.5. Vitesse ultrasonique :

Ultrason c'est un essai non destructif très important qui nous permet de détecter à la fois plusieurs caractéristiques du mortier durci, tels que : le degré de compacité, l'homogénéité, la résistance à la compression, le taux de fissuration, ...etc. Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) (**Figure II.22**). Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue. L'appareil comprend avec capteurs mis en contact avec le mortier, un générateur d'ondes, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le mortier entre les transducteurs, la vitesse d'onde,  $V$ , dans un milieu homogène, isotrope et élastique.



**Figure II.22. Dispositif ultrason.**

### **2.6. Absorption capillaire :**

Les mesures capillaires sont réalisées comme spécifié dans la norme AFPCAFREM sur des éprouvettes de 40 x 40 mm.

Les échantillons sont d'abord séchés dans une étuve à une température de 55°C jusqu'à ce que la masse soit stable, puis laissés à l'extérieur et pesés avec une balance de précision de 0,01 g pour déterminer le poids sec  $M_0$ . L'échantillon est placé dans un lit de gravure dans un récipient en plastique peu profond avec de l'eau. La profondeur d'immersion de la surface de l'échantillon dans le test d'adsorption est de 2 à 3 mm (voir la Figure II.23).

Après chaque immersion, retirer l'échantillon de l'eau, essuyer la surface, sécher la surface pour éliminer l'excès d'eau présent à la surface et peser ( $M_t$ ).

Les mesures de masse et de pénétration d'eau sont prises aux intervalles suivants : 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90 minutes, 24 heures. La quantité d'eau absorbée est définie par la relation :

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

Où :

$W$  :Quantité d'eau d'absorption par capillaire (%).

$M_t$  : Masse de l'éprouvette à l'instant t (kg).

$M_0$  : Masse initiale de l'éprouvette (kg).

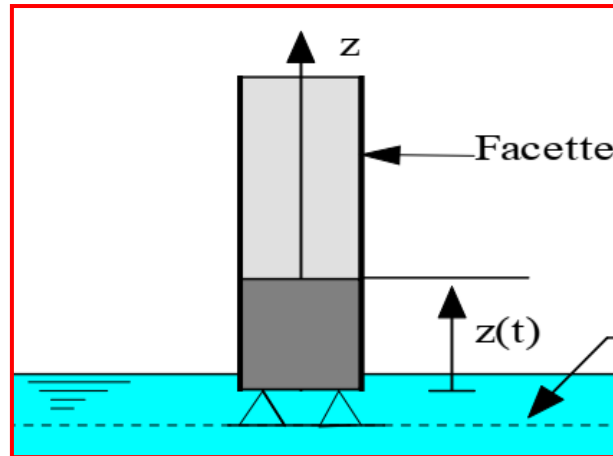


Figure II.23. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire [78].

### 2.7. Porosité accessible à l'eau :

Nous avons mesuré la porosité accessible à l'eau selon les recommandations de l'AFC-AFAM et cette porosité a été estimée en faisant la moyenne des trois valeurs. Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve à 55°C jusqu'à ce que la masse soit stable ( $M_d$ ). Ensuite, l'air présent dans les pores du mortier a été évacué avec une pompe à vide (voir les Figure II.24). La masse d'un cube de mortier entièrement saturé a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$P = \frac{(M_{sa} - M_d)}{(M_{sa} - M_{sw})} * 100$$

Où :

$M_{sa}$  : la masse saturée d'eau dans l'air.

$M_d$  : la masse sèche.

$M_{sw}$  : la masse saturée d'eau sous l'eau.



**Figure II.24. Montage pour la mesure de la porosité accessible à l'eau à LTPS.**

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons discuté de l'explication et de la mention des matériaux expérimentaux et des méthodes utilisées dans cette étude.

De plus, nous avons abordé en détail les différentes méthodes de préparation du mortier géo polymère à partir de déchet de brique.

Nous avons également présenté le protocole d'essai utilisé dans cette étude pour déterminer les propriétés physiques (densité, porosité, absorption capillaire) et les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction à l'écoulement) des composés. Avec le remplacement du ciment par des déchets de briques rouges et une modification de la concentration en NaOH (8mol, 10mol).



**CHAPITRE III**  
**RESULTATSEXPERIMENTAUXETINTERPETATIONS**

## CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPETATIONS

### Introduction:

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats d'essais effectués sur un mortier géopolymère, qui a été préparé avec deux concentrations différentes d'hydroxyde de sodium dans différents temps de cure.

Les résultats sont liés aux propriétés physiques (la densité, absorption capillaire et porosité accessible à l'eau) et à la résistance mécanique (compression et traction par flexion) et la vitesse ultrasonique.

### 1. Aspect visuelle :

La figure III.1 présente des images de mortier geopolymèreaux premiers jours



La Figure III.1 présente des images de mortier geopolymère.

**2. La masse volumique :**

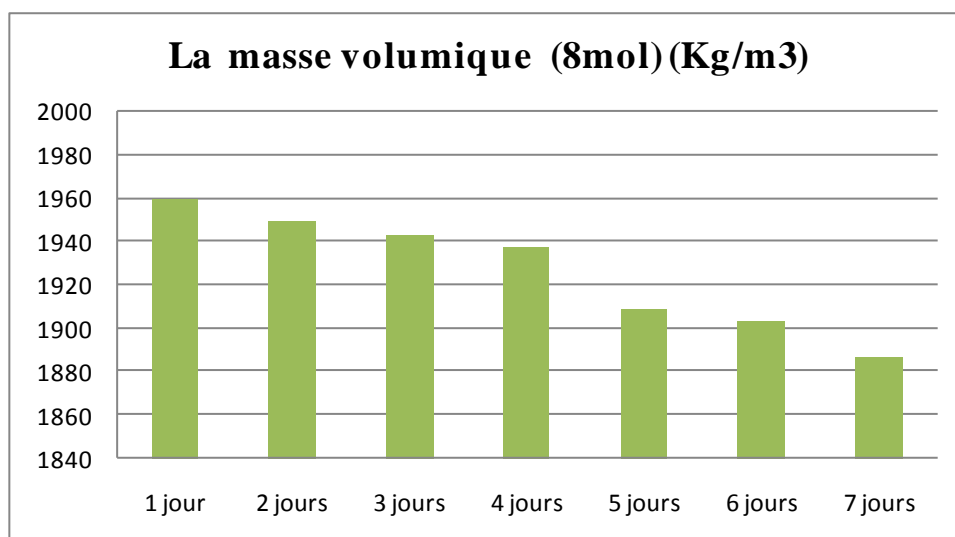
Les résultats de la masse volumique pendant les 7 jours de durcissement à 55° C sont présentés dans les Figures III.2, III.3. Il faut bien noter la densité à commencer de diminuer légèrement en fonction de la durée de durcissement jusqu'à la stabilité de masse après 5 jours de durcissement. Les valeurs de densité varient entre (1959.06, 1909.09 Kg/m<sup>3</sup>) pour les mélanges de 8 mol de concentration, et entre (1993.32, 1935.21 Kg/m<sup>3</sup>) pour les mélanges de 10 mol de concentration, comme ont été indiquées dans les deux tableaux III.1, III.2.

**Tableau III.1. La masse volumique pour les mélanges de 8mol.**

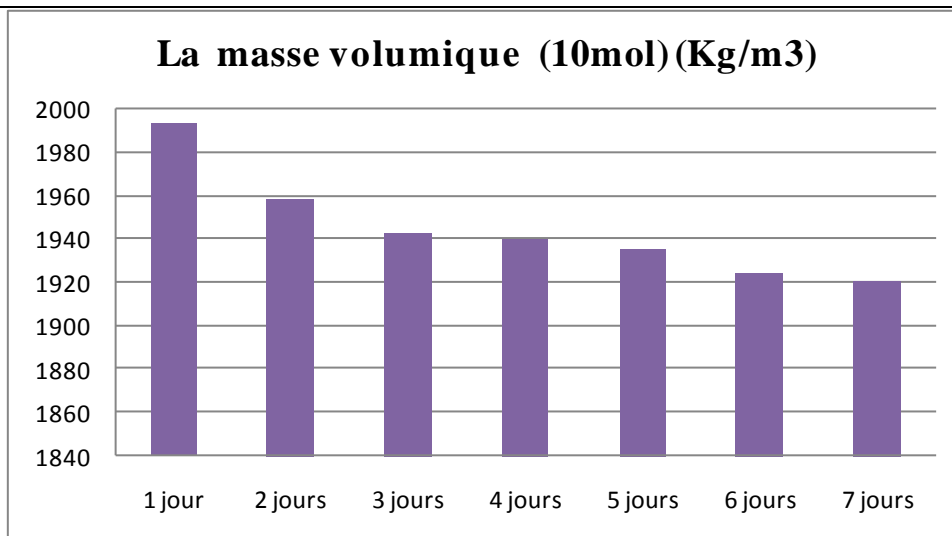
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )8Mol							
La durée	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours
Kg/m <sup>3</sup>	1959.06	1949.06	1942.62	1937.54	1909.18	1909.09	1909.41

**Tableau III.2. La masse volumique pour les mélanges de 10mol**

Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> ) 10Mol							
Les échantillons	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours
Kg/m <sup>3</sup>	1993.32	1958.28	1942.62	1939.73	1935.55	1935.49	1935.21



**FigureIII.2. Résultats de la masse volumique de mortier avec 8mol.**



**FigureIII.3. Résultat des masses volumiques des variantes étudiées (10mol).**

### **3. Résistance à la compression :**

Les Figures (III.4 et III.5) montrent les différents résultats de résistance à la compression après 1 mois pour les différents variant en fonction de durcissement 7 jours, ce qui nous a permis de faire les observations sur l'effet de concentration de la solution alkali NaOH, que les échantillons qui ont été formulé avec une concentration de 10 moles d'hydroxyde de sodium NaOH(Figure III.4) présentent les meilleurs résultats en résistance à la compression par rapport échantillons qui ont été formulé avec une concentration de 8 moles. Il faut bien noter que la résistance à la compression commence à développer en fonction de la durée de durcissement. Les valeurs les plus élevées ont été enregistré aux mélanges durcis pendant 7 jours à 55 °C d'ordre 25KN et 30 KN pour les mortiers formulé avec 8 et 10 mol, respectivement.

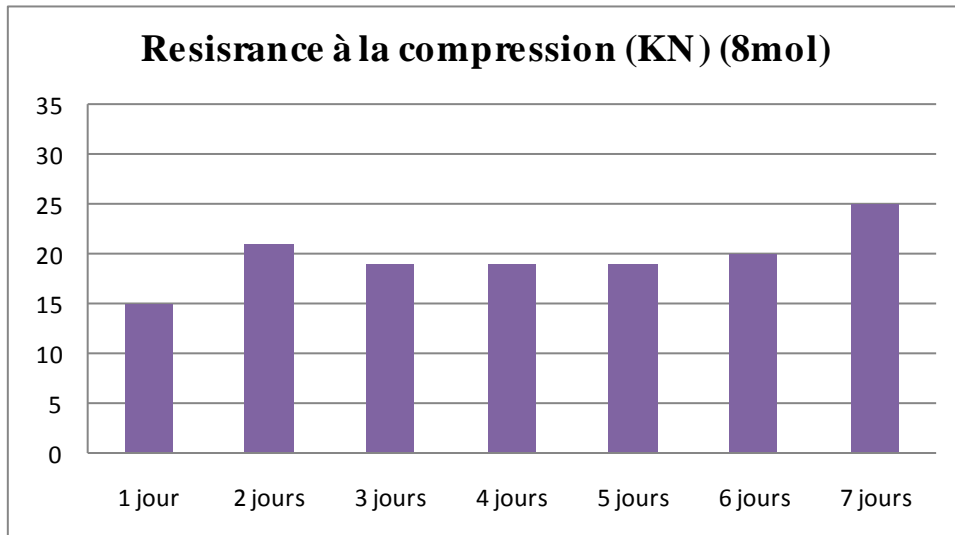
Il convient de noter que la température et la concentration de la solution NaOH ont des effets remarquables sur comportement mécanique.

**Tableau III.3. Résistance de compression à 55°C (8Mol).**

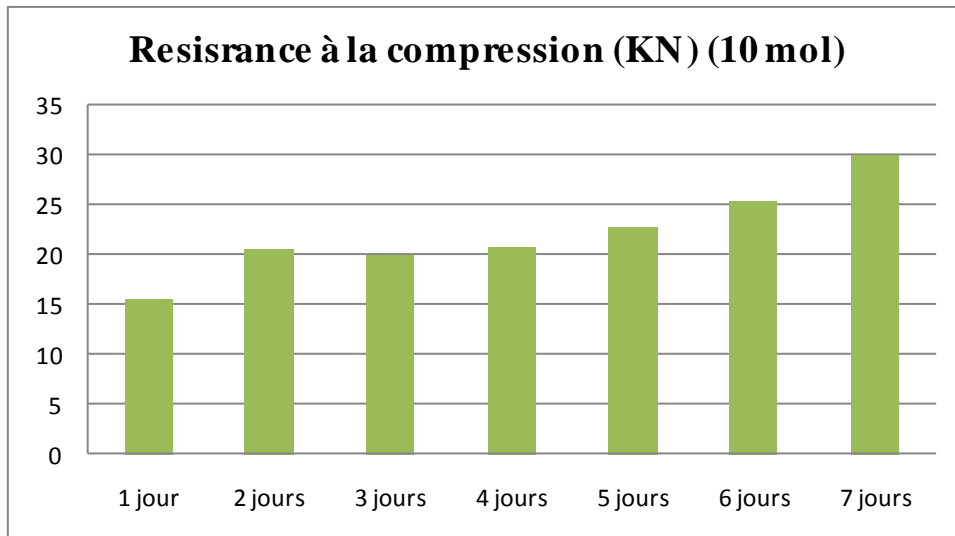
Résistance à la compression KN (8Mol)							
Les échantillons	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours
30 jours	15	21	19	19	19	20	25

**Tableau III.4. Résistance de compression à 55° C(10Mol).**

Résistance à la compression KN (10Mol)							
Les échantillons	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours
30 jours	15.5	20.5	19.9	20.75	22.75	25.37	30



**Figure III.4. Résistance de compression à 55° (8Mol).**



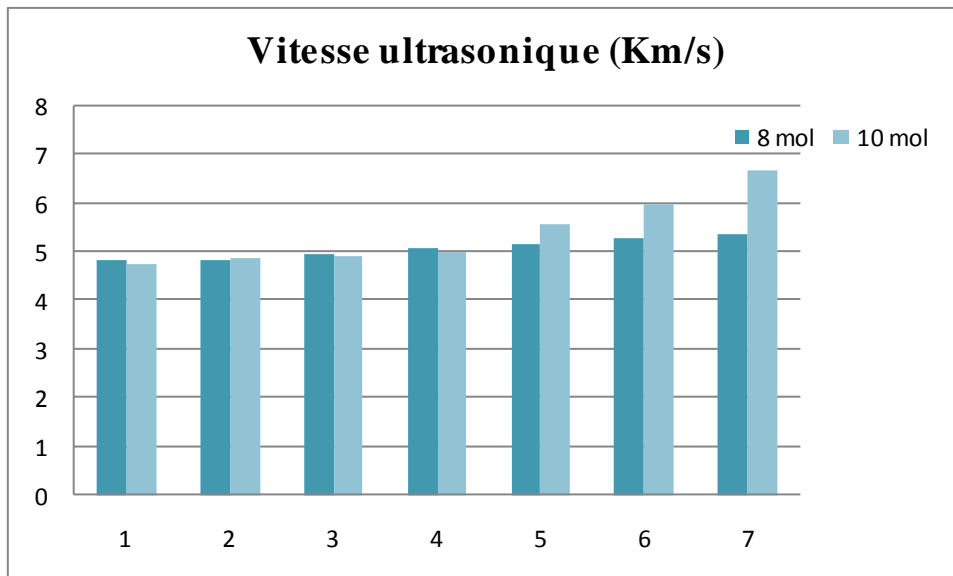
**Figure III.5. Résistance de compression à 55° (10Mol).**

**4. Vitesse ultrasonique :**

Figure III.6 représente les valeurs de la vitesse ultrasonique d'échantillons avec différentes concentrations de 8 et 10 mol de NaOH. Il convient de noter que le comportement de la vitesse ultrasonique commence à se développer progressivement en fonction de la durée de traitement thermique et presque similaire que le comportement mécanique. Les valeurs les plus élevées de vitesse ultrasonique ont été enregistrées avec les échantillons ont subi des traitements thermiques pendant 7 jours à 55 °C d'ordre 5.37 Km/s et 6.68 Km/s pour les mélanges de 8 et 10 mol, respectivement.

On peut distinguer que le traitement thermique à un effet remarquable sur les mortiers géopolymères tandis que l'augmentation de la vitesse de 7 jours par rapport 1 jour de traitement thermique est d'ordre 11.39 % et 40.91 % pour les mélanges avec 8 et 10 mol, respectivement.

Concernant effet de concentration de la solution alkaïnNaOH (hydroxyde de sodium) on peut déduire que plus la concentration est élevée plus la vitesse ultrasonique est améliorée.



**Figure III.6. Vitesse des ultrasonique.**

### 5. Résistance à la traction par flexion:

Les Figures (III.7 et III.8) nous présentent les résultats de différentes résistances à la traction après 1 mois, ce qui nous a permis de faire les constats suivants :

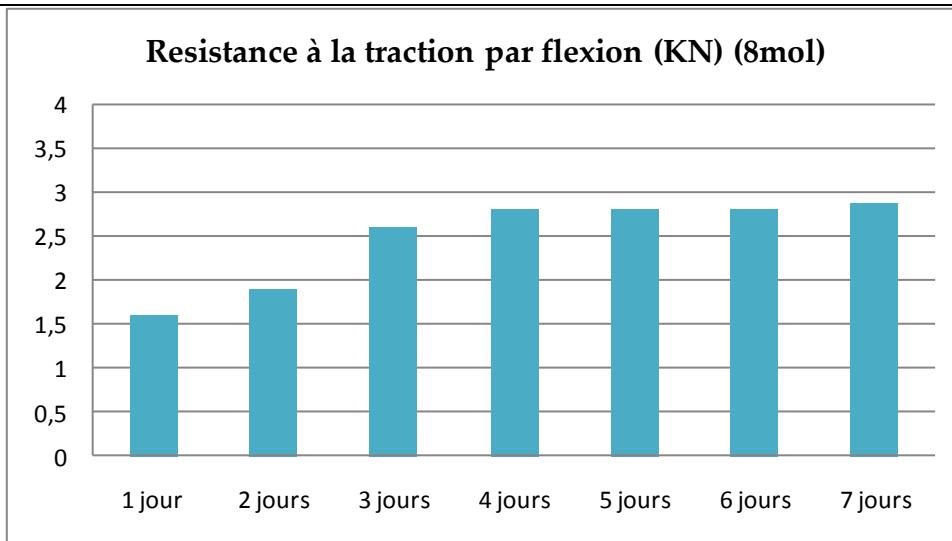
Nous notons également que la résistance à la traction était à la baisse entre l'échantillon qui a été placé pendant 1 jour et 4 jours, puis a commencé à se développer entre l'échantillon qui a été placé à l'étuve pendant 5 jours et 7 jours. Dans la figure III.6 avec un échantillon contenant une concentration de 8 moles (NaOH), nous constatons que la plus grande valeur de résistance à la traction était pour l'échantillon qui a été placé dans l'étuve pendant 7 jours, d'ordre 2.88 KN (voir le tableau III.5) puis suivi par des échantillons pendant 6 et 5 jours. La figure III.7 de 10 moles (NaOH), nous remarquons d'abord que la plus grande valeur de résistance à la traction était pour l'échantillon à l'intérieur de l'étuve pendant 7 jours avec une valeur de 3.2 KN (tableau III.6). Par comparaison, on constate que les valeurs de résistance à la traction avec les mélangées de 10 mol sont bien meilleures que celles de 8 mol. On remarque le traitement thermique à effet remarquable sur la résistance à la traction.

**Tableau III.5. Résistance à la traction par flexion à 55° (8Mol).**

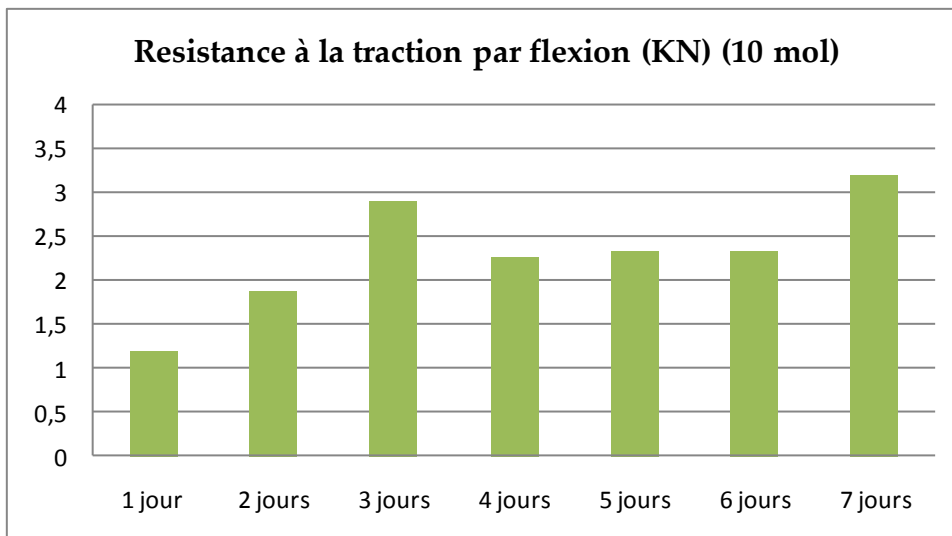
Résistance à la traction par flexion KN (8 Mol)							
Les échantillons	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours
30 jours	1,6	1,9	2,6	2,8	2,8	2,8	2,88

**Tableau III.6. Résistance à la traction par flexion à 55° (10Mol).**

Résistance à la traction par flexion KN (10 Mol)							
Les échantillons	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	6 jours	7 jours
30 jours	1,2	1,88	2,9	2,26	2,32	2,32	3,2



**FigureIII.7. Résistance à la traction par flexion à 55° (8Mol).**



**FigureIII.8. Résistance à la traction par flexion à 55° (10Mol).**

### 6. Porosité accessible à l'eau :

Les Figures III.9, III.10 présentent les résultats de la porosité accessible à l'eau pour différents échantillons subis à différents traitements thermiques de 1 jour jusqu'à 7 jours. On remarque que la plus grande valeur de porosité est d'ordre 24.09%, et 24.02% correspond à l'échantillon qui a été mis à l'étuve pendant 1 jour de 8 et 10 mol, respectivement. Ensuite, la porosité des échantillons exposés 2 jours au traitement thermique commence à diminuer jusqu'à atteindre 18.76% 20.32 % après 7 jours de traitement thermique pour les mélanges formulés avec 10 et 8 mol respectivement.



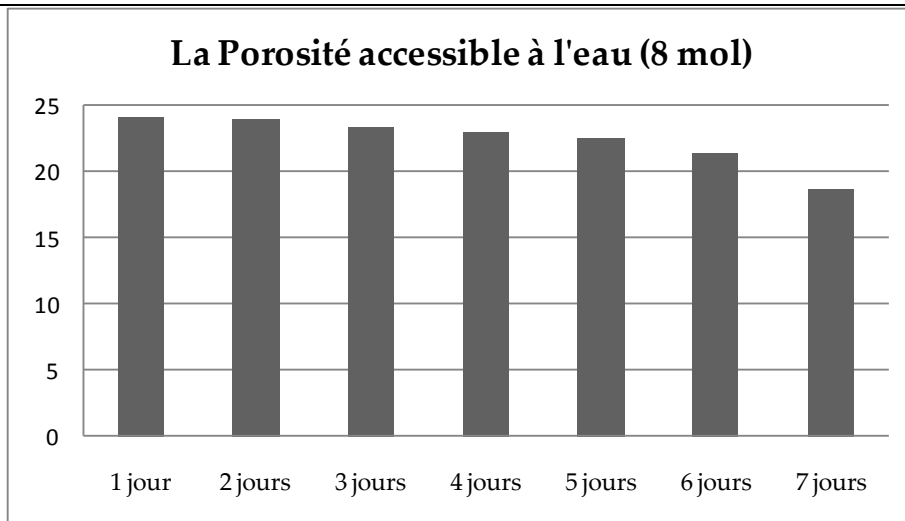
Par comparaison des deux figures III.7 et III.8 nous pouvons remarquer que les rapports de porosité dans les deux graphiques ont presque les mêmes valeurs avec une légère différence.

**Tableau III.7. Porosité accessible à l'eau 8 mol (NaOH).**

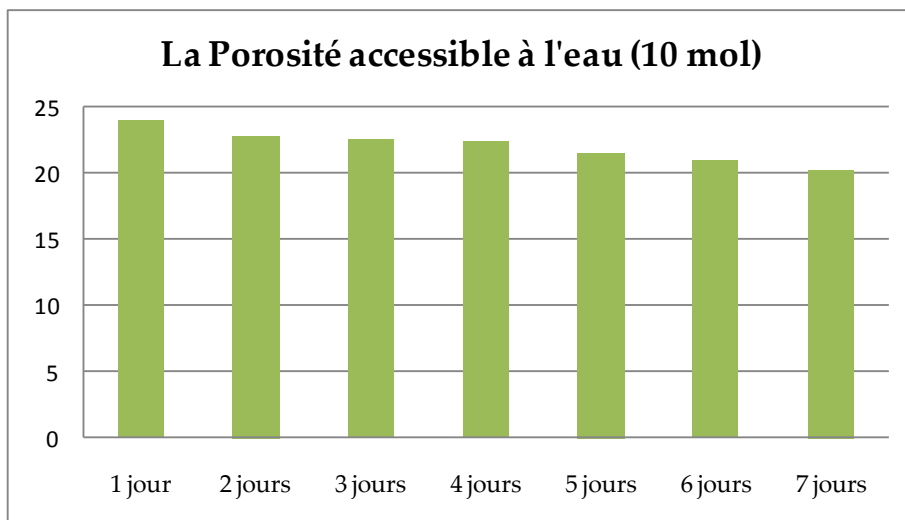
	$M_d$	$M_{SA}$	$M_{SW}$	P%
1j	223.07	250.44	136.51	24.02
2j	225.07	250.63	138.43	22.78
3j	238.07	265.15	144.89	22.52
4j	234.00	260.20	143.47	22.44
5j	249.72	276.53	152.47	21.61
6j	247.59	273.55	150.22	21.05
7j	248.66	273.65	150.68	20.32

**Tableau III.8. Porosité accessible à l'eau 10 mol (NaOH).**

	$M_d$	$M_{SA}$	$M_{SW}$	%P
1j	237.17	266.17	145.81	24.09
2j	242.03	271.64	148.59	24.06
3j	228.81	256.10	139.52	23.40
4j	262.60	293.08	160.91	23.06
5j	237.97	265.15	145.01	22.62
6j	254.05	281.12	154.98	21.46
7j	250.52	272.87	153.72	18.76



**FigureIII.9. Porosité accessible à l'eau 8mol (NaOH).**



**FigureIII.10 : Porosité accessible à l'eau 10mol (NaOH).**

### 7. Absorption capillaire :

Dans le premier FigureIII.11, les échantillons avec une concentration de 8 mol NaOH sont représentés, et le deuxième FigureIII.12 représente les échantillons avec une concentration de 10 mol NaOH.

Nous remarquons dans le tableau un taux d'absorption d'eau proche et similaire dans presque tous les échantillons. En premier lieu, après 5 minutes après le placement des échantillons, nous voyons un taux d'absorption légèrement élevé, puis il commence à se développer jusqu'à devenir presque constant au bout de 60 minutes. Après une heure et demi les mélangés traité

pendant 7 jours à la température présente faible absorption par rapport les mélanges traité pendant 1 jour.

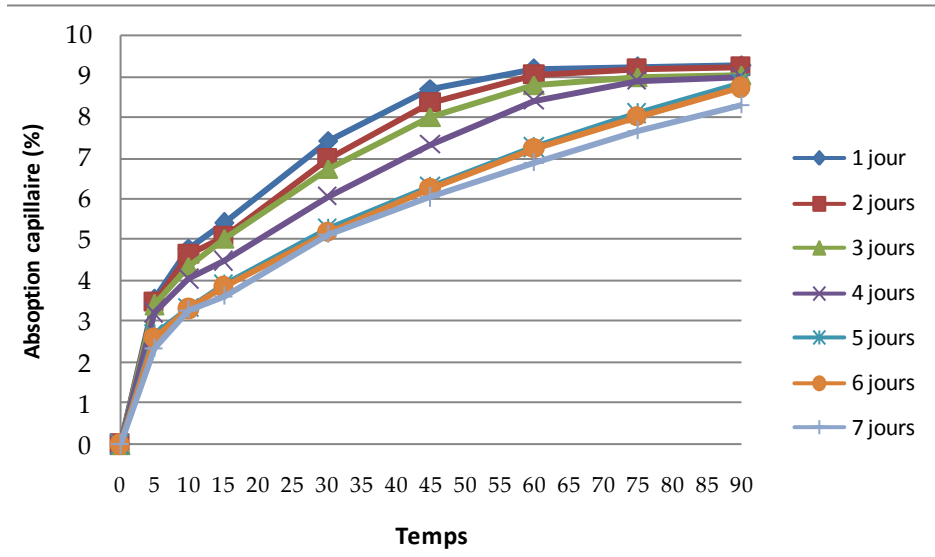


Figure III.11. Absorption capillaire (%) en fonction de temps pour les échantillons de 8 mol.

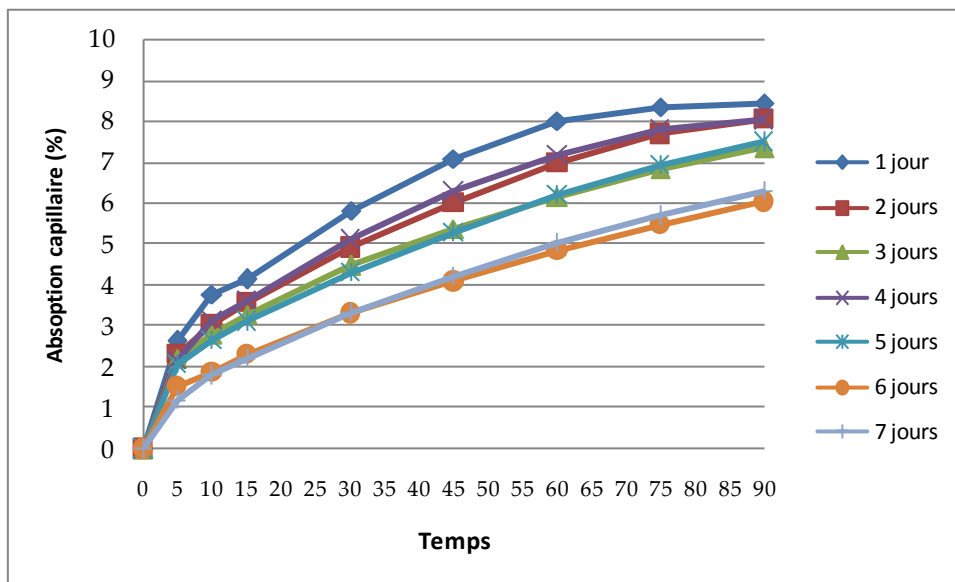


Figure III.12. Absorption capillaire (%) en fonction de temps pour les échantillons de 10 mol.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats du travail expérimental sur le mortier géo polymère avec l'ajout de déchets de briques rouges : Caractéristiques mécaniques en compression et en traction par flexion. La porosité. L'absorption capillaire.

La plus grande valeur de résistance à la compression d'ordre 30 KN.

La plus grande valeur de résistance à la compression concernait l'échantillon de 10 mol d'hydroxyde de sodium.

Plus la concentration d'hydroxyde de sodium n'est élevée, plus les caractéristiques ont été développé (la résistance à la compression)

La plus grande valeur de résistance à la traction 3.2KN

La plus grande valeur de résistance à la traction concernait l'échantillon de 10 mol d'hydroxyde de sodium

Plus la concentration d'hydroxyde de sodium est élevée, plus la résistance à la traction n'est élevée.

La plus grande force de tension concernait le mortier qui a été placé dans l'étuve pendant 7 jours dans les deux échantillons 8 mol et 10mol.

Pour la porosité des mortiers :

Le plus grand pourcentage de porosité est de 24%.

Le plus grand pourcentage de porosité était lié au mortier qui a été placé dans l'étuve pendant 1 jour dans deux échantillons de 8 mol et 10 mol.

La température a un effet remarquable sur géopolymère mortier.

## CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, à partir des résultats obtenus, il ressort que le mortier géopolymère fabriqué à partir de déchets de brique présente des propriétés prometteuses.

Il semble que l'ajout de déchets de briques au mortier géopolymère à la température de durcissement améliore principalement ces propriétés, et donc un durcissement prolongé permet également d'augmenter ces propriétés, nous pouvons également regarder la concentration de NaOH et sa capacité à améliorer les propriétés mécaniques et physiques du mortier ainsi

L'effet combiné de ces deux facteurs améliore les propriétés mécaniques et physiques du mortier. Ceci est confirmé par les résultats obtenus.

L'augmentation de la température de solidification entraîne une augmentation de la résistance à la compression de la suspension de géopolymère, et la température optimale pour le développement de la résistance est d'environ 55 ° C pendant une période de 7 jours, selon ce que montrent les résultats.

Une augmentation de la concentration en NaOH entraîne également une augmentation de la résistance à la compression du coulis de géopolymère et une amélioration de ses propriétés physiques et mécaniques. La meilleure concentration est de 10 mol contre une concentration de 8 mol.

La résistance à la compression et également la résistance à la traction augmentent à mesure que l'âge de l'échantillon augmente avec l'augmentation de la température et de la concentration de NaOH.

La porosité de la suspension a diminué progressivement avec l'augmentation de la durée de la température de durcissement. Par conséquent, plus la durée de la température de durcissement est longue, plus la porosité est faible.

Le recyclage des déchets de briques présente de nombreux avantages. Contribuez à réduire les déchets, à conserver les ressources naturelles, à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir une économie circulaire. De plus, des opportunités économiques peuvent être créées en créant de nouveaux marchés pour les matériaux recyclés et en encourageant l'innovation dans le secteur de la construction.

Il est important d'élaborer des politiques et des règlements qui encouragent le recyclage des déchets de briques et de sensibiliser les intervenants de l'industrie de la construction et le

---

grand public à l'importance de cette pratique. En favorisant le recyclage des déchets de briques, nous pouvons construire un avenir plus durable et plus vert.

Enfin, on peut dire que le mortier géopolymère à partir de déchet de brique à une certaine température. Il fournit des résultats acceptables en termes de propriétés physiques et chimiques avec la possibilité de remplacer et de réduire le ciment.

Sur la base des résultats de ce travail avec quelques améliorations, des résultats impressionnants peuvent être obtenus pour le mortier géopolymère avec des déchets de briques.

#### **Perspectives et recommandations pour des travaux de future :**

Afin d'améliorer et d'approfondir cette étude, nous proposons les idées suivantes :

- Étudier l'effet d'autres activateurs chimiques
- Etude d'isolation thermique du mortier géopolymère à partir de déchet de brique
- Étudier cuisson à haute température de 600°C à 1000°C pendant une certaine période.
- Étudier les effets négatifs des produits chimiques (au contact de l'eau ou de la terre) dans le mortier géopolymère

---

**Référence :**

- [1] Andrew, R.M. (2018) ‘Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production’, *Earth System Science Data*, 10(1), pp. 195–217. doi:10.5194/essd-10-195-2018.
- [2] J. Davidovits, “Geopolymers and geopolymeric materials”, *J. Therm. Anal.*, vol. 35, pp. 429-441, 1989.
- [3] A. O. Purdon, “The action of alkalis on blast furnace slag”, *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 59, pp. 191-202, 1940.
- [4] V.D. Glukhovskiy, G.S. Rostovskaja, G.V. Rumyna, “Soil silicates”, Gosstroyizdat, Kiev, 1959.
- [5] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 2nd ed. Saint-Quentin, France :Institut Geopolymer, 2008.
- [6] C. Dupuy, A. Gharzouni, N. Texier-Mandoki, X. Bourbon, S. Rossignol, “Thermal resistance of argillite-based alkali-activated materials. Part 1: Effect of calcination processes and alkali cation”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 217, pp. 323-333, 2018.
- [7] T.M. Tognonvi, S. Petlitckaia, A. Gharzouni, M. Fricheteau, N. Texier-Mandoki, X. Bourbon, S. Rossignol, “High-temperature, resistant, argillite based alkali-activated materials with improved post-thermal treatment mechanical strength”, *Clay and Clay Mineral*, 2020.
- [8] J.L. Provis, “Geopolymers. Structure, Processing”, *Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [9] P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. Van Deventer, “Geopolymer technology : the current state of the art”, *Journal of Material Science*, vol. 42, pp. 2917-2933, 2007.
- [10] A. Gharzouni, L. Vidal, N. Essaidi, E. Joussein, S. Rossignol, “Recycling of geopolymer waste: Influence on geopolymer formation and mechanical properties”, *Materials and Design*, vol. 94, pp. 221-229, 2016.
- [11] G. Habert, J.B. d’Espinoise de Lacaillerie, N. Roussel, “An environmental evaluation of geopolymer based concrete production : reviewing current research trends”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 1229-1238, 2011.

- 
- [12]J. Davidovits, (2013), Geopolymer Cement a review, published in Geopolymer Science and Technics, Technical Paper #21, Geopolymer Institute Library, [www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org).
- [13]Davidovits, J. (2008). Geopolymer Chemistry and Applications (4th ed.). Geopolymer Institute.
- [14][https://st3.depositphotos.com/1031551/14651/i/450/depositphotos\\_146510605-stock-photo-rubble-on-building-site.jpg](https://st3.depositphotos.com/1031551/14651/i/450/depositphotos_146510605-stock-photo-rubble-on-building-site.jpg)
- [15]Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications" de J. L. Provis et J. S. J. van Deventer (éditeurs)
- [16]Delate J. and Facy G., Des bétons antiques aux géopolymères adopté de la revue arts et métiers. Geopolymer Institute 180 (1995) 8-16.
- [17]J.Delatte, G.Facy, Des Bétons Uniques Aux Géopolymères. Arts Et Métiers magazine, 180, 8-16, 1993.
- [18] J. Davidovits, « Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials ». Journal of Thermal Analysis, 37, 1633-1656, 1991.
- [19]L.TchadjieNoumbissie, « Comportement Thermiques Des Géopolymères Obtenus A partirD'une Argile Kaolinite ». Mémoire De Master En Chimie De L'université De Yaoundé I, 2012.
- [20]H.Xu, J.S.J.Van Deventer, Microstructural Characterization of Geopolymers synthesized FromKaolinite/Stilbite Mixtures Using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX, And HREM. Ceme-Concr-Res., 32, 1705-1716, 2002.
- [21] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Zonglin, « Composition Design and Microstructural CharacterizationofCalcined Kaolin-Based GeopolymerCement». Appl-CI-Sci, 47,271 275, 2010.
- [22]Davidovits, J. (2015) :Geopolymer Chemistry & Applications, 4th edition. Institut Géopolymère.
- [23]Davidovits, J. (2020) :Geopolymer Chemistry & Applications, 5th edition. InstitutGéopolymère.
- [24] P. Rovnanik, « Effect of Curing Temperature on The Development of Hard structure ofMetakaolin-Based Geopolymer». Constr. Build. Mater., 24, 1176-1183, 2010.



- [25] F. To, H. a L. Id, Mécanisme de prise et rhéologie de liants géopolymères modélés, (2013).
- [26] C. Shi, A. Fernández-Jiménez, Á. Palomo, A. Fernández Jiménez, A. Palomo, New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 750–763. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.016.
- [27] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, *J. Mater. Sci.* 42 (2006) 2917–2933. doi:10.1007/s10853-006-0637-z.
- [28] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, S. Jalali, Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1305–1314. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015.
- [29] A. Katz, Microscopic Study of Alkali-Activated Fly Ash, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 197–208. doi:10.1016/S0008-8846(97)00271-8.
- [30] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1984–1992. doi:10.1016/j.cemconres.2005.03.003.
- [31] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements☆, *Fuel.* 82 (2003) 2259–2265. doi:10.1016/S0016-2361(03)00194-7.
- [32] Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. In Proceedings of the first international conference on alkaline cements and concretes (pp. 131-149). Kiev, Ukraine: Kiev University.
- [33] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2014). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Elsevier.
- [34] Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research report GC 1. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia.
- [35] Xu, H., & van Deventer, J. S. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.

- [36] Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Sobrados, I. (2006). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1760-1769.
- [37] J. Davidovits, "Geopolymer Cement," *A Rev. Geopolymer Institute, Tech. Pap.*, Vol. 21, Pp. 1–11, 2013.
- [38] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute, 2008.
- [39] A. Gharzouniet Al., "Monitoring the Structural Evolution During Geopolymer Formation By  $^{27}\text{Al}$  NMR," *Dev. Strateg. Ceram.Mater.Ceram.Eng. Sci. Proceedings*, Vol. 36, No. 8, P. 37, 2015.
- [62] A. Gharzouniet Al., "Monitoring the Structural Evolution During Geopolymer Formation By  $^{27}\text{Al}$  NMR," *Dev. Strateg. Ceram.Mater.Ceram.Eng. Sci. Proceedings*, Vol. 36, No. 8, P. 37, 2015.
- [40] L. Weng, K. Sagoe-Crentsil, Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I-Low Si/Al ratio systems, *Journal of Materials Science*. 42 (2007) 2997–3006. doi:10.1007/s10853-006-0820-2.
- [41] Bouchikhi Abdelhadi, « Optimisation de la Valorisation des Déchets de Verre et de Sédiments dans des Liants Recomposés : Activation-Formulation de Mortier - Stabilisation Physico-Chimique », thèse doctorat, université de Lille , 4 Juin 2020.
- [42] Mehsas Boumediene, « Étude Des propriétés des matériaux géopolymères étuvés », thèse doctorat, université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2021/2022.
- [43] Eroshkina, N. Korovkin, M. (2016): The Effect of the Mixture Composition and Curing Conditions on the Properties of the Geopolymer Binder Based on Dust Crushing of the Granite. *Procedia Engineering, International Conference on Industrial Engineering*. 150, 1605–1609
- [44] El Alouani, M., Saufi, H., Moutaoukil, G., Alehyen, S., Nematollahi, B., Belmaghraoui, W., & Taibi, M. h. (2021). Application of geopolymers for treatment of water contaminated with organic and inorganic pollutants: State-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105095.
- [45] Maza Imene et Deghachekheireddine. « Etude des propriétés physiques et mécaniques des géopolymères contenant différentes fibres », mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj ,2021/2022.

- [46] Boumediene, M. (2022). ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX GÉOPOLYMÉRES ÉTUVÉS].
- [47] X. Yao, Z. Zhang, H. Zhua, Y. 2009 Chena, Geopolymerization Process of Alkali–Metakaolinite Characterized By Isothermal Calorimetry. *Thermo chimica Acta*, Vol. 493, No 1-2, P. 49-54, 2009.
- [48] H. Wang, H. Li, And F. Yan, “Synthesis And Mechanical Properties of metakaolinite-Based Geopolymer,” *Colloids Surfaces A physicochem. Eng. Asp.*, Vol. 268, No. 1–3, Pp. 1–6, 2005.
- [49] M. Rowles And B. O’Connor, “Chemical Optimisation of The Compressive strength of Aluminosilicate Geopolymers Synthesised By Sodium Silicate Activation of metakaolinite,” *J. Mater. Chem.*, Vol. 13, No. 5, Pp. 1161–1165, 2003.
- [50] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, And C. Yue, “Role of Water In The Synthesis of calcined Kaolin- Based Geopolymer,” *Appl. Clay Sci.*, Vol. 43, No. 2, Pp. 218–223, 2009.
- [51] J. He, Y. Jie, J. Zhang, Y. Yu, And G. Zhang, “Synthesis and Characterization of red Mud And Rice Husk Ash-Based Geopolymer Composites,” *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 37, No. 1, Pp. 108–118, 2013.
- [52] S. Alonso And A. Palomo, “Alkaline Activation of Metakaolin And Calcium hydroxide Mixtures: Influence of Temperature, Activator Concentration and Solids ratio,” *Mater. Lett.*, Vol. 47, No. 1–2, Pp. 55–62, 2001.
- [53] V. F. F. Barbosa, K. J. D. Mackenzie, And C. Thaumaturgo, “Synthesis And characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina And Silica: Sodium Polysialate Polymers,” *Int. J. Inorg. Mater.*, Vol. 2, No. 4, Pp. 309–317, 2000.
- [54] K. Komnitsas And D. Zaharaki, “Geopolymerisation: A Review and Prospects For the Minerals Industry,” *Miner. Eng.*, Vol. 20, No. 14, Pp. 1261–1277, 2007.
- [55] J. Davidovits, “Mineral Polymers And Methods of Making Them,” In *United states.*, 1982.
- [56] D. Khale And R. Chaudhary, « Mechanism of Geopolymerization And Factors influencing Its Development: A Review [J] ». *Journal of Materials Science*, Vol. 42, P. 729-746, 2007.
- [57] A. M. Rashad, “Alkali-Activated Metakaolin: A Short Guide For Civil Engineer-An overview,” *Constr. Build. Mater.*, Vol. 41, Pp. 751–765, 2013.

- 
- [58] H. Rahier, J. Wastiels, M. Biesemans, R. Willlem, G. Van Assche, And B. Vanmele, “Reaction Mechanism, Kinetics and High Temperature Transformations of geopolymers,” J. Mater. Sci., Vol. 42, No. 9, Pp. 2982–2996, 2007.
- [59] Stambouli Mohamed.S. « valorisation de débris de verre les infrastructures routières : application au verre industriel, verre ménafé et verre mixt », mémoire de master, université Mouloud Mammeri-Tizi-ouzou, 2015/2016
- [60] P. Rovnanik, « Effect of Curing Temperature on The Development of Hard structure of Metakaolin-Based Geopolymer ». Constr. Build. Mater., 24, 1176-1183, 2010.
- [61] M. M. Tashima, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Monzó, And J. Payá, “Effect of curing Time On microstructure And Mechanical Strength Development of Alkali activated Binders Based On Vitreous Calcium Aluminosilicate (VCAS),” Bull. Mater.Sci., Vol. 36, No. 2, Pp. 245–249, 2013.
- [62] E. N. Kani And A. Allahverdi, “Effects of Curing Time And Temperature On strength Development of Inorganic Polymeric Binder Based On Natural Pozzolan,” J. Mater. Sci., Vol. 44, No. 12, Pp. 3088–3097, 2009.
- [63] A. M. Rashad, “Metakaolin As Cementitious Material: History, Scours, Production and Composition-A Comprehensive Overview,” Constr. Build. Mater., Vol. 41, Pp.303–318, 2013.
- [64] R. Delebecque, « Éléments de Construction "Bâtiment" ». Edition Delagrave 1990.
- [65] D. Hardjito And B. V. Rangan, “Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete,” 2005.
- [66] Bourema Moufida, « Etude des caractéristiques d’un BHP à base de déchet de brique rouge à l’état frais et durci », Mémoire de master en génie civil, Université de 20 Aout 1955-Skikda, 11 Juin 2015.
- [67] Mihoubi Yousra et Mahamdi Maroua, « Caractérisation d'un mortier activé mécaniquement à base de déchets de briques », mémoire de master, université Mohamed Boudiaf - M’sila, 2021 / 2022

- [68] Bouali. K « élaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajoute de déchets de briques réfractaire », mémoire de magistère, université Mohamed Bougara-Boumerdes, 2013/2014
- [69] Marc Mélon , « A25 ans ;Mathier Guiton se lance dans la fabrication de la brique Mesbay ,publier le mercredi 7 juin 2017 a 15h 55.
- [70] DECHACHE, Kilani. « Efficacité du remplacement partiel du ciment par la poudre de brique rouge dans le mortier : Effets de la température de cure », mémoire de master, Université de Ghardaïa, 2021/2022.
- [71] Zerrouki Ishak. « Effets de déchet de brique rouge sur la stabilisation des briques de terre crue ». mémoire de master, université Mohamed khider-Biskra, 2019.
- [72] Christian Du Brulle, «La brique crue, « Nouveau » Materiau De Construction »,11 septembre 2014.
- [73]GuillameServoise, de « Déchets, réemploi, recyclage : la déconstruction, nouvelle responsabilité de l'architecte ? », Nov 26, 2017
- [74]Chester K. Wentworth, « A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments », The Journal of Geology, vol. 30, n° 5,juillet 1922, p. 377–392.
- [75]<https://mapio.net/pic/p-3063397/>.
- [76]Yunsheng Z., Sun W., Li Z., Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. Applied Clay Science 47 (2010) 271–275.
- [77]Tognonvi, M., D. Massiot, A. Lecomte, S. Rossignol, et J-P. Bonnet. 2010. « Identification of solvated species present in concentrated and dilute sodium silicate solutions by combined <sup>29</sup>Si NMR and SAXS studies ». Journal of Colloid and Interface Science 352 (2) :309-315. doi:10.1016/j.jcis.2010.09.018.
- [78] Hamel Deddine et Ben hammadiilyes. « Étude physico-mécanique d'un mortier à base de sable de dune et déchets industrielles (déchet de brique et déchet de plastique PET) » mémoire de master, université de Ghardaïa, 2020/2021.

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD  
**ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE**

Su jeture : Unité Ghardaïa  
 N° Dossier interne : *Ben Samia*  
 Équipements utilisés : Balance- Eauve-Four.

Lieu de travail : Service chimie  
 Date :

Échantillon :  
 Opérateur :  
 N° D'inventaire : L 21.05-15-L49.08.09 -L53.02.86

MÉTHODE	Description	Test 1		Test 2		Test 1		Test 2		Test 1		Test 2													
		V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4												
FUSIBLES NFP 15-61	Creuset+précipité	26,852																							
	Creuset vide	26,137																							
	Poids du résidu	0,815																							
	% Insolubles	81,5																							
MILFAIEC BS 1377	Creuset+précipité	16,137																							
	Creuset vide	16,097																							
	Poids du résidu	0,040																							
	% SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1,37																							
CARBOINATES NFP 15-461	V NaOH	07																							
	% CaCO <sub>3</sub>																								
CHLORURES Méthode de Mohr	PH <sub>i</sub> (initial)																								
	PH <sub>f</sub> (titrage)																								
	V AgNO <sub>3</sub>	Test 1		Test 2		Test 1		Test 2		Test 1		Test 2													
	V <sub>m</sub> (moyen)																								
Matière ORGANIQUE NFP 94- 355	% Cl <sup>-</sup>																								
	% NaCl																								
AUTRES ESSAIS	% Matière organique	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =		V <sub>m</sub> =			

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD  
ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE

Structure : Unité Ghardaïa  
N° Dossier interne : **BEN SANIA**  
Équipements utilisés : Balance- Etuve-Four.

Lieu de travail : Service chimie  
Date : **08/05/2023**

Échantillon :  
Opérateur : **BOUCHRIA-M**  
N° D'inventaire : L.21.05.15 – L03.15.S.002 –L53.02.86

ÉCHANTILLON	SABLE	V <sub>m</sub> =																	
		Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2										
INSOLUBLES NFP 15-461	Creuset+précipité	31.222																	
	Creuset vide	30.297																	
	Poids du résidu	0.925																	
	% Insolubles	92.5																	
SULFATES BS 1377	Creuset+précipité																		
	Creuset vide	19.737																	
	Poids du résidu																		
CARBONATES NFP 15-461	% SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>																		
	V NaOH																		
	% CaCO <sub>3</sub>	05																	
	PH <sub>i</sub> (initial)	8.23																	
CHLORURES Méthode de Mohr	PH <sub>i</sub> (tirage)	6.80																	
	V <sub>AgNO<sub>3</sub></sub>																		
	V <sub>m</sub> (moyen)	0.4	0.2																
	%Cl <sup>-</sup>	0.003																	
MATERIE ORGANIQUE NFP 94-055	% NaCl	0.006																	
	V <sub>m</sub> =																		
	V <sub>m</sub> =																		
	V <sub>m</sub> =																		
AUTRES ESSAIS	% Matière organique																		
	V <sub>m</sub> =																		
	V <sub>m</sub> =																		
	V <sub>m</sub> =																		

L'Opérateur



Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD  
ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE

Structure : Unité Ghardaïa  
N° Dossier interne : **BEN SANIA**  
Équipements utilisés : Balance- Etuve-Four.

Lieu de travail : Service chimie  
Date : **08/05/2023**

Échantillon :  
Opérateur : **BOUCHRIA-M**  
N° D'inventaire : L.21.05.15 – L03.15.S.002 –L53.02.86

ÉCHANTILLON	SABLE	V <sub>m</sub> =																	
		Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2										
INSOLUBLES NFP 15-461	Creuset+précipité	31.222																	
	Creuset vide	30.297																	
	Poids du résidu	0.925																	
	% Insolubles	92.5																	
SULFATES BS 1377	Creuset+précipité																		
	Creuset vide	19.737																	
	Poids du résidu																		
CARBONATES NFP 15-461	% SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>																		
	V NaOH																		
	% CaCO <sub>3</sub>	05																	
	PH <sub>i</sub> (initial)	8.23																	
CHLORURES Méthode de Mohr	PH <sub>i</sub> (tirage)	6.80																	
	V <sub>AgNO<sub>3</sub></sub>																		
	V <sub>m</sub> (moyen)	0.4	0.2																
	%Cl <sup>-</sup>	0.003																	
MATERIE ORGANIQUE NFP 94-055	% NaCl	0.006																	
	V <sub>m</sub> =																		
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	
	% Matière organique																		
AUTRES ESSAIS																			

L'Opérateur



Visa du responsable



## LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI AU BLEU DE METHYLENE  
NF P 94-068 Novembre 1993

Structure : **U/G**Lieu de travail : **S<sup>CE</sup> ID**N° Dossier interne : **PROJET FIN D'ETUDE**Date : **04.01.2023**Echantillon : **PRIQUE**

Opérateur : /

Équipements utilisés : **BALANCE / ETUVE**N° D'inventaire : **L21.09.15 / L49.01.91**

GRANULOMETRIE (PASSANTS A)				LIMITES D'ATTERBERG		ES	VB	VB <sub>t</sub>
05 mm	2 mm	0.4 mm	0.08 mm	WL	IP			
PRISE D'ESSAI $M_i = 60\text{grs}$				VOLUME DE BLEU INJECTE DANS LA PRISE				
CALCUL DE LA TENEUR EN EAU				D'ESSAI $V = 05 \text{ cm}^3$				
TARE N°	<b>A</b>		<b>E</b>	VALEUR AU BLEU DE LA PRISE D'ESSAI				
PT	<b>183,58</b>		<b>193,15</b>	PASSANT A :				
Ph + T	<b>183,57</b>		<b>193,14</b>	$VB = \frac{V}{M_s} = \frac{05}{59.99} = 0.08$				
Ps + T	<b>125,01</b>		<b>126,74</b>					
Ps	<b>0,01</b>		<b>0,01</b>					
W (%)	<b>0,02</b>		<b>0,02</b>					
W <sub>moy</sub> (%)	<b>0.02</b>							
CALCUL DE LA MASSE SECHE DE LA				$VB_t = \frac{VB \times \% T}{100}$				
PRISE D'ESSAI M <sub>s</sub> :								
$W \% = \frac{Ph - Ps}{100} = 0.02$								
$Ps = \frac{Ph \times 100}{100 + W\%} = 59.99$								

L'Opérateur

Visa du responsable

F-5-5ah.03

## LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

 ANALYSE  
 SEDIMENTOMETRIQUE  
 NFP 94 - 057 Mai 1992

Structure : U/G Lieu de travail : S<sup>CE</sup> ID  
 N° Dossier interne : PROJET FIN D'ETUDE Date : 27.12.2022  
 Échantillon : BRIQUE ROUGE Opérateur : /  
 Equipements utilisés : BALANCE/ETUVE 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
20.2C°	8h25	30 "	16	+0.038	16.038	0.075	100
20.2C°	8h26	01'	15.5	+0.038	15.538	0.055	97
20.2C°	8h27	02'	15	+0.038	15.038	0.038	94
20.2C°	8h30	05'	14	+0.038	14.038	0.025	88
20.2C°	8h35	10'	12.5	+0.038	12.538	0.017	78
20.2C°	8h45	20'	11	+0.038	11.038	0.012	69
20.4C°	9h05	40'	09	+0.108	9.108	0.008	57
20.4C°	9h45	80'	07	+0.108	7.108	0.006	44
20.8C°	11h05	160'	05	+0.152	5.152	0.004	32
21.2C°	13h45	320'	03	+0.226	3.226	0.003	20
20C°	24 h	1440'	01	+0.000	1.000	0.002	06
20 C°	48h	-	0.5	+0.000	0.500	0.001	03
-	72 h	-	-	-	-	0.0005	-

## Remarque :

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

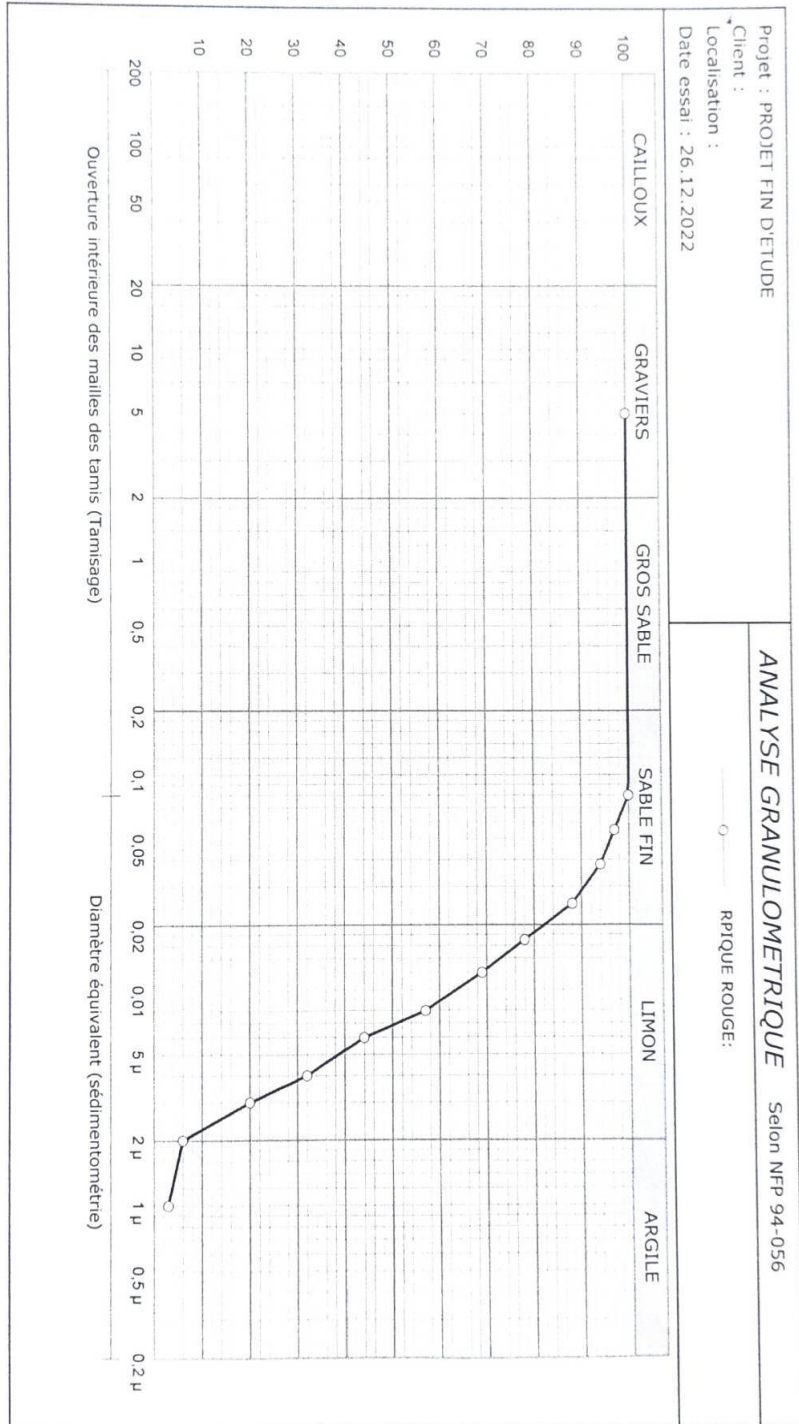
$$R1 = R' + C \quad \text{Si } T^\circ > \text{à } 20^\circ \text{ C}$$

$$R1 = R' - C \quad \text{Si } T^\circ < \text{à } 20^\circ \text{ C}$$

L'Opérateur

Visa du responsable

F-5-5b.04



Programme Solista 2007 ©

0-5-3 a.03

- D. F. M. L. P. -  
CORRECTION DE LA TEMPERATURE POUR L'ANALYSE SEDIMENTOMETRIQUE

Lecture Temperature	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000	2.200	2.400	2.600	2.800	3.000
10	1.260	1.251	1.242	1.233	1.224	1.215	1.206	1.197	1.188	1.179	1.170	1.161	1.152	1.143	1.134	1.125	1.116	1.107
12	1.090	1.081	1.072	1.063	1.136	1.130	1.036	1.027	1.018	1.009	1.000	0.991	0.982	0.973	0.964	0.955	0.946	0.937
14	0.880	0.870	0.800	0.850	0.952	0.940	0.820	0.810	0.800	0.790	0.780	0.770	0.760	0.750	0.740	0.730	0.720	0.710
16	0.640	0.626	0.612	0.598	0.724	0.710	0.556	0.542	0.528	0.514	0.500	0.486	0.472	0.458	0.444	0.430	0.416	0.402
17	0.500	0.485	0.470	0.455	0.570	0.555	0.410	0.395	0.380	0.365	0.350	0.335	0.320	0.305	0.290	0.275	0.260	0.245
18	0.350	0.333	0.316	0.299	0.440	0.425	0.248	0.231	0.214	0.197	0.120	0.163	0.146	0.129	0.112	0.095	0.078	0.061
20	0.000	0.019	0.038	0.057	0.108	0.090	0.114	0.133	0.152	0.171	0.190	0.209	0.228	0.247	0.266	0.285	0.304	0.323
22	0.390	0.400	0.420	0.440	0.266	0.285	0.500	0.520	0.540	0.560	0.580	0.600	0.620	0.640	0.660	0.680	0.700	0.720
24	0.780	0.813	0.836	0.859	0.664	0.685	0.928	0.451	0.974	0.997	1.020	1.043	1.066	1.089	1.112	1.135	1.158	1.181
26	1.200	1.285	1.310	1.335	1.116	1.140	1.410	1.435	1.460	1.485	1.510	1.535	1.560	1.585	1.610	1.635	1.660	1.685
28	1.770	1.797	1.824	1.851	1.614	1.640	1.932	1.959	1.986	2.013	2.040	2.067	2.094	2.121	2.148	2.175	2.202	2.229
30	2.320	2.349	2.378	2.447	2.152	2.180	2.494	2.523	2.552	2.581	2.610	2.639	2.668	2.697	2.726	2.755	2.784	2.813
32	2.710	2.941	2.972	3.003	3.034	2.760	3.096	3.187	3.158	3.189	3.220	3.251	2.970	3.313	3.344	3.395	3.400	3.405

Note

t > 20 °C : signe +

t ≤ 20 °C : signe -

1/14/85

Com. 1/14/85