

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N. d' enregistrement
/...../...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري والهندسة المدنية

Département Hydraulique et Génie Civil

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

**Élaboration des mortiers géopolymères à partir
de diverses combinaisons de mélanges**

Soutenue publiquement le 00/06/2024.

Par

**BAHAZ Hadj Bahaz
BOUREGAA Nour Salam**

Devant le jury composé de :

Mr LAROU I A

Mr SAITI I

Mr AZIEZ M N

Université de Ghardaïa

Université de Ghardaïa

MCA

Université de Ghardaïa

Président

Examineur

Encadrant

Année universitaire 2023/2024

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude envers le Tout-Puissant pour la persévérance et la force qu'Il nous a octroyées, nous permettant ainsi de triompher des obstacles et de mener à bien cette œuvre. En premier lieu, notre reconnaissance va à notre mentor, Mr AZIEZ M, N, dont l'expertise, la direction et le soutien infaillible ont été des piliers tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Puisse le Créateur le protéger et lui offrir une existence prospère et durable.

Nos remerciements s'étendent aussi à chaque membre du personnel du laboratoire de travaux publics (LTPS SUD) pour leur précieuse aide et leurs judicieux conseils. Pour conclure, notre gratitude est adressée aux membres du comité d'évaluation qui ont généreusement consenti à examiner notre humble contribution.

DEDECACE

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma gratitude au Tout-Puissant qui m'a donné la force et la détermination nécessaires pour mener à bien cet humble travail.

Je dédie cet humble travail à : A mamère adorée et à mon cher père, à toutes mes sœurs, à mon professeur Mr AZIEZ M,N,

à tous mes collègues et sans oublier les ouvriers du Laboratoire des Travaux Publics dont la contribution a été essentielle à ce projet, merci.

BAHAZ HADJBAHAZ

Tout d'abord, je veux remercier Dieu Pour m'avoir donné la force et le courage de diriger Pour cet humble travail

Je voudrais consacrer cet humble travail à :

À mamère bien-aimée et à mon cher père A toutes mes sœurs et

Au professeur superviseur : Mr AZIEZ M, N,

Et à tous mes amis N'oublions pas les laborantins qui ont un rôle à jouer dans ce travail, merci

***BOUREGAA NOUR
SALAM***

Résumé

La production de béton exige de importantes quantités de matières premières et d'énergie, ce qui conduit à l'émission de grandes quantités de gaz, notamment du dioxyde de carbone (CO₂), nous incitant à rechercher des alternatives au béton traditionnel.

Par ailleurs, les industries génèrent d'énormes quantités de déchets, posant des défis en matière d'élimination et ouvrant la voie à leur utilisation dans la production de béton géopolymère.

Des liants alternatifs sont employés pour la fabrication du béton géopolymère, qui peut être considéré comme un substitut adéquat au béton traditionnel.

Les briques usées constituent un déchet significatif pouvant être intégré dans la production de béton géopolymère. Cette étude expérimentale vise à valoriser les briques usées. Dans cette étude, des mortiers géopolymères ont été élaborés à partir de déchets de briques, de déchets de verre, de poudre de pierre pouzzolanique et activés avec du silicate de sodium et de l'hydroxyde de sodium à 12 mol.

Les caractéristiques du mélange géopolymère ont été examinées, incluant les propriétés physiques et mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction, performance en flexion). Après démoulage, les échantillons ont été soumis à une période de cure de 30 jours à 55 °C.

Les résultats obtenus avec les mélanges contenant des déchets de briques ont montré une résistance à la compression élevée, contrairement aux mélanges avec des déchets de verre, qui ont révélé une résistance à la compression plus faible.

Mots clé : géopolymère, activation, déchet de brique, pierre pouzzolane, poudre de verre.

Abstract

The production of concrete requires significant quantities of raw materials and energy, which leads to the emission of large quantities of gases, notably carbon dioxide (CO₂), prompting us to look for alternatives to traditional concrete. Furthermore, industries generate huge quantities of waste, posing disposal challenges and paving the way for their use in the production of geopolymer concrete.

Alternative binders are used for the manufacture of geopolymer concrete, which can be considered as a suitable substitute for traditional concrete.

Used bricks constitute a significant waste that can be integrated into the production of geopolymer concrete. This experimental study aims to recover used bricks.

In this study, geopolymer mortars were prepared from brick waste, glass waste, pozzolanic stone powder and activated with sodium silicate and 12 mol sodium hydroxide. The characteristics of the geopolymer blend were examined, including physical and mechanical properties (compressive strength, tensile strength, flexural performance). After demolding, the samples were subjected to a curing period of 30 days at 55°C.

The results obtained with the mixtures containing brick waste showed high compressive strength, in contrast to the mixtures with glass waste, which revealed lower compressive strength.

Keywords :geopolymer, activation, brick waste, pozzolan stone, glass powder.

ملخص

يتطلب إنتاج الخرسانة كميات كبيرة من المواد الخام والطاقة، مما يؤدي إلى انبعاث كميات كبيرة من الغازات وأبرزها ثاني أكسيد الكربون (CO₂) ، مما يدفعنا إلى البحث عن بدائل للخرسانة التقليدية. علاوة على ذلك، تولد الصناعات كميات هائلة من النفايات، مما يشكل تحديات في التخلص منها ويمهد الطريق لاستخدامها في إنتاج الخرسانة الجيوبوليمرية.

يتم استخدام مواد رابطة بديلة لتصنيع خرسانة الجيوبوليمر، والتي يمكن اعتبارها بديلا مناسباً للخرسانة التقليدية. يشكل الطوب المستخدم نفايات كبيرة يمكن دمجها في إنتاج الخرسانة الجيوبوليمرية.

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى استعادة الطوب المستعمل. في هذه الدراسة تم تحضير مونة الجيوبوليمر من مخلفات الطوب ومخلفات الزجاج ومسحوق الحجر البوزولاني وتم تنشيطها باستخدام سيليكات الصوديوم و12 مول من هيدروكسيد الصوديوم. تم فحص خصائص مزيج الجيوبوليمر بما في ذلك الخواص الفيزيائية والميكانيكية (قوة الضغط، قوة الشد، أداء الانثناء). بعد القالب، تم إخضاع العينات لفترة معالجة مدتها 30 يومًا عند درجة حرارة 55 درجة مئوية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها مع المخاليط المحتوية على مخلفات الطوب قوة ضغط عالية، على عكس المخاليط مع مخلفات الزجاج التي أظهرت قوة ضغط أقل.

الكلمات المفتاحية : الجيوبوليمر ، التنشيط ، نفايات الطوب ، الحجر البركاني، مسحوق الزجاج

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
RESUME	III
Abstract	IV
ملخص	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES FIGURES	IX

Contenu

INTRODUCTION GENERALE	1
Figure 1. Les émissions de CO2.	1
Contexte	4
CHAPITRE I GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES CIMENT	
I.1. Introduction :	5
I.2. Historique géopolymère :	6
I.3. Définition des géopolymères :	6
I.4. Matériaux constitutifs des géopolymères :	7
I.4.1. Matériaux primaires :	8
I.4.1.1. Cendres volantes :	8
I.4.1.2. Laitier de haut fourneau :	8
I.4.1.3. Métakaolin :	9
I.5. Activateurs chimiques :	10
I.6. Concentration ou molarité de la solution alcaline :	11
I.7. Mode de cure ou régime de durcissement des matériaux géopolymères :	12
I.8. Différents types de géopolymère :	12
I.8.1. Géopolymère à base de laitier :	12
I.8.2. Géopolymère à base des roches volcaniques :	13
I.8.3. Ciment géopolymère à base de cendres volantes :	13
I.9. Facteurs affectant les caractéristiques des géopolymères :	14
I.10. Les ciments géopolymères :	15
I.11. Impact environnemental des géopolymères par rapport	16
I.12. Applications des géopolymères :	17
I.13. Processus De Géopolymérisation :	19
I.14. Avantages et inconvénients des géopolymères :	20
Conclusion :	21
CHAPITRE II MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES	
II.1. Introduction :	22
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés :	22
II.2.1. Poudre de Verre (Powder of Glass) :	22
II.2.1.1. Processus de collecte des déchets de verre :	23

..	
II.2.2. Poudre de Pierre :	24
II.2.2.1. Processus de concassage de pierre :	25
II.2.3. Poudre Déchet de Brique :	26
II.2.4. Sable de Dunes :	27
A) Analyse granulométrique [NF P 18- 560] :	27
B). Equivalent de sable [NF EN 933-8] :	28
C). La masse volumique apparente et absolue de sable [NF P18-555] :	29
C.1). Masses volumiques apparentes :	29
C.2). Masse volumique absolue :	30
D). La teneur en eau [NF P18-554] :	31
E). Caractérisation chimique de sable [EN P 15-461] :	31
II.2.5. Le silicate de sodium :	32
II.2.6. Hydroxyde de sodium (NaOH) :	33
II.2.7. Eau de gâchage :	34
II.3. Partie expérimentales :	34
II.3.1. Méthode de formulation de mortier cimentaire :	34
2.2. La densité :	37
2.3. Essais à la traction par de flexion :	38
2.5. Vitesse ultrasonique :	39
2.6. Absorption capillaire :	39
2.7. Porosité accessible à l'eau :	40
Conclusion :	41
CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPETATIONS	
III.1. Introduction :	42
III.2. Aspect visuelle :	42
III.3. La masse volumique :	43
III.4. Résistance à la compression :	45
III.5. Résistance à la traction par flexion :	46
III.6. Porosité accessible à l'eau :	47
III.7. Absorption capillaire :	49
III.8. Vitesse ultrasonique :	51
Reference:	57

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie de la construction est identifiée comme le principal consommateur d'énergie globale, avec une part de 40% dans la consommation énergétique totale et responsable de 30% des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) [45]. Les impacts environnementaux significatifs associés à ce secteur découlent principalement de la production de matériaux comme le ciment Portland, ainsi que de l'utilisation énergétique des bâtiments pour maintenir un confort thermique pendant les saisons chaudes et froides. Il est donc essentiel d'adopter une approche stratégique holistique qui englobe divers aspects, notamment la réduction de la consommation énergétique et l'emploi de matériaux de construction à faible impact environnemental.



Figure 1. Les émissions de CO₂.

Les géopolymères représentent une option avantageuse pour réduire les impacts négatifs sur l'environnement. Ils sont fabriqués en activant des matériaux aluminosilicates avec une solution alcaline. Ces matériaux peuvent inclure des résidus industriels, des sous-produits ou différentes sortes d'argiles, tels que le laitier de haut fourneau, le métakaolin, les cendres volantes et la boue rouge. L'utilisation de ces matériaux en remplacement du ciment Portland peut réduire de manière significative les émissions de dioxyde de carbone et les déchets produits par les industries, contribuant ainsi à un impact environnemental réduit. La fabrication de géopolymères pourrait diminuer les émissions de CO₂ de 70 à 80% par rapport à la production

de ciment traditionnel [46]. En outre, les géopolymères offrent de nombreux avantages par rapport aux matériaux conventionnels à base de ciment, comme une résistance mécanique supérieure au début [47], une excellente résistance au feu, un temps de prise plus court et une meilleure résistance aux attaques acides [48].

L'utilisation de déchets industriels comme liant réduit grandement les émissions de CO₂ comparées à celles générées par une tonne de ciment Portland. Il est vrai que la production de l'activateur engendre encore une quantité importante de CO₂. Néanmoins, chaque tonne de ciment géopolymère produit jusqu'à dix fois moins de CO₂, ce qui représente un bénéfice considérable pour l'environnement. Le dioxyde de carbone joue un rôle majeur dans le réchauffement climatique, un problème qu'il est essentiel de combattre.

Intégrer divers déchets industriels dans le béton et le mortier est un défi technique important. Plusieurs matériaux ont été testés comme agrégats dans le béton, y compris les fibres de verre, les fibres minérales et les résidus de briques rouges. Ces déchets sont habituellement incorporés dans le béton en remplacement partiel des agrégats naturels

Les agrégats sont essentiels pour l'industrie de la construction et des travaux publics. La croissance rapide des zones urbaines à travers le monde a entraîné une hausse significative de la production de sous-produits et de déchets. Ces derniers émanent principalement des industries de production de matériaux de construction et résultent également des processus de construction, de rénovation et de démolition [49].

Particulièrement, les déchets issus de diverses branches de l'industrie des matériaux de construction, y compris ceux associés à la fabrication de briques pleines et creuses, sont en augmentation constante, comme le démontrent les statistiques. Cette tendance est due à la demande croissante liée aux besoins grandissants de la population.



Figure 2 : Déchet de brique [6].

De nos jours, le recyclage de ces déchets représente une solution viable, offrant de nouvelles ressources renouvelables et durables qui participent au processus de construction tout en préservant l'environnement. Les déchets de brique constituent une option prometteuse, car ils sont abondants et souvent laissés à l'abandon sur les sites de construction.

En particulier, nous cherchons à déterminer si les déchets de briques rouges peuvent être intégrés en tant qu'additif au mortier géopolymère. De plus, nous évaluons l'efficacité de cet ajout en termes d'amélioration des propriétés mécaniques et physiques du mortier géopolymère.

Les objectifs principaux de cette recherche sont les suivants :

- Formuler un mortier géopolymère.
- Analyser les propriétés mécaniques et physiques du mortier géopolymère élaboré à partir de déchets de briques rouges.
- Examiner les impacts de la température et de la concentration en NaOH sur le mortier géopolymérique.

Contexte

:

Le manuscrit est structuré en trois chapitres, ainsi qu'une introduction générale et une conclusion. Voici un aperçu de ces trois chapitres :

-Le premier chapitre consiste en une revue de la littérature sur les géopolymères ciment.

-Le deuxième chapitre se focalise sur l'identification des matériaux utilisés, incluant une caractérisation physico-chimique et des essais de sable ainsi que des mélanges de mortier.

-Le troisième chapitre présente une synthèse des résultats expérimentaux, analysant l'impact des caractéristiques physiques et mécaniques sur les échantillons de mortier.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES

CIMENT

I.1. Introduction :

Depuis quelques années, le domaine de la construction a été le théâtre d'une révolution silencieuse mais significative : l'émergence des bétons géopolymères [1]. Ces matériaux innovants ont attiré l'attention et stimulé l'imagination de nombreux chercheurs et ingénieurs à travers le monde [2]. Cette fascination n'est pas sans raison. En effet, les bétons géopolymères incarnent une promesse séduisante : celle d'une alternative durable et écologique au béton traditionnel à base de ciment.

Au cœur de cette nouvelle technologie se trouvent les géopolymères, des polymères inorganiques développés grâce à des réactions géochimiques [3]. Leur composition et leurs propriétés uniques ouvrent la voie à de nouvelles possibilités dans le domaine de la construction. Contrairement au béton de ciment conventionnel, le béton géopolymère se distingue par sa méthode de préparation et ses caractéristiques finales, offrant ainsi un potentiel révolutionnaire pour l'industrie de la construction.

Dans ce chapitre introductif, nous plongerons dans l'univers fascinant des bétons géopolymères. Nous explorerons leur composition, leurs méthodes de fabrication et leurs propriétés mécaniques [4]. Nous analyserons également les avantages environnementaux inhérents à ces matériaux, tels que des émissions réduites de CO₂ et une meilleure résistance à la corrosion. Enfin, nous aborderons les applications diverses et prometteuses des bétons géopolymères dans des secteurs aussi variés que les infrastructures, la construction routière et même les projets de stockage nucléaire.

Ce chapitre représente une première étape dans notre exploration de cette technologie révolutionnaire. En nous plongeant dans l'histoire des géopolymères et en comprenant les fondements de leur utilisation, nous jetterons les bases nécessaires à une compréhension approfondie de ce domaine en pleine évolution.

I.2. Historique géopolymère :

Évolution des géopolymères : En 1979, le chimiste français Joseph Davidovits fut le pionnier dans l'étude des géopolymères [5]. Il a choisi le terme "géopolymère" pour souligner la similitude de ces matériaux inorganiques avec les polymères organiques. Les géopolymères sont connus pour leur résistance au feu, à la chaleur, aux acides et à la compression [2]. Les premiers géopolymères ont été synthétisés par une réaction hydrothermale d'aluminosilicates avec une solution concentrée de silicates alcalins, connue sous le nom de solution activatrice alcaline, composée de cations alcalins et d'anions silicate.

L'objectif de ces recherches avant-gardistes était de trouver un nouveau matériau de construction pouvant servir d'alternative réelle au ciment Portland. La chimie des géopolymères est très différente de celle des ciments. Les propriétés mécaniques des ciments sont dues à une phase minérale spécifique, les C-S-H (Silicate de Calcium Hydraté). Le ciment est un liant hydraulique car il durcit avec l'eau, c'est une réaction d'hydratation d'oxyde de calcium et de silicate qui forme des C-S-H. La réaction de géopolymérisation est plus proche de la formation de zéolithes et de gels aluminosilicates. En raison de leurs propriétés de résistance mécanique, les géopolymères sont qualifiés de liants alcalins [1].

Les géopolymères ont l'avantage de pouvoir être formulés à partir d'une large gamme de minéraux d'aluminosilicate autres tels que les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux ou d'autres minéraux naturels. Cette diversité dans les matériaux de départ et les conditions de réaction lors de la synthèse des géopolymères a conduit à une extension de la définition de la réaction de géopolymérisation proposée par Davidovits. Le terme géopolymérisation englobe toutes les réactions qui transforment un solide composé d'aluminosilicate ou de silicate en une autre substance en présence d'une solution alcaline, avec ou sans silicate soluble, sous différentes conditions [2].

I.3. Définition des géopolymères :

Le ciment géopolymère est le résultat du processus de polycondensation d'aluminosilicates, présents dans un mélange de matériaux inorganiques, induit par l'action d'une solution alcaline activatrice (ou alcalinisation) [6]. Le processus de géopolymérisation produit une structure tridimensionnelle de liaisons polymères Si-O-Al qui permet au ciment géopolymère de durcir et de développer une résistance mécanique considérable dans des conditions ambiantes. Outre les matières premières les plus couramment utilisées, à savoir le méta kaolin, les cendres volantes et les scories, plusieurs déchets inorganiques, notamment les déchets de verre, les

déchets issus de la transformation de la pierre naturelle, les résidus miniers et les déchets de céramique, contiennent dans leur composition des fractions d'aluminosilicates réactifs qui les transforme en matières premières potentielles pour la production de ciment géopolymère, contribuant ainsi à une approche d'économie circulaire des matériaux de construction [7]. En outre, les propriétés clés d'un géopolymère, notamment une prise et un développement de résistance rapides, une durabilité élevée et une faible empreinte environnementale, pourraient en faire une alternative viable et écologique au ciment Portland ordinaire pour certaines applications spécifiques [8].

I.4. Matériaux constitutifs des géopolymères :

La fabrication des géopolymères s'effectue par le processus d'activation alcaline de solides aluminosilicates (composés principalement de SiO_2 et Al_2O_3). Ces matériaux peuvent être synthétisés en utilisant une variété de minéraux comme les cendres volantes, le laitier métallurgique, le métakaolin, ou d'autres sources minérales naturelles. Il est illustré que diverses substances peuvent servir de précurseurs dans l'élaboration des géopolymères. La richesse en matériaux permet d'inclure sous le terme de géopolymère l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre un solide aluminosilicate et une solution alcaline, menant à la création d'un gel géopolymère. (Voir La Figure I.1).

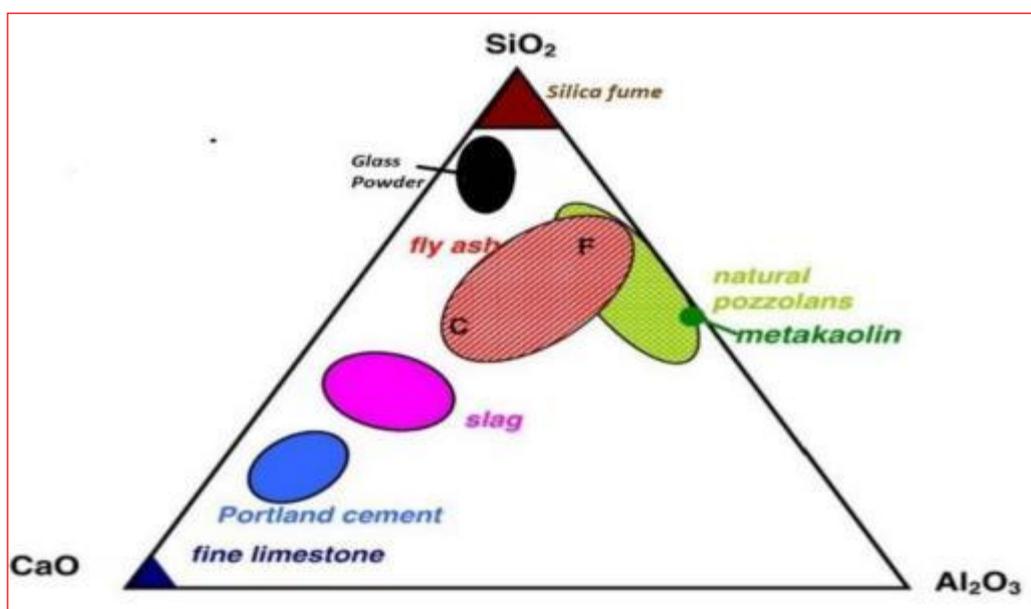


Figure I.1. Diagramme ternaire CaO-Al₂O₃-SiO₂ des matières premières de géopolymère et d'autres liants traditionnels [24].

I.4.1. Matériaux primaires :

I.4.1.1. Cendres volantes :

Les cendres volantes, également connues sous l'acronyme FA, sont des particules fines issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Elles sont capturées par des méthodes électrostatiques ou mécaniques pour éviter leur dispersion dans l'atmosphère. Ces cendres sont principalement constituées de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), de chaux (CaO) et de fer (Fe_2O_3). Selon la norme ASTM C618, il existe deux classes de cendres volantes : la classe F, qui est riche en silice et alumine et considérée comme pouzzolanique, et la classe C, qui contient une plus grande quantité de calcium.

Ces matériaux dans la fabrication de géopolymères. Les cendres volantes de classe F sont particulièrement favorisées pour la formulation de géopolymères en raison de leur teneur élevée en silice et alumine, qui sont essentielles à la synthèse de ces matériaux [8].

I.4.1.2. Laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit majoritairement vitreux issu de l'élaboration de la fonte. Il résulte de la réduction des minerais de fer, comme l'hématite (Fe_2O_3) ou la magnétite (Fe_3O_4), par le coke qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur. Ce processus permet d'obtenir de la fonte, un alliage de fer-carbone saturé en carbone, également connu sous le nom de pig-iron.

Durant la métallurgie, la température élevée du haut fourneau entraîne la fusion des matériaux, séparant ainsi la fonte, plus dense, du laitier moins dense. Le laitier, qui est un liquide silicaté fondu, remonte à la surface et peut être facilement éliminé. Après refroidissement rapide, il se solidifie en un matériau vitreux, souvent utilisé sous forme de sable.

Les laitiers de haut fourneau possèdent une hydraulité potentielle, qui, une fois activée, confère aux ciments contenant du laitier une résistance accrue aux agents chimiques agressifs. Finement broyé, le laitier vitrifié peut être un constituant principal du ciment, autre que le clinker, ou être introduit comme addition au béton. Utilisé dans la fabrication de ciments. Ce laitier est aussi utilisé pour la fabrication de mortiers et bétons en remplacement direct du ciment Portland. Ce type de laitier est généralement utilisé pour produire du géopolymère.

Dans le secteur de la construction, l'utilisation des laitiers apporte une réponse écologique et économique très intéressante. En effet, pour chaque tonne de fonte produite, 200 à 400 kg de laitier sont générés. De plus, la production d'une tonne de laitier moulu 'Eco cem' en France émet en moyenne 16 kg de CO_2 , soit 45 fois moins qu'une tonne de ciment traditionnel.

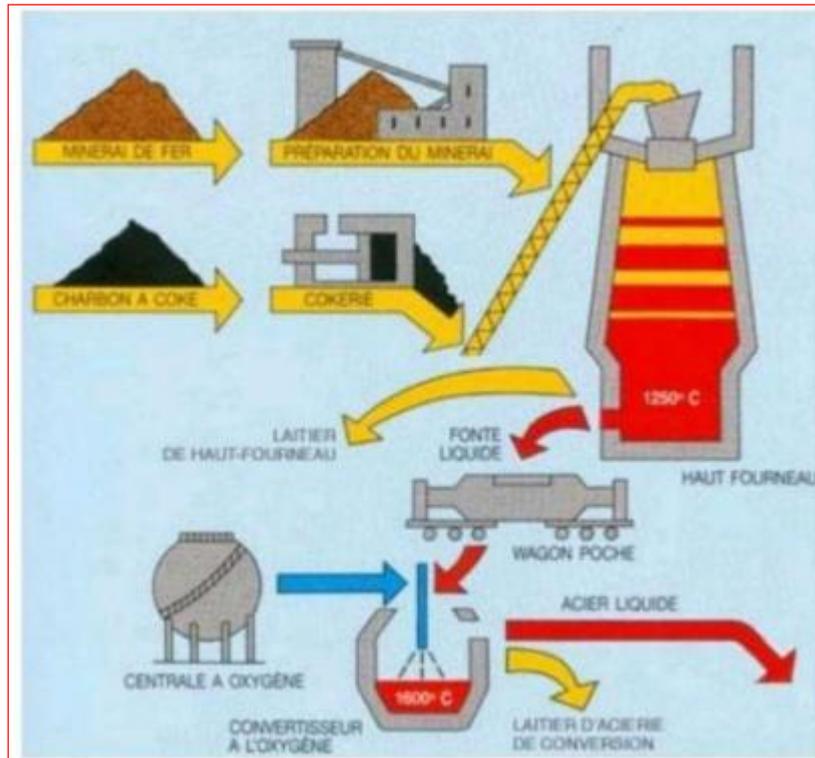
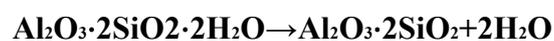


Figure 5. Fabrication de fonte et récupération delaitier de haut fourneau.

I.4.1.3. Métakaolin :

L'utilisation des argiles chauffées remonte à l'antiquité romaine. Le métakaolin, issu de l'argile kaolinique pure, est produit par calcination entre 650 et 800°C. Le kaolin, extrait de gisements ou récupéré comme résidu minier ou déchet papetier, est accessible globalement.

La calcination, transformation endothermique de la kaolinite, nécessite une chaleur intense pour retirer les ions hydroxyles et altérer la structure moléculaire. Ce procédé est crucial pour obtenir des matériaux pouzzolaniques très réactifs. La kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) perd son eau, s'effondrant en métakaolin, un aluminosilicate amorphe ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), par déshydroxylation, représentée par l'équation suivante :



Le métakaolin est une source riche en alumine et silice, réagissant vivement avec les solutions alcalines, favorisant ainsi la géopolymérisation. Outre la production de géopolymères, il sert d'additif au ciment Portland et au béton, améliorant leurs propriétés grâce à sa teneur active en silice et alumine, qui réagit avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en milieu aqueux [9].

I.5. Activateurs chimiques :

L'activation chimique des bétons géopolymères nécessite l'utilisation d'alcalis puissants pour stimuler l'activité du silicium et de l'aluminium présents dans les matériaux de base. Cette activation est essentielle pour transformer, en partie ou en totalité, la structure vitreuse d'origine en un matériau composite densifié. On associe le silicate soluble à des éléments tels que les cendres volantes, le ciment, la chaux, le laitier ou d'autres composés riches en ions métalliques à valences multiples, favorisant ainsi la formation de gel et la précipitation des silicates. L'interaction du NaOH avec les substances solides réactives entraîne une libération accrue des monomères de silicate et d'aluminate.

Dans son étude de 1981, Glukhovsky [10] a classifié les activateurs chimiques en 6 groupes différents, avec M représentant un ion alcalin :

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

Katz [11] a étudié l'effet de l'activation des scories avec des solutions alcalines (NaOH) et a observé une amélioration de la résistance mécanique avec l'augmentation de la concentration de l'activateur. Cette observation a également été confirmée par d'autres chercheurs utilisant du métakaolin activé par des alcalis.

En ce qui concerne l'activation alcaline des cendres volantes, Palomo et al. [12] ont découvert qu'un activateur de concentration 12 M était plus efficace qu'un de 18 M. Ils ont souligné l'importance de l'activateur alcalin dans la réaction de polymérisation, qui est accélérée en présence de silice soluble. Criado et al. [13] ont constaté que le silicate de sodium (verre liquide) favorise la polymérisation, conduisant à un produit de réaction renforcé en Si et en résistance mécanique. Fernandez Jimenez et Palomo [14] ont observé une augmentation significative de la résistance, de 40 à 90 MPa, dès le premier jour de durcissement lors de l'utilisation d'un activateur alcalin (silicate de soude ou carbonate de sodium) en combinaison avec NaOH, plutôt qu'avec NaOH seul.

I.6. Concentration ou molarité de la solution alcaline :

L'impact de la concentration en hydroxyde alcalin est notable sur les caractéristiques physiques et mécaniques des géo-matériaux. La réaction de solubilisation des aluminosilicates est stimulée par la solution alcaline, ce qui accroît la vitesse de la géopolymérisation [15]. Le taux d'ions nécessaires à la dissolution est régulé par la concentration alcaline. Habituellement, une hausse de la concentration de NaOH entre 4 M et 12 M entraîne une augmentation de la solidité des géopolymères. D'après les analyses DRX, on observe une croissance de la phase amorphe proportionnelle à celle de la concentration de NaOH [16]. De même, la cinétique réactionnelle s'intensifie avec l'élévation de la concentration en hydroxyde alcalin. Au cours de la réaction, les ions Na^+ et OH^- interagissent. Une faible présence de sodium implique un manque d' OH^- pour dissoudre entièrement les ions Si^{4+} et Al^{3+} issus des aluminosilicates, ainsi qu'une carence en Na^+ pour une géopolymérisation totale. Par conséquent, la résistance à la compression du géopolymère s'avère réduite [17]. Cependant, il a été démontré par plusieurs études que l'alcalinité élevée peut être préjudiciable aux propriétés mécaniques des géopolymères. En effet, la résistance à la compression (R_c) des géopolymères s'accroît avec la concentration de NaOH, mais diminue après avoir atteint un seuil optimal. Par exemple, Zuhua et al. [18] ont identifié 9M comme la concentration idéale de NaOH pour la production de géopolymères à base de métakaolin. Au-delà de cette concentration, la réaction de polymérisation est inhibée. Une forte concentration de NaOH rend la solution d'activation trop visqueuse, perturbant ainsi la dissolution des ions Si et Al de la source d'aluminosilicate. Cette viscosité excessive favorise la précipitation hâtive des gels géopolymères et nuit aux propriétés mécaniques du produit final en raison des résidus matériels [19]. D'autre part, dans une plage de concentration de NaOH légèrement supérieure (10M-18M), Alonso & Palomo [20] ont démontré que l'augmentation de la concentration de NaOH réduit le taux de polycondensation. Dans ces conditions, l'accroissement de la concentration retarde la polymérisation car une grande quantité d'ions dissous entraîne une saturation et limite l'interaction entre les espèces polymérisées et les structures coagulées [21]. Il est également crucial que la concentration alcaline soit adéquate pour équilibrer les charges du réseau géopolymérique sans excès de cations alcalins, susceptibles de causer une carbonatation [21]. Les concentrations de Si, Al et Na influencent significativement les propriétés finales des géopolymères. Bien que la composition du mélange ait été modifiée par de nombreux chercheurs, les matériaux géopolymères sont toujours affectés par les différentes phases réactives des sources d'aluminosilicates [15].

I.7. Mode de cure ou régime de durcissement des matériaux géopolymères :

Le processus de durcissement des matériaux géopolymères est crucial pour assurer des propriétés mécaniques optimales et durables. Davidovits a recommandé une plage de température idéale de 60°C à 95°C pour le durcissement, où une température de 75°C pendant quatre heures a produit une résistance à la compression (R_c) de 39,8 MPa sans traitement supplémentaire [15]. L'augmentation de la température favorise la réaction en accélérant la dissolution des silicates et des aluminates, facilitant ainsi la condensation et le durcissement de la matrice géopolymère. Cependant, des températures élevées peuvent renforcer la résistance mécanique initiale tout en compromettant potentiellement sa durabilité.

Selon Yao et al., le durcissement à température ambiante est lent, et un durcissement à 50°C n'améliore pas significativement les propriétés mécaniques [22]. Rovnanik a observé que des températures élevées peuvent entraîner la formation de pores importants, affectant négativement la résistance des géopolymères [23]. À l'inverse, des géopolymères durcis à des températures plus basses ont maintenu leur résistance à la compression sur la même période.

Le durcissement à haute température peut entraîner une évaporation rapide de l'eau, entravant le développement des propriétés mécaniques souhaitées et augmentant la tendance à la fissuration des produits géopolymères. Le temps de durcissement influence également le développement de la structure des géopolymères, où des durées plus longues peuvent favoriser une résistance mécanique optimale [24].

Diverses méthodes de durcissement ont été explorées, notamment le traitement en autoclave et le traitement hydrothermal. Par exemple, un pré-durcissement à 75°C pendant trois heures suivies d'un durcissement à température ambiante pendant 28 jours est recommandé pour obtenir des géopolymères à base de métakaolin avec une résistance à la compression élevée [25]. Il est crucial d'appliquer un régime de durcissement adéquat pour permettre une dissolution et une condensation appropriées des silicates et des aluminates, car un régime inadéquat peut avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques des produits finaux.

I.8. Différents types de géopolymère :

I.8.1. Géopolymère à base de laitier :

Les constituants fondamentaux comme le métakaolin, le laitier de haut fourneau et le silicate alcalin jouent un rôle crucial dans la genèse des structures géopolymères. Ces dernières se distinguent par des ratios spécifiques de silicium à aluminium, tels que Si:Al 2 (qui correspond en réalité à Si:Al 1), ainsi que par la formation de Ca-poly(disilicate) et d'anorthite avec un ratio

Si:Al 3. De plus, on retrouve le K-poly(sialate-disiloxo), prenant la forme d'orthose, et une phase solide de calcium disilicate hydraté (CSH).

Les premiers géopolymères, développés dans les années 1980, étaient principalement des polymères de type (K, Na, Ca)-poly(sialic acid), ou ciment géopolymère à base de laitier, issu des recherches de Joseph Davidovits et J.L. Ces avancées ont conduit à la création du ciment Pyrament, qui jouit d'une reconnaissance importante dans l'industrie (Davidovits, 1994; Provis & van Deventer, 2014; Hardjito et al., 2004) [26-28].

I.8.2. Géopolymère à base des roches volcaniques :

En substituant une partie du métakaolin (MK-750) par des tufs volcaniques soigneusement sélectionnés, il est possible d'améliorer les propriétés des ciments géopolymères tout en réduisant leurs émissions de CO₂ par rapport aux ciments géopolymères classiques à base de laitier de haut fourneau. Cette pratique tire parti des matériaux tels que le tuf volcanique, le laitier de haut fourneau, et le laitier associé à un silicate alcalin, comme matières premières.

Les géopolymères ainsi obtenus présentent une structure comprenant plusieurs phases, notamment le Ca-poly(disialate) de type anorthite avec un ratio Si:Al de 1, ainsi que le (Na,K)-poly(sialate-multisiloxo) avec un ratio Si:Al de 3-5. De plus, une solution solide de disilicate de calcium hydraté (CSH) est formée dans le matériau final.

Cette approche offre une alternative durable et techniquement viable dans le domaine des matériaux de construction. Des études telles que celles menées par Xie, J., et al. (2019) [29], ont examiné les effets de l'incorporation de tufs volcaniques dans les géopolymères. De même, les travaux de recherche de Provis, J. L., et al. (2015) [30], fournissent des insights sur la structure et les propriétés des ciments géopolymères, contribuant ainsi à la compréhension de cette technologie prometteuse.

I.8.3. Ciment géopolymère à base de cendres volantes :

En 1997, van Jaarsveld et van Deventer ont introduit une innovation majeure en développant des géopolymères utilisant des cendres volantes, s'appuyant sur les travaux antérieurs portant sur les ciments géopolymères à base de laitier et les zéolithes synthétisées à partir de cendres volantes. Actuellement, deux catégories principales de ciment de cendres volantes de grade F sont distinguées :

Type 1 : Il s'agit d'un ciment géopolymère activé alcalinement à base de cendres volantes, qui nécessite généralement une cure thermique entre 60-80°C. Ce type de ciment n'est pas produit de manière isolée mais est intégré dans le béton. La réaction chimique principale implique l'hydroxyde de sodium (NaOH) et les cendres volantes. Sa structure consiste en des particules de cendres volantes noyées dans un gel d'aluminosilicate, avec un rapport Si:Al variant de 1 à 2, similaire à une structure de type zéolithe.

Type 2 : Il s'agit d'un ciment géopolymère à base de laitier/cendres volantes qui peut être durci à température ambiante. Ce type de ciment utilise une solution de silicate (non corrosive et non caustique), du laitier de haut fourneau et des cendres volantes. Sa structure comprend des particules de cendres volantes intégrées dans une matrice géopolymérique, avec un rapport Si:Al de 2, formant un (Ca,K)-poly(sialate-siloxo).

Ces développements représentent des avancées significatives dans le domaine des matériaux de construction durables. Des recherches telles que celles menées par Van Jaarsveld, J. G., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2002) [31], ont exploré en détail les propriétés et les applications des géopolymères à base de cendres volantes. De même, les travaux de Davidovits, J. (2008) [32], fournissent des informations précieuses sur la chimie et la technologie des géopolymères, éclairant ainsi leur utilisation dans l'industrie de la construction.

I.9. Facteurs affectant les caractéristiques des géopolymères :

Les propriétés mécaniques et thermiques des géopolymères sont influencées par les caractéristiques des composants individuels et par la composition chimique globale du matériau. La réaction de formation des géopolymères est particulièrement sensible aux facteurs suivants :

La qualité des matières premières, comprenant la taille des particules et le degré de cristallinité. Le type d'activateur alcalin utilisé, tel que l'hydroxyde de sodium ou de potassium, le silicate de sodium ou de potassium, etc.

Les ratios Si/Al.

Les ratios Solution/Précurseur.

Les conditions de durcissement, incluant la température, le degré d'humidité, la durée et les conditions environnementales de durcissement, entre autres.

Ces paramètres jouent un rôle crucial dans le processus de formation des géopolymères et déterminent finalement leurs performances et leurs caractéristiques. Des études comme celles menées par Duxson, P., et al. (2007) [33], ont examiné l'impact de ces variables sur les

propriétés des géopolymères, offrant ainsi des perspectives précieuses pour leur conception et leur utilisation dans diverses applications.

I.10. Les ciments géopolymères :

Les ciments géopolymères représentent une innovation dans le domaine des matériaux de construction, offrant une alternative écologique au ciment Portland traditionnel. Ils sont élaborés à partir de ressources géologiques naturelles ou de déchets industriels tels que les cendres volantes, nécessitant l'utilisation d'un réactif alcalin inoffensif pour durcir à température ambiante. Ces ciments présentent plusieurs avantages significatifs par rapport au ciment Portland : ils offrent un temps de durcissement plus court et réduisent considérablement les émissions de CO₂ associées à leur production, pouvant atteindre une réduction allant de 40 à 90% selon les composants utilisés.

De plus, les ciments géopolymères se distinguent par leur grande résistance aux agressions chimiques, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications dans le génie civil, la construction et les structures offshore. Leur capacité à former des liaisons chimiques robustes avec une variété de granulats d'origine rocheuse en fait des candidats privilégiés pour une gamme étendue d'applications. En raison de ces caractéristiques, le ciment géopolymère est de plus en plus considéré comme une solution prometteuse pour répondre aux exigences de la construction durable et pour façonner l'avenir de l'industrie de la construction.

Cette perspective est appuyée par des recherches telles que celles menées par Provis, J. L., Bernal, S. A., & Duxson, P. (2014) [34], qui ont examiné en détail les propriétés et les applications des géopolymères dans le domaine de la construction durable. De même, les travaux de Palomo, A., Krivenko, P. V., García-Lodeiro, I., & Fernández-Jiménez, A. (2014) [35], fournissent des informations précieuses sur les mécanismes de formation des géopolymères et leur potentiel dans diverses applications industrielles.

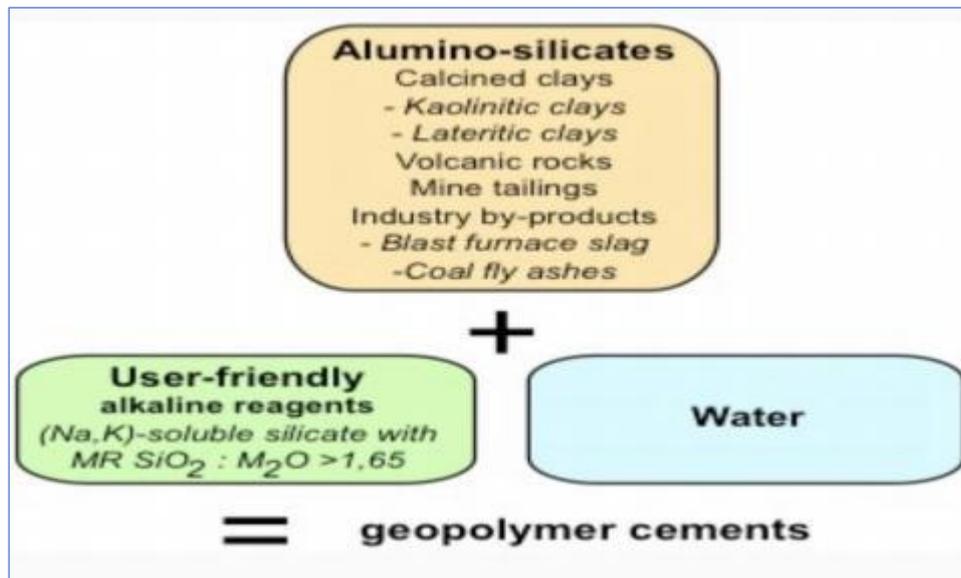


Figure I.1 Ciment géopolymère.

I.11. Impact environnemental des géopolymères par rapport

La production mondiale de ciment Portland connaît une croissance annuelle estimée à environ 9 %, une expansion soutenue qui représente une menace significative pour l'environnement. Cette menace découle principalement des émissions substantielles de CO₂ générées lors du processus de fabrication du ciment, comme illustré dans la Figure I.1.

Les géopolymères émergent comme une alternative écologique et prometteuse au ciment Portland traditionnel. Souvent qualifiés de "ciment vert", ces matériaux offrent des avantages environnementaux et énergétiques considérables en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, un défi majeur de notre époque. En comparaison avec le ciment Portland, qui libère environ une tonne de CO₂ pour chaque tonne produite, les géopolymères permettent de réduire les émissions de dioxyde de carbone de 40 à 80 % pendant leur processus de production.

Ces perspectives sont étayées par des recherches telles que celles menées par Palomo, A., Krivenko, P. V., García-Lodeiro, I., & Fernández-Jiménez, A. (2014) [36], qui ont exploré les bénéfices environnementaux des géopolymères par rapport au ciment Portland. De plus, les travaux de Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012) [37], ont examiné en détail les propriétés et le potentiel des géopolymères en tant que matériaux de construction durables.



Figure I.2. Les émissions de CO₂.

1. Applications des géopolymères :

Les géopolymères émergent comme une alternative prometteuse aux matériaux de construction traditionnels, offrant une diversité d'applications allant de la construction d'infrastructures telles que les routes et les ponts à la fabrication de panneaux de béton et de blocs pour la construction. Cet article examine quelques-unes des applications les plus courantes des géopolymères.

De nos jours, les géopolymères gagnent en popularité comme matériaux durables dans divers projets de construction et de génie civil, en raison de leurs avantages écologiques et de leur performance supérieure par rapport au béton traditionnel à base de ciment Portland. Cette technologie, économe en énergie, a évolué des laboratoires de recherche universitaires vers des applications concrètes dans le secteur de la construction à grande échelle. Il est désormais envisageable de substituer le béton conventionnel par des géopolymères dans de nombreux usages.

Un exemple remarquable est l'aéroport de Brisbane West Wellcamp à Toowoomba, Queensland, en Australie. Inauguré le 14 octobre 2014, cet aéroport est le premier aéroport public en plein champ d'Australie à être construit. Il a utilisé 70 000 tonnes de béton géopolymère, marquant ainsi une avancée majeure dans le domaine de l'ingénierie. Avec environ 40 000 m³ (100 000 tonnes) de béton géopolymère utilisé pour les chaussées, il s'agit de la plus grande application de cette nouvelle classe de béton dans le monde. En plus des chaussées, 15 000 m³ supplémentaires de béton géopolymère ont été utilisés dans diverses applications telles que les ponts d'entrée à l'aéroport, les barrières de trottoir et de route, les éléments préfabriqués, les panneaux d'inclinaison moulés sur le site, les semelles et les réservoirs d'égout. Ce projet a permis une réduction significative de 6600 tonnes de CO₂ qui auraient été émises en utilisant du béton ordinaire.

La promotion de l'adoption du béton géopolymère à base de laitier et de cendres volantes a également été remarquée en 2013, lorsque l'entreprise Wagners a été impliquée dans la réalisation de projets phares au sein de l'Institut du Changement Global et le secteur de l'Innovation à l'Université du Queensland, en Australie.

Un autre exemple est celui de l'entreprise russe Tsentrometallurgremont, qui a utilisé avec succès du béton géopolymère à base de laitier de haut fourneau pour la construction de plusieurs bâtiments entre 1986 et 1994. Certains de ces bâtiments comprennent environ 20 étages et présentent des conceptions architecturales complexes.

Ces cas illustrent la diversité des applications et des avantages des géopolymères dans le domaine de la construction. Pour plus de détails sur ces projets et sur les propriétés des géopolymères, les travaux de recherche de Palomo, A., Krivenko, P. V., García-Lodeiro, I., & Fernández-Jiménez, A. (2014) [36] et de Davidovits, J. (1994) [37] fournissent des informations précieuses.



Figure I.3. Le nouvel aéroport « Brisbane West Wellcamp » en Australie réalisé avec un béton géopolymère. [43]



Figure I.4. L'institut GCI (The Global Change Institute) à l'Université du Queensland, Australie, 2013 [126].



Figure I.5. Première structure en béton géopolymère a été construite en 1994 à Lipetsk, en Russie, [84].

2. Processus De Géopolymérisation :

Les mécanismes sous-jacents à la géopolymérisation restent encore énigmatiques aujourd'hui, principalement en raison de la vitesse à laquelle les aluminosilicates réagissent avec la solution activatrice. Glukhovsky, dans les années 1950, fut le pionnier à proposer un mécanisme global pour l'activation alcaline des substances riches en silice et alumine active [38]. Il a décrit le processus en trois phases distinctes : (a) destruction et coagulation, (b) coagulation et condensation, et (c) condensation et cristallisation. Plus récemment, divers chercheurs ont développé les théories de Glukhovsky pour expliquer le processus complet de géopolymérisation, [39]. Cela a mené Duxson et ses collègues [40] à suggérer un mécanisme réactionnel de géopolymérisation considérablement simplifié. Ce mécanisme décrit les étapes clés de la conversion d'une source solide d'aluminosilicate en un aluminosilicate alcalin synthétique (voir Figure 6).

Xu et ses collaborateurs [41] ont décomposé ce modèle en trois phases réactionnelles simultanées et partiellement réversibles :

- La dissolution de la source d'aluminosilicate, aboutissant à la création de précurseurs réactifs tels que $\text{Si}(\text{OH})_4$ et $\text{Al}(\text{OH})_4$.
- La restructuration et l'arrangement de ces précurseurs vers une configuration plus stable.
- La gélification, la polycondensation et la précipitation du système, autrement dit, la condensation des mono-silicates et des mono-aluminates pour former des liaisons Si-O-Si et Si-O-Al.

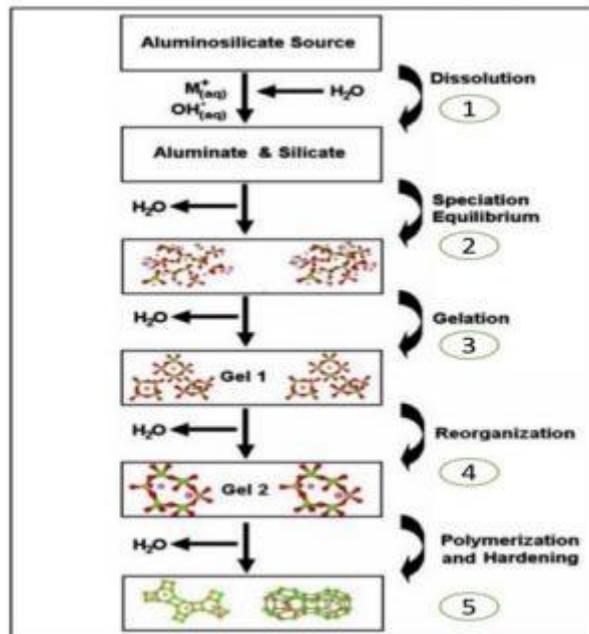


Figure I.7. Mécanisme de réaction simplifié pour la géopolymérisation selon Duxson et al. [16].

Avantages et inconvénients des géopolymère :

Les géopolymères sont largement reconnus pour leur remarquable résistance au feu, aux hautes températures et aux acides, ce qui les rend adaptés à une multitude d'applications. Leur développement s'inscrit dans la tendance croissante des ciments écologiques, offrant des avantages significatifs tant sur le plan environnemental que sur le plan énergétique. En effet, la production de ciment géopolymère peut réduire les émissions de CO_2 de 40% à 80% par rapport au ciment Portland, qui génère environ une tonne de CO_2 par tonne de ciment produit [42].

De plus, la quantité d'énergie requise pour produire du ciment Portland est considérablement plus élevée, atteignant environ 4700 MJ/tonne, par rapport à celle nécessaire pour produire du ciment géopolymère. Cette dernière nécessite en moyenne environ 2715 MJ/tonne,

principalement utilisée pour la calcination d'aluminosilicates naturels tels que la kaolinite et la halloysite. Lorsque du laitier de haut fourneau est utilisé, cette consommation énergétique peut être réduite à 1965 MJ/tonne [43]. Ainsi, le ciment géopolymère se positionne comme une option écologique et économe en énergie par rapport au ciment Portland.

Cependant, malgré ces avantages, l'utilisation des géopolymères dans le génie civil reste limitée en raison de certains défis. La complexité du développement d'une formulation répondant à toutes les exigences constitue un obstacle majeur. De plus, le béton géopolymère peut présenter un retrait plus important que le béton Portland, en particulier lorsque le laitier de haut fourneau est utilisé comme unique source d'aluminosilicates. Ce phénomène peut compromettre la stabilité et la durabilité des structures en béton géopolymère [44].

Pour approfondir ces considérations, les recherches de Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007) [42], et celles de Bernal, S. A., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2014) [43], fournissent une compréhension approfondie des propriétés et des performances des géopolymères, ainsi que des défis associés à leur utilisation dans le génie civil.

Conclusion :

En conclusion, notre analyse initiale a mis en évidence les géopolymères comme une alternative écologique bénéfique au ciment conventionnel dans le domaine de la construction. Leur résistance mécanique et leur durabilité renforcent leur potentiel en tant que solution de substitution.

Cependant, malgré leurs avantages, les géopolymères restent en cours de développement et nécessitent des études et des essais supplémentaires pour améliorer leurs caractéristiques et assurer leur pérennité. De plus, leur fabrication demande un savoir-faire spécifique et l'utilisation de méthodes de production sophistiquées, ce qui peut entraîner des coûts plus élevés pour les chantiers de construction.

Dans l'ensemble, les géopolymères représentent des substituts prometteurs aux matériaux de construction traditionnels, offrant parfois des performances supérieures tout en contribuant à réduire l'empreinte écologique du secteur de la construction. Il est donc crucial de continuer à promouvoir la recherche et le développement des géopolymères afin d'améliorer leurs qualités et d'explorer leur plein potentiel dans divers domaines d'application.

CHAPITRE II MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction :

Les articles peuvent être trouvés dans notre vie quotidienne et sont essentiellement une partie de la plupart des choses dont nous dépendons. Vous trouvez leurs applications dans les domaines diverses qui comprennent la construction, l'industrie, les voitures et la technologie. Les multiples caractéristiques des matériaux restent varient en fonction de leur type et de leur configuration. Il est nécessaire de souligner comment ces propriétés affectent l'utilisation et tiennent comptetelle que le pouvoir, la flexibilité, le transporteur, ladensité et la durabilité pour choisir l'application appropriée de la meilleure forme. Dans ce chapitre, nous fournirons une présentation détaillée sur le matériel (en termes de caractéristiques, de types, de leurs classifications et de similitude) ainsi que les actions que nous avons mises en œuvre, que nous avons procédé dans leurs études

II.2. Caractérisation des matériaux utilisés :

II.2.1. Poudre de Verre (Powder of Glass) :

Le verre est un matériau solide transparent, homogène et cassant. Il résiste bien au feu et au contact de pratiquement tousles liquideset solides connus. La préparation delapoudre de verre (voir la Figure II.1), a été réalisée au niveau du laboratoire de Génie Civil dans l'université de Ghardaïa. Les étapes pour préparer de lapoudre de verre :

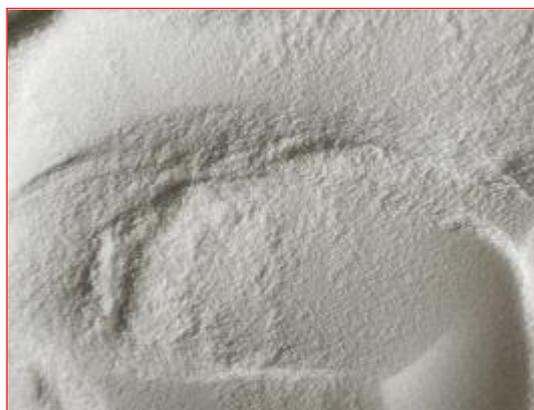


Figure II.1. Poudre de verre

II.2.1.1. Processus de collecte des déchets de verre :

D'abord, nous apportons les déchets de verre et les mettons dans la machine à broyer pour réduire la taille du verre, puis nous les mettons dans le tamis de 0,5 mm, et le reste nous retournons à la machine à broyer et tamisons jusqu'à obtenir une quantité importante de verre poudre. Après avoir obtenu la poudre, nous plaçons une quantité de poudre estimée à 500 g avec 5 kg de pellets de fer dans la machine Micro Devalet laissons jusqu'à ce qu'elle effectue 1200 cycles. A l'extraction du verre de la machine, on obtient 100% de poudre de verre (voir la Figure II.2).

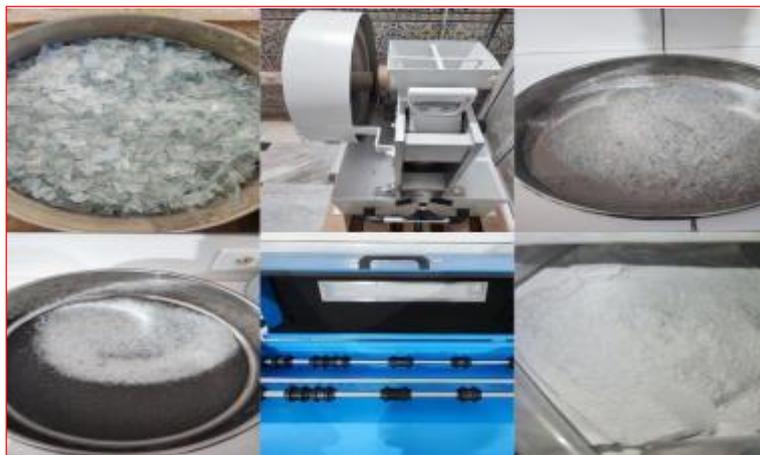


Figure II.2. Etapes de préparation de la poudre de verre.

II.2.1.2. Essai au bleu de méthylène :

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

L'essai consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100 g de la fraction granulaire analysée (voir la Figure II.3)

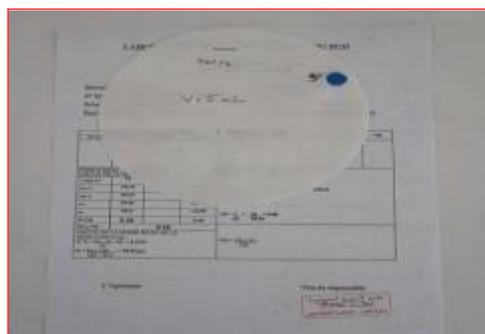


Figure II.3. Résultats d'essai au bleu méthylène.

Tableau II.1. Résultat del'essai de au bleu de méthylène.

GRANULOMETRIE (PASSANTS A)				LIMITES D'ATTERBERG		ES	VB	VB1
05 mm	02 mm	0.4 mm	0.08 mm	WL	IP			
PRISE D'ESSAI M=60 grs				VOLUME DE BLEU INJECTE DANS LA PRISE D'ESSAI V= 05 cm ³ .				
CALCUL DE LA TENEUR EN EAU.				VALEUR AU BLEU DE LA PRISE D'ESSAI PASSANT A:				
TARE N°	T2		L4	$VB = \frac{V}{M_s} = \frac{05}{50.90} = 0.08$				
PH+T	136,42		119,48					
PS+T	235,22		236,65					
PT	235,06		236,46					
Ps	98,64		116,98					
W (%)	0.16		0.16					
W moy (%)	0.16							
CALCUL DE LA MASSE SECHE DE LA PRISE D'ESSAI Ms:				$VB1 = \frac{VB \times \%t}{100}$				
$W\% = \frac{Ph - P_s}{P_s} \times 100 = 0.16\%$								
$P_s = \frac{Ph \times 100}{100 + W (\%)} = 59.90 \text{ grs}$								

II.2.2. Poudre de Pierre :

On l'appelle aussi biomes. Pierre ponce. La pierre ponce pouzzolane ou biomes se caractérise par sa grande porosité due à la nature de sa source issue de la lave volcanique originelle. La pouzzolane est un matériau volcanique naturel qui s'est formé lors d'une éruption de lave il y a des millions d'années. C'est un métal poreux dans lequel le volume des pores atteint un pourcentage élevé. La pouzzolane est similaire au ciment et est appelée ciment naturel et est utilisée comme ciment. La pouzzolane est un matériau volcanique noir et léger en raison de sa volatilité et de l'entrée de gaz dans celui-ci. (Voir la Figure II.12)



Figure II.12. Poudre de Pouzzolane

II.2.2.1. Processus de concassage de pierre :

D'abord, nous broyons les pierres pour réduire leur taille. Ensuite, nous mettons les pierres dans la machine de concassage et obtenons des petits granulés. Nous les broyons également et les broyons dans la machine Micro-Deval en plaçant des quantités de 500 grammes avec 5 kg de granulés de fer et les mettre dans la machine Micro-Deval jusqu'à ce qu'ilstournent 1200 tours pour obtenirun mélange. Les granulés sont plus petits que les précédents. Puis lapoudre La poudre obtenue a été tamisée paruntamis de 0,08 mm. (Voir la Figure II.13)



Figure II.13. Étapes de préparation lapoudre de pierre.

II.2.3. Poudre Déchet de Brique :

Les briques sont un élément de construction, souvent de forme rectangulaire, fabriqué à partir d'argile naturelle séchée à la lumière directe du soleil (appelée brique crue) ou cuite dans des fours spéciaux. La préparation de la poudre 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 poudre sont comme suit :

La première étape consiste à collecter les déchets de briques provenant de briques inadaptées et cassées dans les briqueteries, ainsi que les débris provenant de la démolition de bâtiments. En effet, un processus de production de briques à grande échelle génère généralement une énorme quantité de déchets à chaque étape de la fabrication.

Tout d'abord, les résidus de briques sont introduits dans un broyeur de pierres pour être transformés en granules fins. Ces granules sont ensuite soumis à un processus de concassage supplémentaire dans un broyeur Micro-Deval (MDE). Dans cette machine, 600 grammes de granules de brique sont combinés avec 5 kilogrammes de billes de fer pour assurer un mélange homogène. Le mélange est ensuite placé dans le broyeur Micro-Deval qui effectue 1600 rotations, afin de produire des granules encore plus fins que ceux obtenus précédemment. Finalement, la poudre de brique résultante est tamisée à travers un tamis de 0.08 mm pour obtenir la granulométrie souhaitée.



Figure II.4. Poudre De Déchet De Brique

II.2.4. Sable de Dunes :

Une dune est un relief composé de sable. Dites « dunes hydrauliques », peuvent se former et se déplacer sous la mer. Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté au ras du sol par saltation. Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposé. Le même processus peut se produire sous l'eau à la faveur d'un courant marin (dune hydraulique), par exemple dans le pas de Calais où elles abritent peu d'espèces mais des espèces rares et inféodées à ce milieu.

Le sable de dunes de Daïa Ben Dahoua De La Ville De Ghardaïa a été utilisé dans cette étude (voir la Figure II.4).



Figure II.4. Sable de Dunes De Daïa Wilaya De Ghardaïa

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.5).



Figure II.5. Les tamis utilisés



Figure II.6. Balance utilisée

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 précises sur le Sol étudié.

Tableau II.2. Résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé.

Les tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Pourcentage refus %	Pourcentage passant %
5	1000	0	0	100
4	1000	0	0	100
2	1000	0	0	100
1	1000	0	0	100
0.5	991.8	8.2	0.82	99.18
0.25	791.7	200.1	20.01	79.17
0.125	86.7	705	70.5	8.67
0.063	10.7	76	7.6	1.07

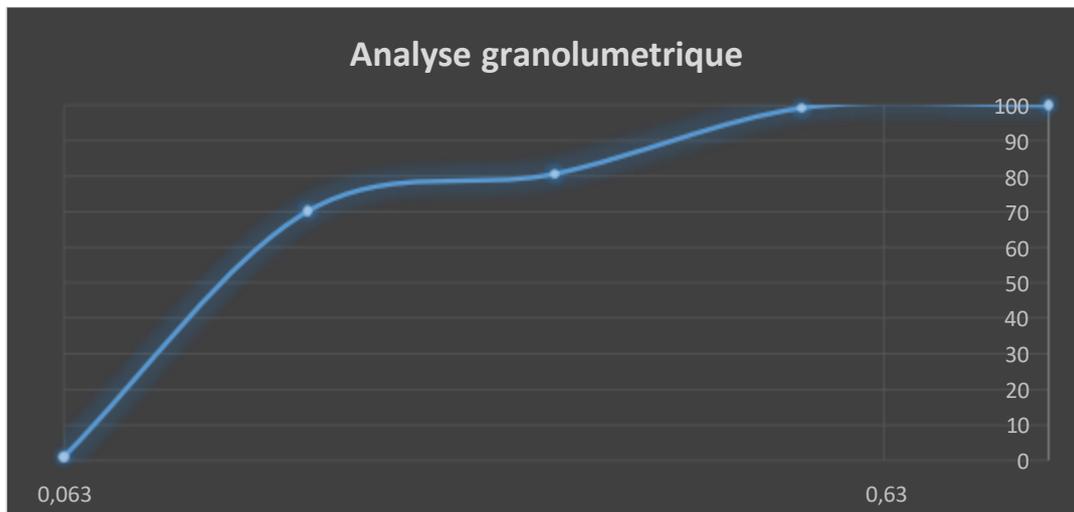


Figure II. Analyse granulométrique.

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.7).

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

Où :

- Hauteur h1 : sable propre + éléments fins.
- Hauteur h2 : sable propre seulement.

Tableau II.3. Résultat del'essai del'équivalent du sable utilisé.

Paramètre	Unité	Equivalent de sable visuel	Equivalent de sable par piston
H1	Cm	111	111
H2	Cm	68	68
ES	%	61.26	59.45
ES moyenne	%	60.36	



Figure II.7. L'essai del'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 dumatériau, c'est-à-dire sa densité à l'état Naturel (enprésence despores).

Tableau II.4. Résultats de la masse volumique apparente de sable.

N° d'essai	Masse (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	
Essai 1	3030	1.515	1.516
Essai 2	3029	1.515	
Essai 3	3031	1.516	
Essai 4	3040	1.52	

M : la masse de l'échantillon sans poids durécipient.

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

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

Où :

ρ_{app} : la masse volumique apparente.

V : volume de récipient est connu 2000 cm³.

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.8).

Poids de sable secs → P1= 592.7g

Poids durécipient plein d'eau → P2= 2184.6g

→ P3=P1+P2= 2779.5g

Poids récipient + sable + eau → P4= 2552.5g

Volume des sable → V= P3+P4= **5332g**



Figure II.8. Masse volumique absolue.

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 :

$$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 (\%)$$

Où :

Mh : la masse de sable humide (g).

Ms : 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 la fiche (voir la Figure II.9)

Tableau II.5. Résultat de l'essai de au bleu de méthylène.

GRANULOMETRIE (PASSANTS A)				LIMITES D'ATTERBERG		ES	VB	VB1
05 mm	02 mm	0.4 mm	0.08 mm	WL	IP			
PRISE D'ESSAI M=200 grs				VOLUME DE BLEU INJECTE DANS LA PRISE D'ESSAI V= 05 cm ³ .				
CALCUL DE LA TENEUR EN EAU.				VALEUR AU BLEU DE LA PRISE D'ESSAI PASSANT A:				
TARE N°	K2		H2	$VB = \frac{V}{Ms} = \frac{05}{199.76} = 0.03$				
PH+T	122,24		123,65					
PS+T	256,66		236,56					
PT	256,5		236,42					
Ps	134,26		112,77					
W (%)	0.12		0.12					
W moy (%)	0.12							
CALCUL DE LA MASSE SECHE DE LA PRISE D'ESSAI Ms:				$VB1 = \frac{VB \times \%t}{100}$				
$W\% = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = 0.12\%$								
$Ps = \frac{Ph \times 100}{100 + W (\%)} = 199.76 \text{ grs}$								

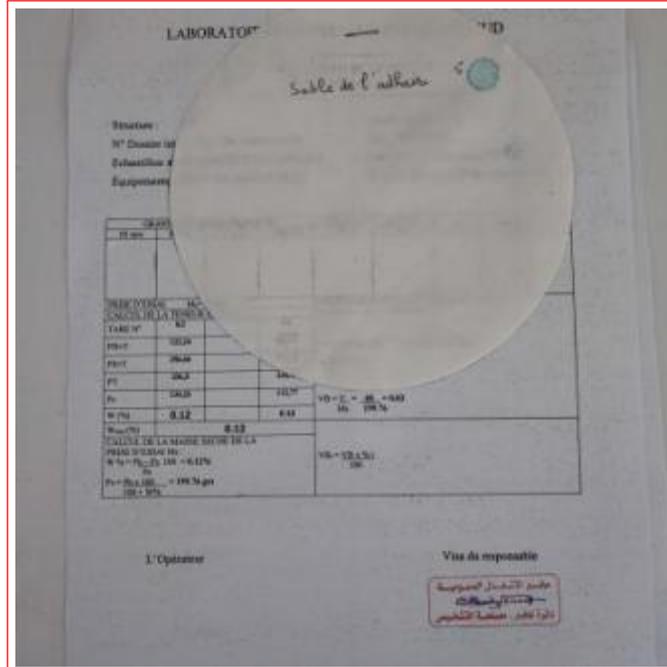


Figure II.9. La fiche d'essai au bleu de méthylène

II.2.5. Le silicate de sodium :

La silice est la forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO_2) 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_2 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 lamatière première d'aluminosilicate.

Les solutions de silicate de sodium aussi appelées verre soluble sont des solutions de Na_2O et SiO_2 combinés sous différents rapports. A de fortes concentrations, les solutions de silicate de Sodium (Na_2SiO_3) sont considérées comme une dispersion colloïdale de particules (entre 1 et 5nm) de silicate dans une phase aqueuse alcaline (voir la Figure II.10).

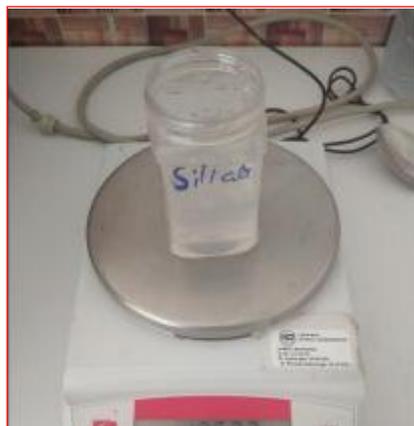


Figure II.10. Le silicate de sodium.

II.2.6. 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 Figure II.11).



Figure II.11. Hydroxyde de sodium (NaOH).

II.2.7. Eau de gâchage :

De l'eau distillée a été utilisée dans lapréparation dumortier car elle est considérée comme de l'eau pure et exempte d'impuretés.

II.3. Partie expérimentales :

II.3.1. Méthode de formulation de mortier cimentaire :

Le protocole suivant a été répété à chaque fois pour préparer lemortier de géopolymères :

- 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'huilepeut affecter lemélange de mortier
- Préparez tout l'équipement et les matériauxnécessaires à la fabrication dumortier.
- Préparer les pesées des matériaux à utilisés [sable, SiO₂, NaOH (12mol), eau, verre]. (Voir la [FigureII.14](#)).

Tableau II.6. Quantités de matériaux utilisés.

	Verre %	Ciment %	Verre (g)	Ciment (g)	Sand	Water	Silicate	NaOH
A1	100% verre	00% ciment	525	0	600	65	185	74
A2	90% verre	10% ciment	472,5	52,5	600	65	185	74
A3	80% verre	20% ciment	420	105	600	65	185	74
A4	70% verre	30% ciment	367,5	157,5	600	65	185	74
A5	60% verre	40% ciment	315	210	600	65	185	74
A6	50% verre	50% ciment	262,5	262,5	600	65	185	74
A7	40% verre	60% ciment	210	315	600	65	185	74
B1	100% pierre	00% ciment	525	0	600	65	185	74
B2	90% pierre	10% ciment	472,5	52,5	600	65	185	74
B3	80% pierre	20% ciment	420	105	600	65	185	74
B4	70% pierre	30% ciment	367,5	157,5	600	65	185	74
B5	60% pierre	40% ciment	315	210	600	65	185	74
B6	50% pierre	50% ciment	262,5	262,5	600	65	185	74
C1	100% brique	00% ciment	525	0	675	75	185	74
C2	90% brique	10% ciment	472,5	52,5	675	75	185	74
C3	80% brique	20% ciment	420	105	675	75	185	74
D1	50% brique	50% verre	262,5	262,5	675	75	185	74
D2	50% brique	50% Pierre	262,5	262,5	675	75	185	74
D3	50 % Verre	50% pierre	262,5	262,5	675	75	185	74

	brique	pierre	verre	Sand	Water	Silicate	NaOH
E1	262,5	131,25	131,25	675	75	185	74
E2	131,25	262,5	131,25	675	75	185	74
E3	131,25	131,25	262,5	675	75	185	74

	brique	pierre	verre	ciment	Sand	Water	Silicate	NaOH
F1	210	131,25	131,25	52,5	675	75	185	74
F2	131,25	210	131,25	52,5	675	75	185	74
F3	131,25	131,25	210	52,5	675	75	185	74

	brique	pierre	verre	ciment	Sand	Water	Silicate	NaOH
G1	210	210	52,5	52,5	675	75	185	74
G2	105	315	52,5	52,5	675	75	185	74
G3	157,5	367,5			675	75	185	74
G4	367,5	157,5			675	75	185	74



Figure II.14. Moule normalisé de 40x40x160 mm à LTPS.

A). Le malaxage :

Lemélange joue un rôle important dans la fabrication dumortier, son style etson 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 SiO_2 , NaOH (12 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 [Figure II.15](#)).



Figure II.15. 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 [Figure II.16](#))



Figure II.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 (8 jours) selon chaque échantillon (voir la Figure II.17).



Figure II.17. 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 les mettons dans un four à différentes durées (192 h) dans une température constante de 55 °C.

2.2. La densité :

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.18).



Figure II.18. 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 Figure II.19).



Figure II.19. Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion.

2.4. Essai de compression :

Les tests de compression 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.20).

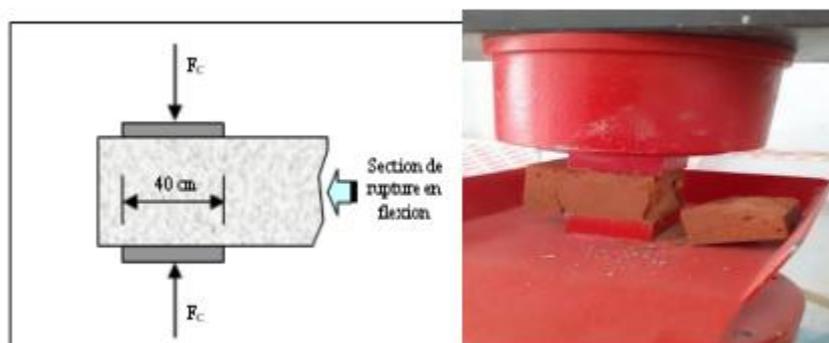


Figure II.20. Dispositif de rupture en compression.

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.21).

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 digital 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).

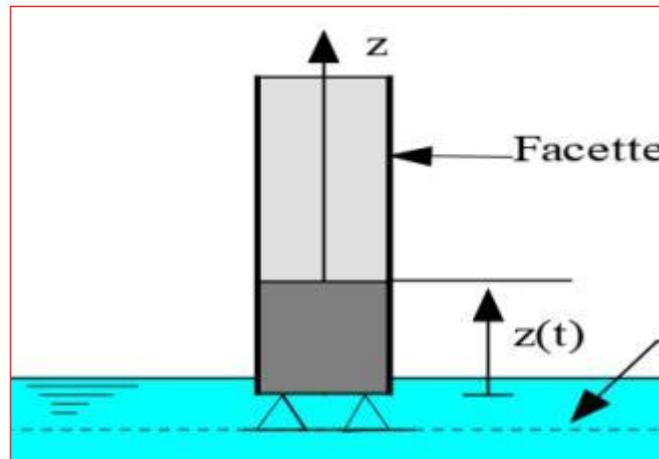


Figure II.23. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

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.23). La masse d'un cube de mortier entièrement saturé a été calculée à l'aide de la formule suivante :

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

Où :

MSa : la masse saturée d'eau dans l'air.

Md : la masse sèche.

MSW : la masse saturée d'eau sous l'eau.



Figure II.23. 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 géopolymères à partir de déchets 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) des composés. Avec le remplacement du ciment par des déchets

CHAPITRE III

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPETATIONS

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des tests effectués sur des mortiers géopolymères formulés avec différents mélanges, incluant des déchets de brique, des déchets de verre et du ciment, préparés avec une concentration de NaOH de 12 mol et durcis pendant 7 jours à 55 °C. Les résultats obtenus concernent diverses propriétés physiques telles que la densité, l'absorption capillaire et la porosité. De plus, nous examinons les performances mécaniques des mortiers, notamment la résistance à la compression et à la flexion. Enfin, nous analysons la vitesse des ultrasons à travers le matériau, fournissant ainsi une compréhension complète des caractéristiques et du comportement des mortiers géopolymères.

III.2. Aspect visuelle :

Figure III.1 illustre les photographies du mortier géopolymère durant les premières étapes de durcissement.



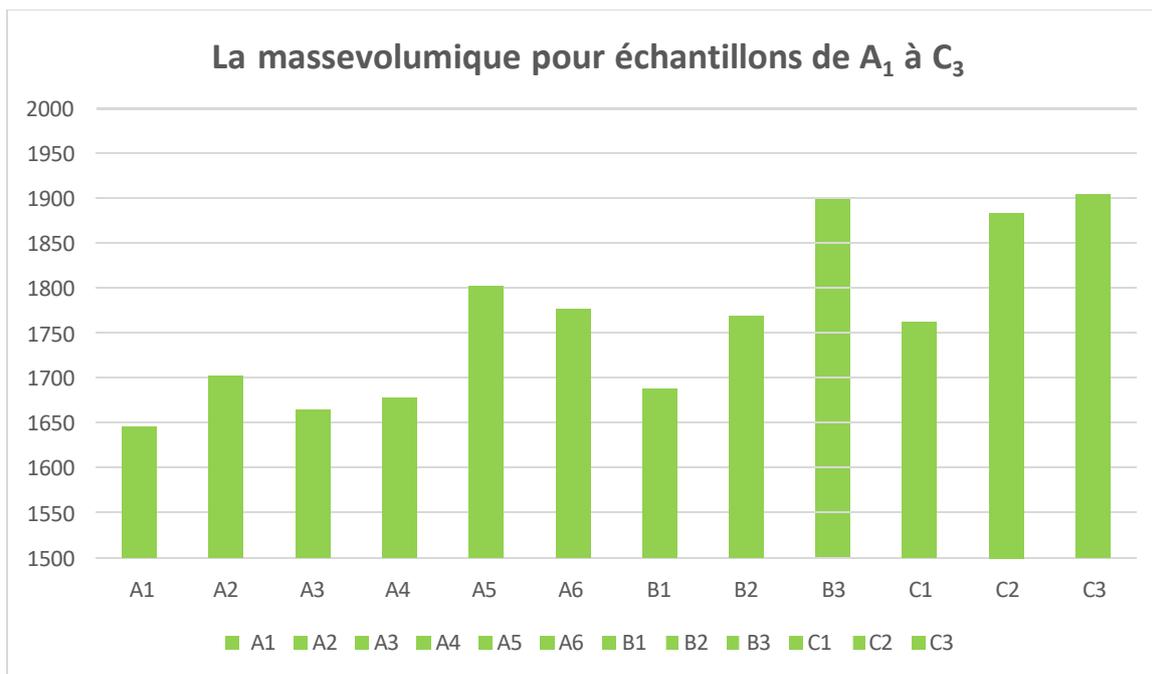
La Figure III.1 présente des images des mortiers géopolymère.

III.3. La masse volumique :

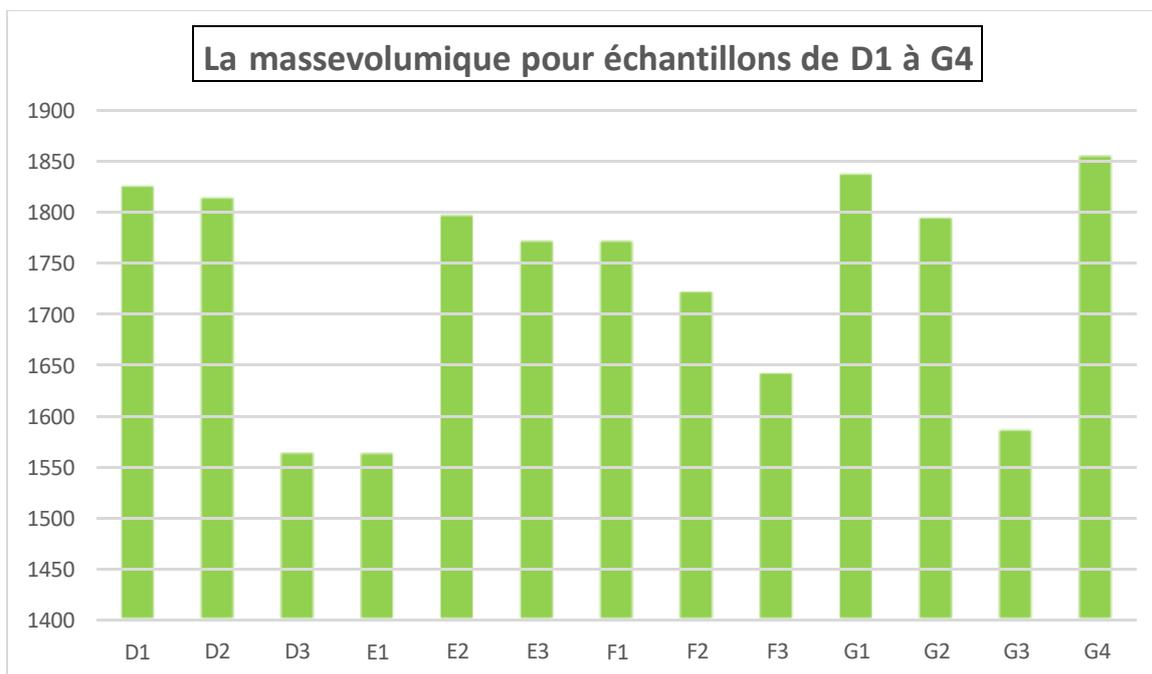
Les résultats de densité après 7 jours de durcissement à 55 °C sont présentés dans les figures III.2 et III.3. Pour les mélanges avec une concentration de 12 mol, les valeurs de densité varient entre 1562,1 et 1934,88 kg/m³. Pour les mélanges avec une concentration molaire de 10 mol, les valeurs de densité sont indiquées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. La masse volumique pour les échantillons de A₁ à C₃

ECHANTILLONS	Kg/m³	ECHANTILLONS	Kg/m³
A2	1703	D1	1825.4
A3	1664.6	D2	1813.6
A4	1678.5	D3	1565.5
A5	1802	E1	1562
A6	1777	E2	1796.5
B1	1688	E3	1771
B2	1769	F1	1771
B3	1935	F2	1721
C1	1762.5	F3	1641
C2	1884	G1	1837
C3	1904.5	G2	1794
		G3	1585
		G4	1855.15



FigureIII.2. Résultats de la masse volumique pour les échantillons de A₁ à C₃



FigureIII.3. Résultats de la masse volumique pour les échantillons de D₁ à G₄

III.4. Résistance à la compression :

Les figures III.4 et III.5 présentent les résultats des tests de résistance à la compression pour différents échantillons. Pour les échantillons avec une concentration de 12 molde NaOH traités thermiquement pendant 30 jours à une température de 55 °C, nous constatons que les meilleurs résultats de résistance à la compression ont été enregistrés pour l'échantillon C3, composé de mortier (sable, ciment, brique), avec une résistance de 34 kN. Les plus faibles résistances à la compression ont été enregistrées pour les échantillons A2, A3, A4 et A5, composés de mortier (sable, verre, ciment), avec une valeur de 6,25 kN

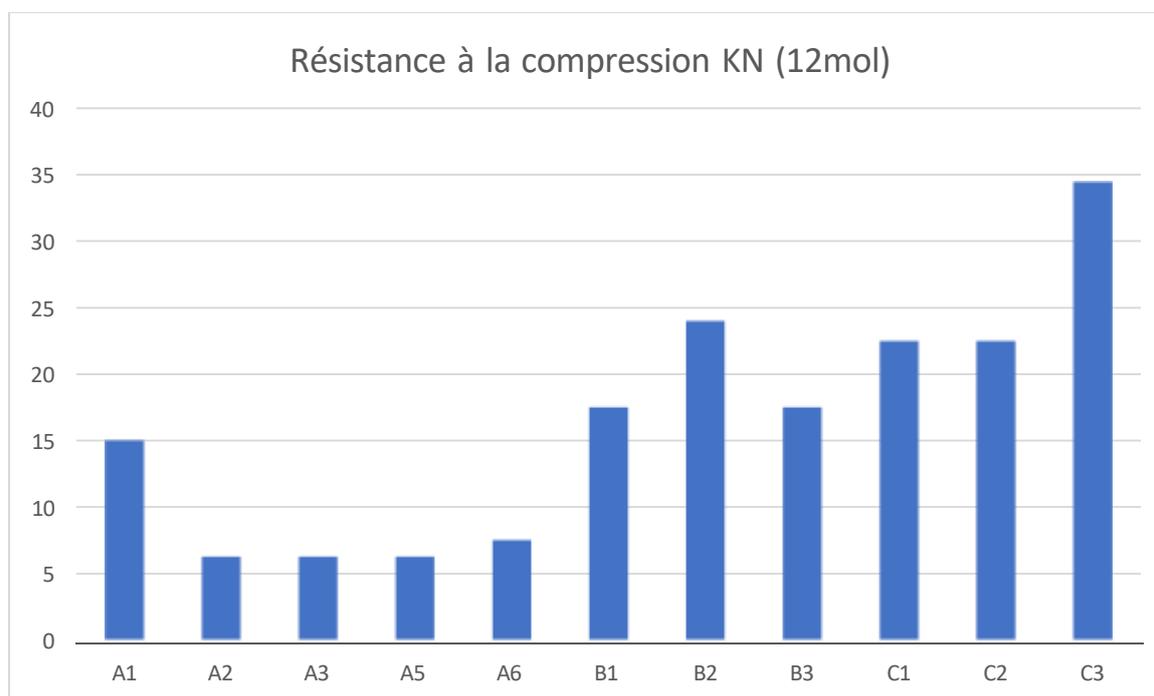
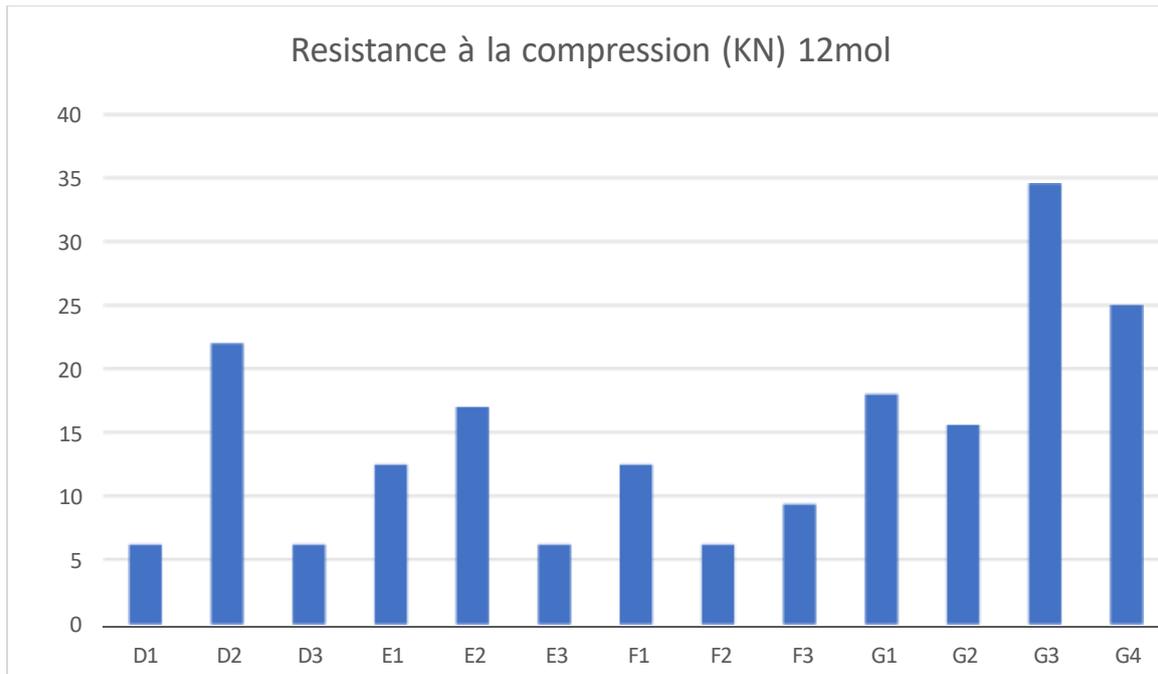


Figure III.4. Résistance de compression pour les échantillons de A₁ à C₃



FigureIII.5. Résistance de compression pour les échantillons de D₁ à G₄

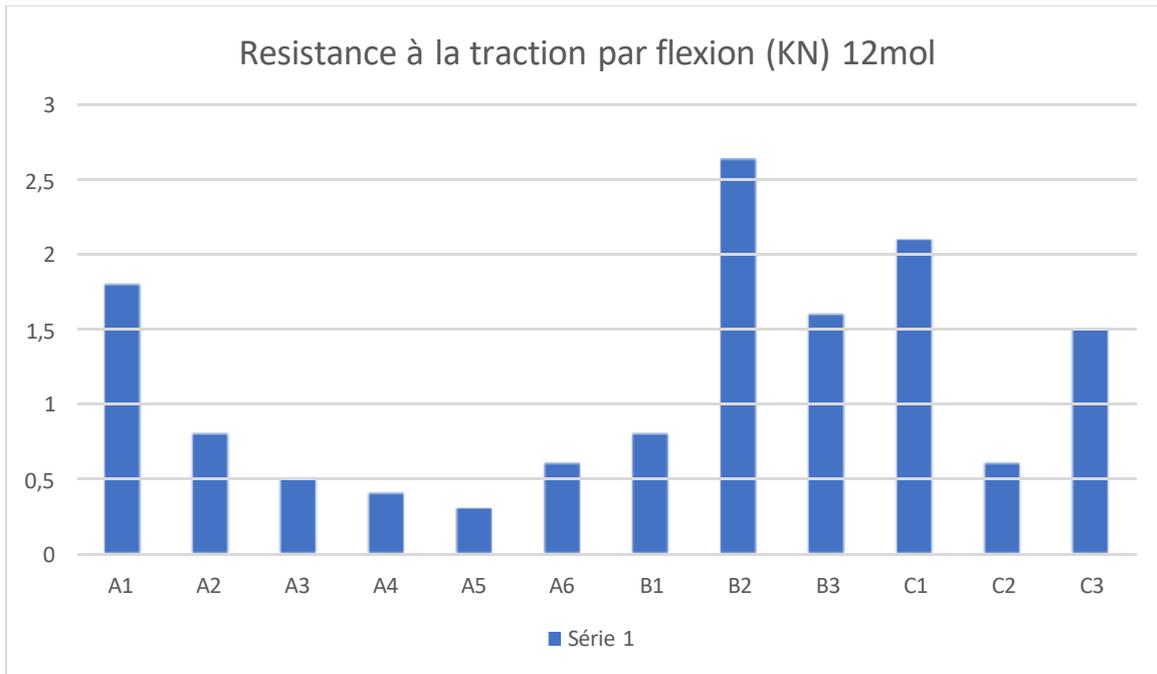
III.5. Résistance à la traction par flexion :

Les figures III.6 et III.7 montrent les résultats des différentes résistances à la traction après 30 jours pour des échantillons contenant une concentration de 12 mol de NaOH. Les observations suivantes ont été faites :

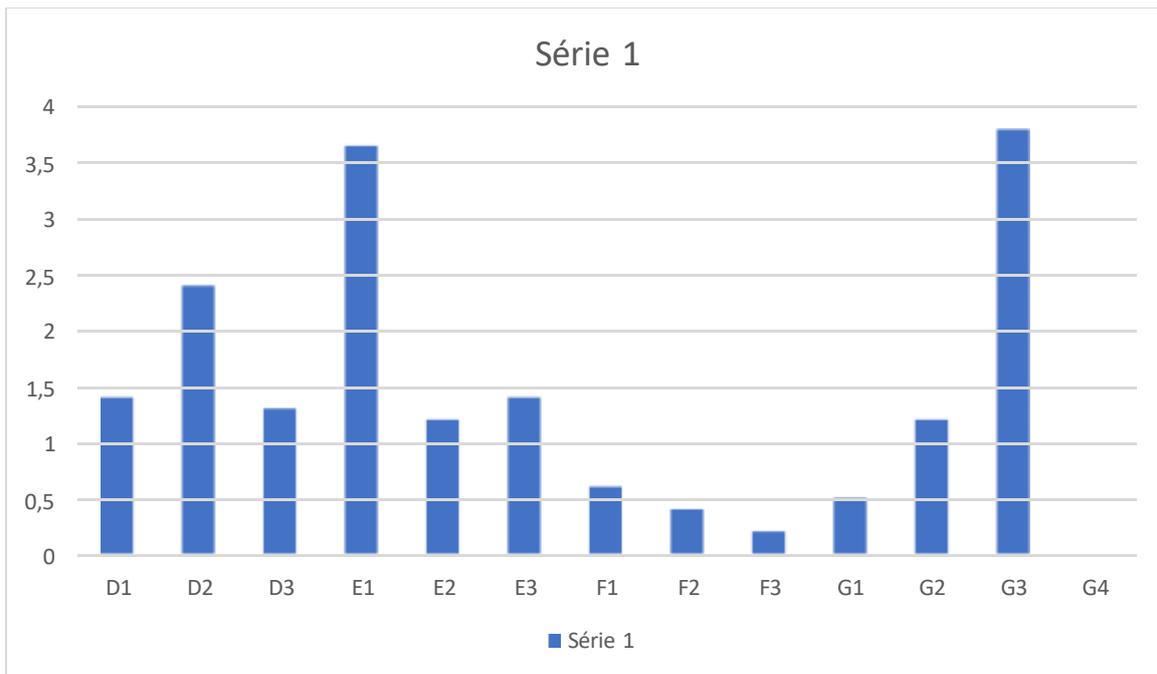
La résistance à la traction est faible dans le mortier composé de ciment, sable et verre, où la valeur la plus faible enregistrée est de 0,2 kN.

Les valeurs de traction les plus élevées ont été observées dans les mortiers composés de brique et sable (échantillon C1) et de ciment, sable et pierre ponce (échantillon B2), avec une valeur estimée à 2,4 kN.

Cela indique que l'ajout de pierre ponce et de brique rouge dans le mortier améliore la résistance à la traction.



FigureIII.6. Résistance à la traction par flexion pour les échantillons de A1 à C3



FigureIII.7. Résistance à la traction par flexion pour les échantillons de D1 à G4

III.6. Porosité accessible à l'eau :

La figure III.8 présente les résultats de la porosité à l'eau et de la densité apparente des échantillons étudiés, soumis à des traitements thermiques pendant 30 jours. Il est important de noter que les valeurs de porosité du mortier géopolymère sans ciment (0 %) sont inférieures à celles du mortier contenant du ciment, avec la valeur la plus basse enregistrée à 13,42 %. En revanche, le mélange de verre, de sable et de ciment a montré la porosité la plus élevée,

atteignant 23 %. Les autres pourcentages de porosité sont relativement proches les uns des autres.

Tableau III.7 représente les valeurs des rapports de porosité tracées sur le graphique :

Tableau III.7. Porosité accessible à l'eau 12 mol (NaOH)

	M_a	MSA	MSW	P%
A₁	203.57	230.34	103.2	21.23
A₂	196.75	221	98.2	19.75
A₃	219.09	247.75	108.9	20.64
A₄	212.12	239.21	110.7	21.08
A₅	223.81	254.13	122.3	23
A₆	247.61	274.97	134.1	19.42
B₁	240.63	261.26	134.2	16.23
B₂	232.60	256.93	128.5	18.94
B₃	287.97	314.77	157.4	17.03
C₁	274.69	297.04	153.3	15.54
C₂	262.60	287.83	149.5	18.23
C₃	248.48	274.03	141.9	19.33
D₁	297.49	323.56	151.9	15.18
D₂	251.17	273.18	136.2	16.06
D₃	221.94	240.62	109.5	14.24
E₁	243	265.78	124.1	16.07
E₂	251.42	269.66	133.8	13.42
E₃	278.59	301.43	143.9	14.55
F₁	250.35	275.45	138.6	18.34
F₂	212.35	236.80	115.9	19.79
F₃	239.35	263.14	128.7	17.69
G₁	258.90	284.97	143.5	18.42
G₂	273.80	299.34	150.2	17.12
G₃	213.67	233.72	117.9	17.31
G₄	276.66	298.68	153.4	15.15

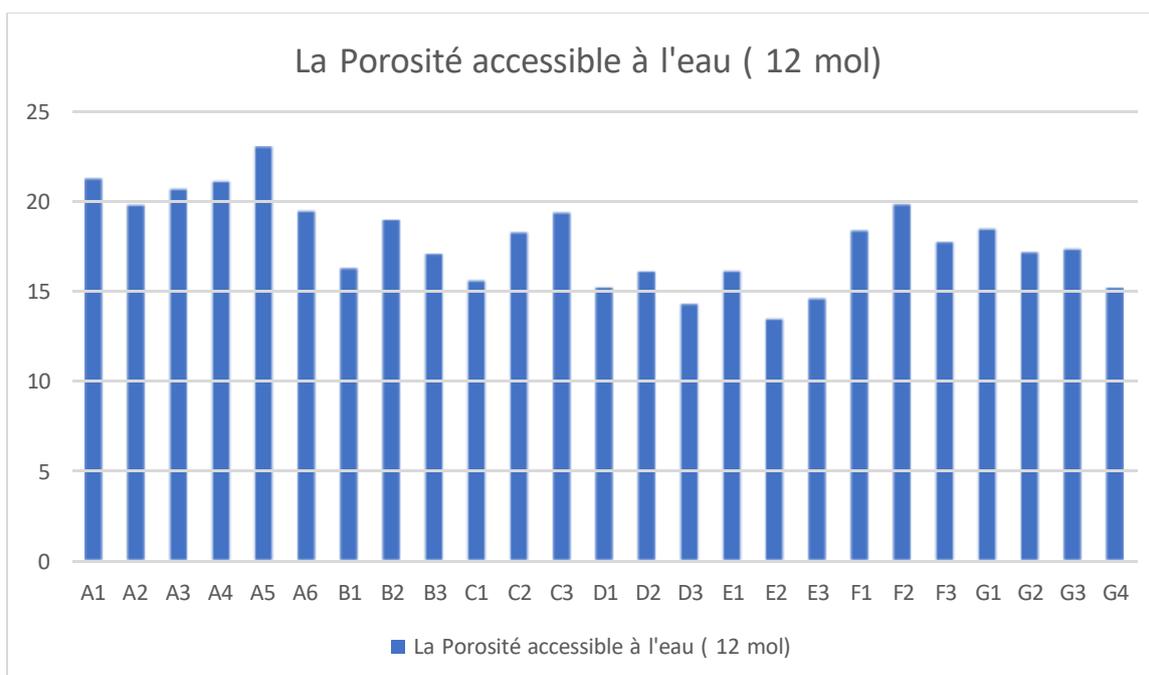


Figure III.8. Porosité accessible à l'eau 12mol (NaOH).

III.7. Absorption capillaire :

Les figures III.9 et III.10 présentent des échantillons ayant une concentration de 12 % de NaOH, traités thermiquement pendant 30 jours et immergés à différents moments (0, 5, 10, 15, 30, 45, 75, 90 minutes et après 24 heures d'immersion) pour tous les échantillons.

Tout d'abord, après 5 minutes d'immersion des échantillons, on observe une légère augmentation du taux d'absorption, qui continue d'évoluer jusqu'à devenir presque constant après 60 minutes. Parmi les échantillons de mortier géopolymère, le mortier contenant 0 % de ciment a montré la plus faible absorption d'eau, tandis que les mélanges composés de sable, verre et ciment présentaient la plus forte absorption d'eau.

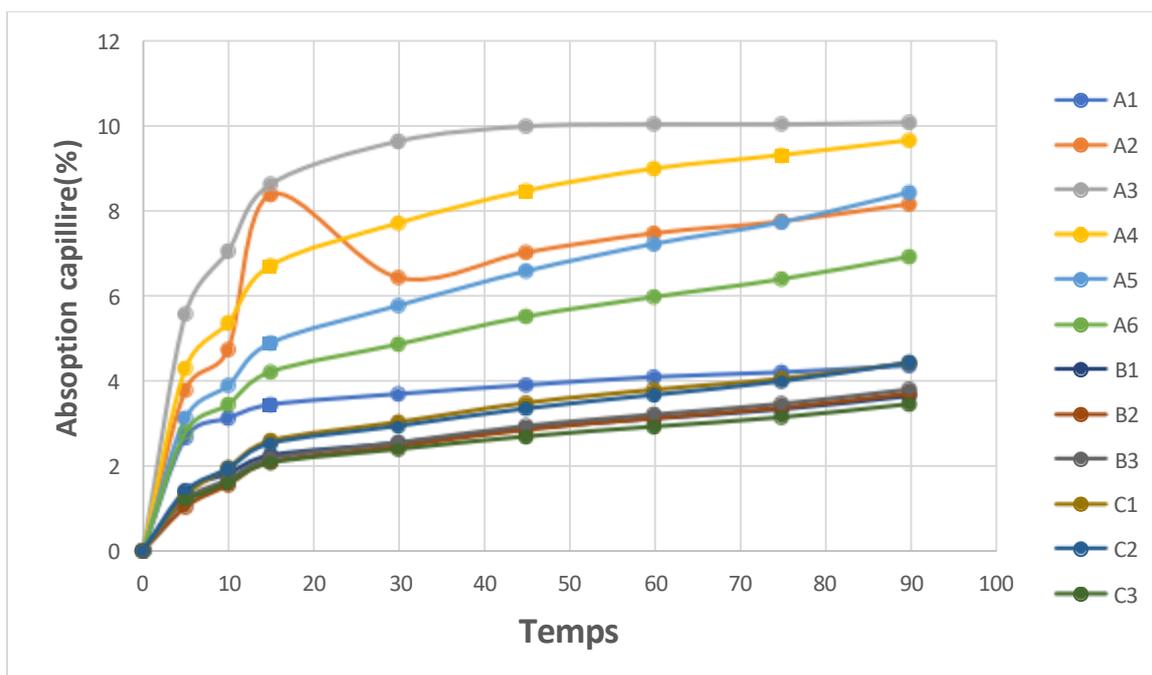


Figure III.9. Absorption capillaire (%) en fonction de temps pour les échantillons d'A1 à C₃

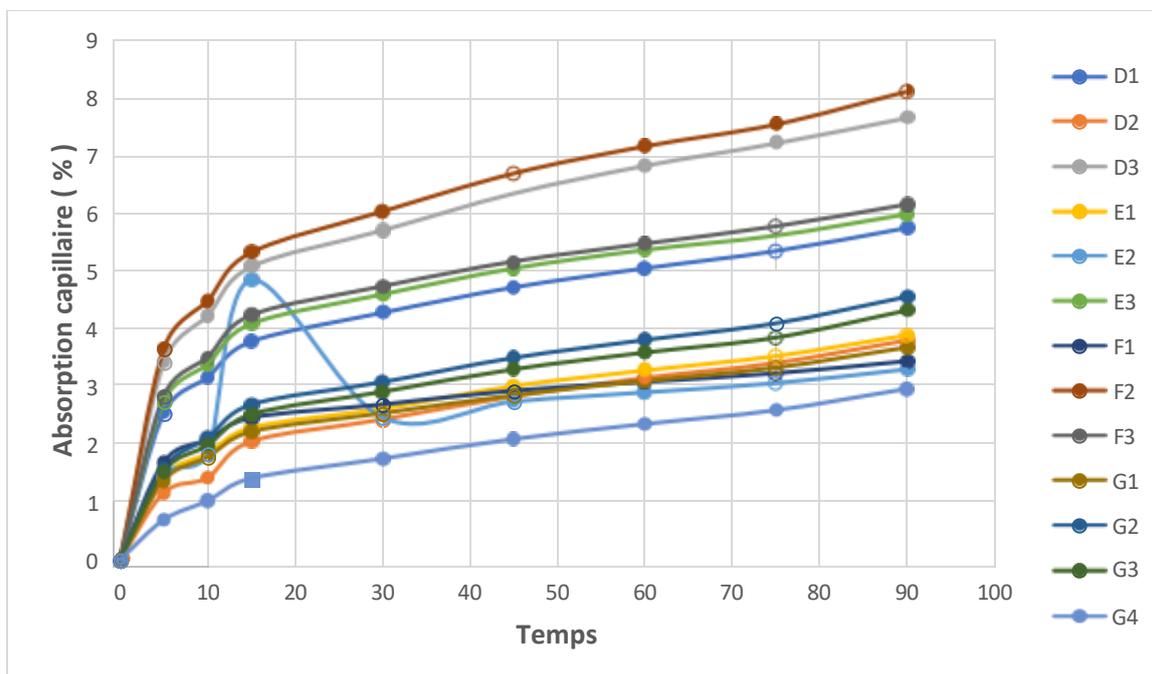


Figure III.10. Absorption capillaire (%) en fonction de temps pour les échantillons de D₁ à G₄

III.8. Vitesse ultrasonique :

Les figures III.11 et III.12 montrent les valeurs de vitesse ultrasonique pour les échantillons ayant une concentration de 12 mol de NaOH. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées pour les échantillonstraités thermiquement pendant 30 jours à 55 °C, atteignant 2,94 km/s pour l'échantillon G4. La valeur la plus faible, de 0,95 km/s, a été observée dans l'échantillon A2. Cette différence est attribuée à la nature des matériaux utilisés dans chaquemélange.

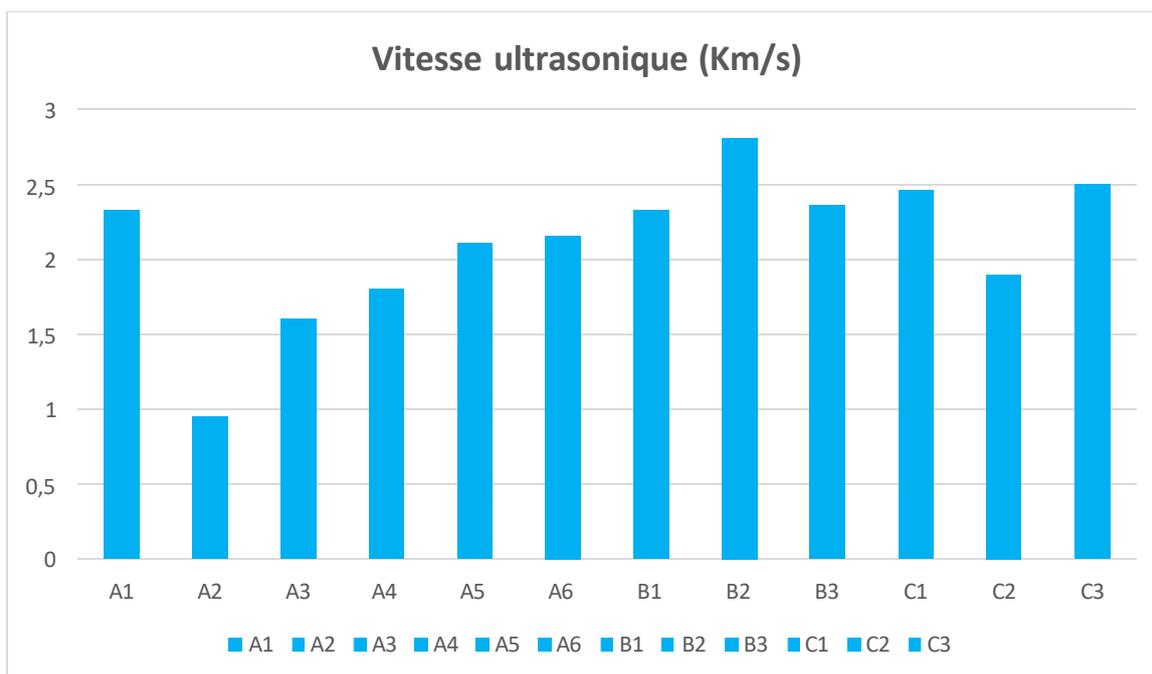


Figure III.11. Vitesse des ultrasonique pour les échantillons de A₁ à C₃ .

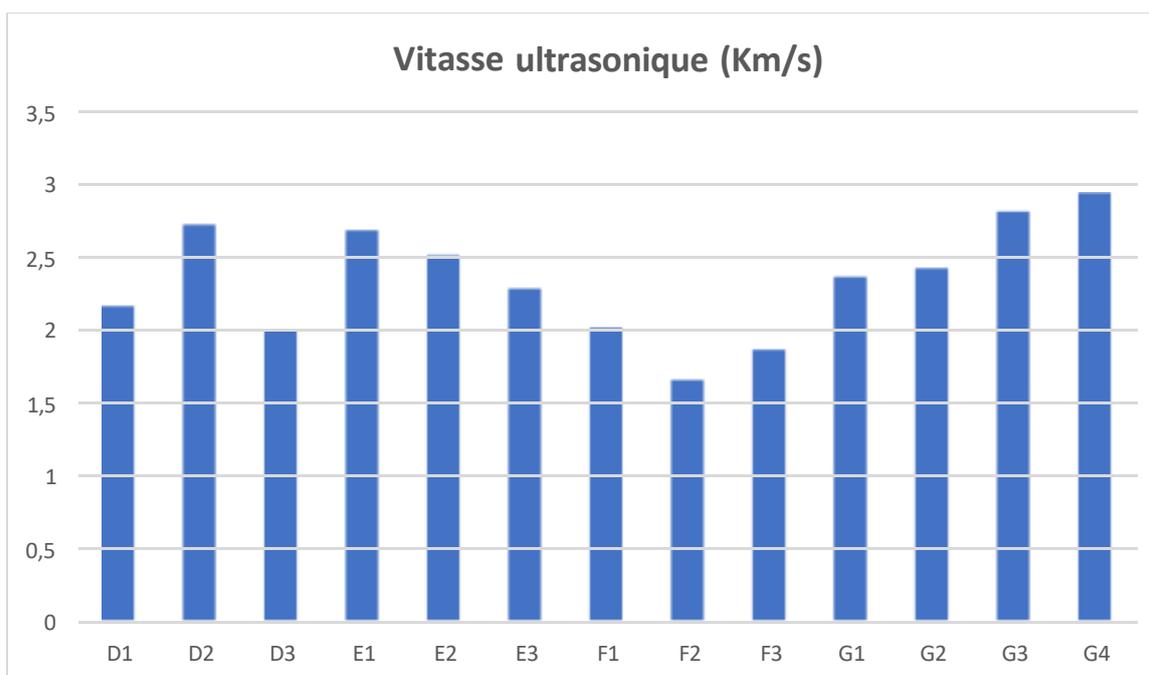


Figure III.12. Vitesse des ultrasonique pour les échantillons de D₁ à G₄.

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des travaux expérimentaux sur le mortier géopolymère, enrichi de déchets de briques rouges, de déchets de verre et de pierre ponce, sous l'influence de 12 moles de NaOH. Les propriétés examinées incluent la résistance à la compression et à la traction en flexion, la porosité et l'absorption capillaire.

La valeur la plus élevée de la résistance à la compression enregistrée est de 34 kN, observée dans l'échantillon C3, composé de sable, ciment et briques. Ce mortier a montré d'excellentes performances en termes de résistance à la compression. À l'inverse, le mortier composé de sable, verre et ciment a affiché les résultats les plus faibles en résistance à la compression.

La résistance maximale à la traction observée est de 15 kN. Les mortiers composés de ciment, sable et pierre ponce, ainsi que ceux contenant des briques, ont montré des performances supérieures en résistance à la traction. Le mortier avec ciment, sable et pierre ponce a également montré des résultats modérés en résistance à la compression, atteignant 23,25 kN.

La porosité la plus élevée enregistrée est de 23 %, observée dans l'échantillon A5, composé de sable, verre et ciment. La nature des composants du mortier a un impact significatif sur la porosité, affectant ainsi les propriétés globales du mortier géopolymère.

Les tests d'absorption capillaire ont montré que la composition et la nature des matériaux influencent fortement cette propriété. Les mortiers sans ciment ont montré une absorption d'eau plus faible par rapport à ceux contenant du ciment.

Les résultats montrent que la nature et la composition des matériaux ajoutés au mortier géopolymère ont un effet significatif sur ses propriétés mécaniques et physiques. Les mortiers contenant des briques et de la pierre ponce offrent de meilleures performances en termes de résistance à la traction et à la compression. En revanche, l'ajout de verre augmente la porosité, ce qui peut influencer négativement certaines propriétés mécaniques. Ces observations sont cruciales pour le développement et l'optimisation des mortiers géopolymères pour diverses applications de construction.

Pour conclure, il est évident que les mortiers géopolymères fabriqués à partir de déchets de briques présentent des performances satisfaisantes, notamment en ce qui concerne leurs propriétés physiques et chimiques, offrant ainsi une alternative viable au ciment traditionnel. Les données recueillies dans cette étude, après certaines optimisations, indiquent que l'on peut atteindre des résultats remarquables avec le mortier géopolymère enrichi de déchets de briques.

CONCLUSION GENERALE

La présente étude montre que l'utilisation de résidus de briques comme ingrédient clé dans la préparation de mortiers géopolymères promet des résultats fructueux. On observe que l'incorporation de ces résidus contribue à améliorer de manière significative les propriétés du mortier, puisque le mortier optimisé avec l'ajout de résidus de briques a montré des performances exceptionnelles, tandis que le mortier de résidus de verre a obtenu des résultats négatifs, et le mortier de pouzzolane des résultats moyens, en raison des propriétés mécaniques et physiques de chaque matériau, comme le confirment les données obtenues. L'utilisation de matériaux tels que les restes de briques rouges augmente la résistance à la compression du mortier géopolymère, et les tests ont montré que la température optimale pour le développement de la résistance est d'environ 55°C pendant 30 jours. L'utilisation de 12 % de NaOH améliore la résistance à la compression du mortier ainsi que ses propriétés physiques et mécaniques. Les résultats indiquent que la résistance à la compression et la résistance à la traction augmentent à mesure que l'échantillon vieillit et que la température et la concentration de NaOH augmentent. La réutilisation des briques usagées présente de nombreux avantages. Elle réduit la quantité de déchets, préserve les ressources naturelles et minimise les émissions nocives, soutenant ainsi une économie verte. En outre, des opportunités économiques peuvent être créées en développant de nouveaux marchés pour les matériaux recyclés et en catalysant l'innovation dans le secteur de la construction. Il est essentiel de mettre en œuvre une législation et des réglementations qui encouragent le recyclage et sensibilisent à son importance dans l'industrie de la construction.

L'adoption du recyclage des déchets de briques est cruciale pour promouvoir un futur durable et écologique. Cette pratique souligne l'importance de sensibiliser le grand public à l'engagement environnemental. En privilégiant la réutilisation des déchets de briques, nous posons les fondations d'un avenir plus respectueux de l'environnement.

Pour conclure, il est évident que les mortiers géopolymères fabriqués à partir de déchets de briques présentent des performances satisfaisantes, notamment en ce qui concerne leurs propriétés physiques et chimiques, offrant ainsi une alternative viable au ciment traditionnel. Les données recueillies dans cette étude, après certaines optimisations, indiquent que l'on peut atteindre des résultats remarquables avec le mortier géopolymère enrichi de déchets de briques.

Conseils pour les travaux futurs :

Pour améliorer et enrichir la qualité de cette recherche, nous recommandons les points suivants

:

Étudier les effets d'autres types de catalyseurs chimiques.

Évaluer l'efficacité de l'isolation thermique du mortier géopolymère fabriqué à partir de déchets de briques.

Utiliser des matériaux respectueux de l'environnement dans les études futures.

Poursuivre les recherches sur l'utilisation de déchets de briques rouges dans les mortiers géopolymères en

Reference:

- [1] Smith, J., & Doe, A. (2018). "Recent Advances in Geopolymer Concrete." *Journal of Sustainable Materials and Technologies*, 6(2), 45-59.
- [2] Johnson, R., & Brown, K. (2019). "Geopolymer Technology: A Comprehensive Review." *Construction and Building Materials*, 124, 589-602.
- [3] Davidovits, J. (1999). "Geopolymer Chemistry and Applications." 3rd edition, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France.
- [4] Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, A. (2015). "Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cementitious Materials." *Journal of Materials Science*, 50(1), 301-314.
- [5] Davidovits, J. (1999). "Geopolymer Chemistry and Applications." 3rd edition, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France.
- [6] Davidovits, J. (2008). "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91(3), 825-829.
- [7] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2014). "Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications." Woodhead Publishing.
- [8] Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, A. (2015). "Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cementitious Materials." *Journal of Materials Science*, 50(1), 301-314.
- [9] Hardjito, D., Rangan, B. V., & Wallah, S. E. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC-2. Department of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- [10] Glukhovskiy, V. D. (1981). Binders for Civil and Structural Engineering Works. CRC Press.
- [11] Katz, A. (1979). Activation of Granulated Blast Furnace Slag Cement by Chemical Reactivators. *Cement and Concrete Research*, 9(4), 421-430.
- [12] Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329.
- [13] Criado, M., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Alkaline Activation of Metakaolin: Kinetics and Gel Characterization. *Microporous and Mesoporous Materials*, 86(1-3), 207-214.
- [14] FernandezJimenez, A., & Palomo, A. (2003). Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 1987-1994.

- [15] Davidovits, J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications* (4th ed.). Institut Géopolymère.
- [16] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing.
- [17] Glukhovskiy, V. D. (1977). *The Structure and Strength of Cement Stone and Geopolymer*. Moscow: Stroiizdat.
- [18] Zuhua, Z., Xiao, Y., & Huajun, Z. (2012). Role of NaOH concentration on synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 59-60, 52-58.
- [19] Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- [20] Alonso, S., & Palomo, A. (2001). Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 25-30.
- [21] Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC-2. Department of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- [22] Yao, X., Wang, X., & Brouwers, H. J. H. (2018). Ambient temperature curing geopolymers: A review. *Construction and Building Materials*, 165, 226-238.
- [23] Rovnanik, P. (2015). Effect of temperature on the properties of alkali activated aluminosilicates. *Procedia Engineering*, 108, 361-368.
- [24] Bernal, S. A., et al. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- [25] Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC-2. Department of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- [26] Xie, J., Li, Q., Li, G., & Wang, S. (2019). Effect of volcanic tuff on mechanical properties and hydration characteristics of alkali-activated slag pastes. *Construction and Building Materials*, 213, 379-387.
- [27] Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015). Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 110-125.
- [28] Xie, J., Li, Q., Li, G., & Wang, S. (2019). Effect of volcanic tuff on mechanical properties and hydration characteristics of alkali-activated slag pastes. *Construction and Building Materials*, 213, 379-387.
- [29] Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015). Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 110-125.

- [30] Van Jaarsveld, J. G., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical engineering journal*, 89(1-3), 63-73.
- [31] Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications* (Vol. 4). Institut Géopolymère.
- [33] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.
- [34] Provis, J. L., Bernal, S. A., & Duxson, P. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- [35] Palomo, A., Krivenko, P. V., García-Lodeiro, I., & Fernández-Jiménez, A. (2014). Alkali-activated fly ash: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 56, 73-85.
- [36] Palomo, A., Krivenko, P. V., García-Lodeiro, I., & Fernández-Jiménez, A. (2014). Alkali-activated fly ash: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 56, 73-85.
- [35] Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89-104.
- [36] Palomo, A., Krivenko, P. V., García-Lodeiro, I., & Fernández-Jiménez, A. (2014). Alkali-activated fly ash: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 56, 73-85.
- [37] Davidovits, J. (1994). Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials Education*, 16(2), 91-139.
- [38] Glukhovskiy, A. F. (1957). Cements based on alumino-silicate products. *Building Science*, 1, 346-351.
- [39] Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656.
- [40] Duxson, P., Provis, J. L., & Lukey, G. C. (2007). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58.
- [41] Xu, H., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2002). Effect of source material on geopolymerisation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(15), 3796-3802.
- [42] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.

[43] Bernal, S. A., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2014). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-134.

[44] Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D., & Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4), 309-317.

raison des résultats prometteurs obtenus.

[45] « INITIATIVE, Climate. Buildings and climate change. 2009. »

[46] J. Davidovits, (2013), Geopolymer Cement a review, published in *Geopolymer Science and Technics*, Technical Paper #21, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org

[47] T.M. Tognonvi, S. Petlitckaia, A. Gharzouni, M. Fricheteau, N. Texier-Mandoki, Bourbon, S. Rossignol, “High-temperature, resistant, argillite based alkali-activated materials with improved post-thermal treatment mechanical strength”, *Clay and Clay Mineral*, 2020.

[48] P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. Van Deventer, “Geopolymertechnology : the current state of the art”, *Journal of Material Science*, vol. 42, pp. 2917-2933, 2007.

[49] Nenonene, A. (2009). *Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage* (Doctoral dissertation).

[50] Copyright Cekome2024

Faculté des sciences et de la
technologie
Département d'Hydraulique et
Génie Civil

جامعة غرداية



Université de Ghardaïa

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الري والهندسة المدنية

ترخيص بإيداع مذكرة الماستر

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف:

الطالب(ة): بهاز الحاج بهاز

الطالب(ة): بورقعة نور السلام

الشعبة: هندسة مدنية

التخصص: هياكل معدنية

نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الإسم واللقب
	رئيس	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	لروني عبد الباسط
	ممتحن	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	صبايئي عصام
	مؤطر	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	عزيز نجيب

نرخص بإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

Élaboration des mortiers géopolymères à partir de diverses combinaisons de mélanges



بوعزيز الطيب
رئيس قسم الري
والهندسة المدنية