

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département Génie civil.*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Génie civil**

**Spécialité : Matériaux en génie civil**

Par

- **Abdessalam Bouchibi**
- **Wahid Benfredj.**

*Intitulé*

*Impact des fines recyclées sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers géopolymères*

*Soutenu le : 2 juillet 2023*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Benouadah Abdelatif</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Benammar Abdelhafid</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2022/2023*

## Remerciements

*Je tiens par la présente à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements Monsieur **Belkadi Ahmed abderraouf** pour votre encadrement précieux tout au long de la réalisation de mon mémoire de Master. Votre expertise, votre soutien et vos conseils avisés ont été inestimables pour mener à bien ce travail de recherche.*

*Je souhaite également remercier chaleureusement les membres du jury, Monsieur **Abdelatif Benouadah** et Monsieur **Abdelhafid Benammar**, pour leur disponibilité et leur précieuse contribution lors de l'évaluation de mon mémoire. Leurs remarques constructives et leurs recommandations m'ont permis d'améliorer la qualité de mon travail.*

*Je tiens également à exprimer ma gratitude à tout le personnel du laboratoire de matériaux en génie civil de l'Université de Bordj Bou Arreridj pour leur assistance technique et leur accueil chaleureux. Leur soutien logistique a grandement facilité la réalisation de mes expériences et de mes analyses.*

*Enfin, je tiens à remercier tous mes proches, ma famille et mes amis, pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur compréhension tout au long de cette expérience académique exigeante*

## Résumé

Depuis le début des années 2000, la société tente de limiter le réchauffement climatique et ses effets en trouvant de nouvelles solutions de production et de consommation plus respectueuses de l'environnement. L'industrie de la construction génère d'énormes quantités de déchets de béton lors de la démolition de structures existantes. Ce mémoire explore l'utilisation des fines recyclées de mortier, après traitement thermique, dans la production de géopolymères, en vue d'améliorer l'industrie de la construction. Les géopolymères sont des matériaux alternatifs prometteurs, offrant des performances comparables aux matériaux traditionnels tout en réduisant les déchets et les émissions de CO<sub>2</sub>. Un remplacement de 10% 20% et 30% de laitier par des fines recyclées a été effectué. Ainsi, les tests de résistance à la flexion, la résistance à la compression et l'absorption totale ont été examinées. Les résultats de l'étude démontrent que l'incorporation de ces fines recyclées de mortier dans les géopolymères présente des caractéristiques satisfaisantes (bonne résistance à la compression). Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les formulations et les procédés de fabrication. Cette approche favorise la durabilité et la circularité dans l'industrie de la construction, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles et à la réduction de l'impact environnemental.

**Mot clés :** Fines recyclées, Géopolymères, Traitement thermique.

## Abstract

Since the early 2000s, society has been attempting to limit climate change and its effects by finding new, more environmentally friendly solutions for production and consumption. The construction industry generates enormous quantities of concrete waste during the demolition of existing structures. This dissertation explores the use of thermally treated recycled mortar fines in the production of geopolymers, with the aim of improving the construction industry. Geopolymers are promising alternative materials that offer comparable performance to traditional materials while reducing waste and CO<sub>2</sub> emissions. Replacement of 10%, 20%, and 30% of slag with recycled fines was carried out. Thus, tests for flexural strength, compressive strength, and total absorption were examined. The results of the study demonstrate that the incorporation of these recycled mortar fines in geopolymers exhibits satisfactory characteristics (good compressive strength). However, further work is needed to optimize formulations and manufacturing processes. This approach promotes sustainability and circularity in the construction industry, thereby contributing to the preservation of natural resources and the reduction of environmental impact.

**Key words :** Recycled fines, Geopolymers, Thermal treatment.

## ملخص

منذ بداية الألفية الثالثة، تحاول المجتمعات الحد من تغير المناخ وتأثيراته عن طريق إيجاد حلول جديدة وأكثر صديقة للبيئة للإنتاج والاستهلاك. تولد صناعة البناء كميات هائلة من نفايات الخرسانة أثناء هدم الهياكل القائمة. تستكشف هذه المذكرة استخدام نفايات الملاط المعاد تدويرها والتي تم معالجتها حراريًا في إنتاج الجيوبوليمرات، بهدف تحسين صناعة البناء. الجيوبوليمرات هي مواد بديلة واعدة تقدم أداءً مقارنًا بالمواد التقليدية مع تقليل النفايات وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. تم تنفيذ استبدال 10%، 20% و30% من السليندر بنفايات معاد تدويرها. وبالتالي، تم فحص الاختبارات لقوة الانثناء وقوة الضغط والامتصاص الكلي. تظهر نتائج الدراسة أن إدماج نفايات الملاط المعاد تدويرها في الجيوبوليمرات يتمتع بخصائص مرضية (قوة ضغط جيدة). ومع ذلك، يتطلب العمل المستقبلي مزيدًا من الجهود لتحسين التراكيب وعمليات التصنيع. يعزز هذا النهج الاستدامة والدورة الدائرية في صناعة البناء، مما يساهم في الحفاظ على الموارد الطبيعية وتقليل التأثير البيئي.

**الكلمات المفتاحية:** الجيوبوليمرات، المعالجة الحرارية، النفايات المعاد تدويرها.

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	9
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères</b> .....	12
<b>I.1. Introduction</b> .....	12
<b>I.2. Historique</b> .....	12
<b>I.3. Définition des géopolymères</b> .....	13
<b>I.4. Différents types de géopolymère</b> .....	14
I.4.1. Géopolymère à base de laitier .....	14
I.4.2. Géopolymère à base de métakaolin.....	15
I.4.3. Ciment géopolymère à base de cendres volantes .....	15
<b>I.5. Microstructure du liant géopolymère à l'état durci</b> .....	16
<b>I.6. Formulation des géopolymères</b> .....	17
<b>I.7. Application des géopolymères</b> .....	18
<b>I.8. Avantages et inconvénients des géopolymère</b> .....	20
I.8.1. Avantages des géopolymères .....	20
I.8.2. Inconvénients des géopolymères.....	20
<b>I.9. Conclusion</b> .....	21
<b>CHAPITRE II : Les déchets dans les géopolymères</b> .....	23
<b>II.1. Introduction</b> .....	23
<b>II.2. Les déchets utilisés dans la fabrication des géopolymères</b> .....	23
II.2.1. Résidus industriels et sous-produits .....	23
II.2.2. Cendres volantes et autres déchets de combustion.....	24
II.2.3. Les déchets de construction et de démolition .....	25
<b>II.3. Performances techniques et propriétés des géopolymères avec déchets</b> .....	26
<b>II.4. Impact environnemental et durabilité des géopolymères avec déchets</b> .....	27
<b>II.5. Applications et perspectives</b> .....	29
II.5.1. Utilisation des géopolymères avec déchets dans l'industrie de la construction .....	29
II.5.2. Avancées récentes et projets de recherche en cours.....	29
<b>II.6. Conclusion</b> .....	30
<b>CHAPITRE III : Etude Expérimentale</b> .....	32
<b>III.1. Introduction</b> .....	32
<b>III.2. Sable</b> .....	32
<b>III.3. Activateurs</b> .....	33
<b>III.3.1. Silicate de sodium liquide</b> .....	33

<b>III.3.2. NaOH</b> .....	34
<i>III.3.2.1. Propriétés physiques</i> .....	34
<i>III.3.2.2. Propriétés chimiques</i> .....	35
<b>III.4. Laitier granulé de haut fourneau</b> .....	36
<b>III.3. Les fines traitées</b> .....	36
<b>III.5. Formulation des géopolymères</b> .....	37
<b>III.6. Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes</b> .....	38
III.6.1. Malaxage du mortier .....	38
III.6.2. Préparation des éprouvettes .....	39
III.6.3. Conservation.....	40
<b>III.7. Résistances mécaniques</b> .....	40
III.7.1. Résistance à la compression .....	40
III.7.2. Résistance à la flexion.....	41
<b>III.8. Conclusion</b> .....	41
<b>CHAPITRE IV : Discussion des Résultats</b> .....	43
<b>IV.1. Introduction</b> .....	43
<b>IV.2. Résistance à la flexion</b> .....	43
<b>IV.2. Résistance à la compression</b> .....	45
<b>IV.3. Absorption d'eau</b> .....	46
<b>IV.4. Relation entre la résistance à la compression et à l'absorption d'eau</b> .....	47
<b>IV.5. Conclusion</b> .....	48
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	50
<b>Conclusion générale</b> .....	51
<b>Références Bibliographiques</b> .....	54

## Liste des Figures

Fig. 1 Micrographies SEM .....	16
Fig. 2 Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994 .....	19
Fig. 3 Courbe granulométrique du sable de dune.....	33
Fig. 4 Silicate de sodium. ....	34
Fig. 5 NaOH.....	34
Fig. 6 Broyage du laitier.....	36
Fig. 7 Malaxeur à mortier .....	38
Fig. 8 Préparation de la solution chimique.....	39
Fig. 9 Les moules .....	39
Fig. 10 Les mortiers confectionnés.....	40
Fig. 11 Essai de compression .....	40
Fig. 12 Essai de flexion .....	41
Fig. 13 Résistance à la flexion.....	44
Fig. 14 Résistance à la compression .....	45
Fig. 15 Absorption d'eau .....	46
Fig. 16 Relation entre l'absorption totale et la résistance à la compression.....	47

## Liste des Tableaux

Tableau 1 Différentes caractéristiques du sable utilisé. ....	32
Tableau 2 Caractéristiques chimiques du silicate de sodium.....	33
Tableau 3 Caractéristiques physiques de NaOH. ....	35
Tableau 4 Propriétés physiques de laitier. ....	36
Tableau 5 Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés. ....	37

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

L'industrie de la construction est une sphère cruciale de notre société moderne, modelant nos infrastructures et notre environnement construit. Néanmoins, cette industrie porte également la responsabilité d'une consommation substantielle de ressources naturelles et d'une production importante de déchets. Les matériaux de construction conventionnels, tels que le ciment et l'acier, sont souvent issus de ressources non renouvelables, exerçant ainsi une pression accrue sur notre environnement. Face à la croissance des défis environnementaux, il est impératif de repenser nos pratiques constructives et de promouvoir le développement de matériaux durables et respectueux de l'environnement. Ces matériaux se doivent de satisfaire à divers critères, incluant l'usage de matières premières renouvelables ou recyclées, la réduction de la consommation énergétique lors de leur fabrication, la minimisation des émissions de gaz à effet de serre, et la promotion de la durabilité à long terme.

L'adoption de matériaux de construction durables présente de multiples avantages. En premier lieu, ils contribuent à la préservation des ressources naturelles par l'usage de matériaux recyclés ou renouvelables. Cela réduit la dépendance à l'égard des ressources non renouvelables, ainsi que l'impact environnemental lié à leur extraction. Par ailleurs, les matériaux de construction durables sont conçus en vue d'une empreinte carbone réduite. Ils permettent de diminuer les émissions de gaz à effet de serre engendrées par la fabrication et l'utilisation des bâtiments, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. En outre, ces matériaux favorisent la pérennité des structures bâties. Leur résistance, leur durabilité, et leur capacité à s'adapter aux fluctuations environnementales assurent des édifices solides et résistants, réduisant ainsi les coûts d'entretien et prolongeant leur durée de vie utile. En somme, la transition vers des pratiques constructives durables et l'adoption de matériaux respectueux de l'environnement sont cruciales pour atténuer l'impact écologique de l'industrie de la construction. Cette démarche requiert une collaboration entre les parties prenantes de l'industrie, les décideurs politiques, et les chercheurs, afin de développer des solutions innovantes et de mettre en œuvre des pratiques constructives responsables. En repensant nos méthodes et en intégrant des matériaux durables, nous pouvons bâtir un avenir plus respectueux de l'environnement et durable pour les générations futures.

Cette recherche se focalise sur l'étude approfondie des matériaux géopolymères, considérés comme une alternative porteuse aux matériaux de construction traditionnels, tels que le ciment. Les géopolymères, fabriqués à partir de ressources pléthoriques, telles que les cendres

volantes, les scories, et les fines de ciment recyclées, offrent des bénéfices notables, incluant une empreinte carbone réduite et une résistance mécanique accrue.

Dans cette optique, l'objectif central de cette étude réside dans l'exploration de l'utilisation des fines de mortier recyclées, souvent considérées comme des résidus, dans la confection des matériaux géopolymères. Particulièrement, nous cherchons à évaluer l'impact de l'incorporation des fines de mortier thermiquement traitées sur les propriétés mécaniques et la durabilité des géopolymères.

Les résultats émanant de cette recherche apporteront un éclairage précieux sur le potentiel des fines de mortier recyclées en tant qu'additif dans les matériaux géopolymères. Ils contribueront à l'avancement des connaissances dans le domaine des matériaux de construction durables, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives quant à la réutilisation des déchets issus de la construction.

En somme, cette étude vise à promouvoir une approche respectueuse de l'environnement au sein de l'industrie de la construction, en explorant l'utilisation des fines de mortier recyclées dans les matériaux géopolymères. En exploitant les ressources existantes et en réduisant la dépendance vis-à-vis des matériaux conventionnels, cette recherche contribue à l'édification d'un avenir plus durable et écologique pour l'industrie de la construction.

Dans le cadre de cette étude, des fines recyclées traitées thermiquement ont été utilisées en remplacement de laitier, Ainsi, notre mémoire se compose de deux grandes parties :

- La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, elle se décompose en deux chapitres : Le premier est consacré à des généralités sur les géopolymères, le deuxième chapitre, est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur l'utilisation des déchets dans la confection des géopolymères durables.
- La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle est structurée comme suit : Une description détaillée de tous les matériaux utilisés regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus. Ceci constitue le troisième chapitre. Le quatrième chapitre s'intéresse à l'analyse des résultats obtenus. En fin une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

# CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères

## I.1. Introduction

Le géopolymère, un matériau qui pourrait révolutionner le domaine de la construction et de la recherche. Il offre des bénéfices importants pour l'environnement et l'économie, en réduisant l'empreinte écologique et le coût énergétique des ciments Portland traditionnels qu'il peut remplacer partiellement ou totalement. Les géopolymères sont des "gels" très denses d'aluminosilicates amorphes, obtenus en faisant réagir un minerai riche en alumine et éventuellement en silice avec une solution alcaline de silicate. Ce sont des matériaux cimentaires innovants, dont nous allons étudier les mécanismes de durcissement dans un système à base de laitier.

Nous présenterons d'abord un historique des géopolymères, puis nous décrirons leur composition, leurs applications et leur caractérisation.

## I.2. Historique

Les années 80 ont vu l'émergence des géopolymères, initiés par Davidovits [1], dans le but de créer des polymères inorganiques résistants à la chaleur et incombustibles, en réponse aux incendies survenus en France entre 1970 et 1973, causés par l'inflammabilité des matériaux plastiques.

Des recherches menées par Barsoum et al. [2] ont révélé l'utilisation potentielle de l'activation alcaline dans la construction des pyramides en Égypte. Bien que cette théorie soit controversée, il est possible que les blocs de pierre utilisés pour les pyramides de Gizeh ou de Senefru aient été formés en agglomérant des pierres réduites en poudre et en les liant avec un matériau géopolymérique composé de calcaire local, d'argiles kaoliniques, de natron et de chaux, en présence d'eau. Cette méthode aurait pu conduire à la formation d'un silicate de calcium-aluminium hydraté, similaire à un géopolymère. Des procédés similaires ont également été utilisés dans la construction de bétons anciens en Syrie, à Rome et en Jordanie, où une plus grande quantité d'alcalins était employée. Dans les années 50, le professeur Glukhovsky [3] a développé des ciments à base de laitiers et d'autres déchets alcalins pour remédier à la pénurie de ciment Portland en URSS. Ces ciments sont toujours utilisés aujourd'hui sans rencontrer de

## CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères

---

problèmes de durabilité significatifs. Le professeur Joseph Davidovits [1] a quant à lui développé dans les années 70 une théorie générale du mécanisme chimique et a déposé de nombreux brevets, y compris celui du terme "géopolymère", entre 1972 et 1996, suscitant ainsi l'intérêt pour les applications industrielles de cette technologie. Dans les années 80, la société Lone Star Industries a lancé un ciment appelé Pyrament, un mélange de géopolymères et de ciment Portland, qui a été utilisé pour le pavage d'installations militaires américaines, entre autres.

Les géopolymères ont connu diverses applications grâce à leur résistance élevée au feu, notamment dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatiale. Cependant, c'est dans le domaine de la construction qu'ils ont connu un développement majeur. Au début des années 2000, des produits commerciaux à base de géopolymères ont été introduits, tels que les joints Geofug de BASF. Zeobond a également mis en place une production industrielle de son ciment E-crete, utilisant des sous-produits industriels comme les cendres volantes et les laitiers.

Ces dernières années, on a observé une augmentation significative du nombre de publications scientifiques sur les géopolymères. Cette tendance, surtout depuis les années 2000, peut être attribuée à la nécessité croissante de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, en particulier dans le secteur du bâtiment, ainsi qu'à la demande croissante des gouvernements de prendre en compte les problématiques environnementales.

### I.3. Définition des géopolymères

Un géopolymère est un matériau inorganique polymérique formé par un processus de géopolymérisation, qui est une réaction chimique entre des précurseurs inorganiques riches en silice (Si) et en alumine (Al) avec un activateur alcalin, généralement une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH). Ce processus crée un réseau tridimensionnel liant les précurseurs et formant ainsi une structure solide.[4]

Les géopolymères se distinguent des polymères traditionnels tels que le plastique en raison de leur composition et de leur processus de formation. Contrairement aux polymères organiques, les géopolymères sont principalement constitués d'éléments inorganiques tels que le silicium (Si), l'aluminium (Al), l'oxygène (O) et des cations alcalins tels que le sodium (Na) et le potassium (K).[5]

## CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères

---

La géopolymérisation est une réaction chimique complexe qui implique la dissolution des précurseurs inorganiques dans l'activateur alcalin, suivie par une réorganisation moléculaire et une polymérisation chimique pour former le réseau géopolymérique. Ce réseau tridimensionnel offre aux géopolymères des propriétés telles que la résistance mécanique, la résistance à la chaleur, la durabilité et la résistance aux attaques chimiques.

Les géopolymères sont utilisés dans diverses applications industrielles, notamment dans la construction, l'isolation thermique, la réparation des structures, la fabrication de céramiques, les revêtements de surface, les matériaux composites, les matériaux réfractaires, les matériaux absorbants, etc. Leur utilisation est motivée par leur faible empreinte carbone, leur capacité à recycler les déchets industriels et leur durabilité supérieure par rapport à de nombreux matériaux traditionnels.[6]

Les propriétés des géopolymères peuvent être ajustées en modifiant les précurseurs inorganiques, l'activateur alcalin et les conditions de traitement. Cela permet d'obtenir des géopolymères adaptés à des besoins spécifiques, tels que des géopolymères à faible conductivité thermique pour l'isolation, des géopolymères résistants aux acides pour les environnements corrosifs, ou des géopolymères à haute résistance mécanique pour la construction.[7]

### I.4. Différents types de géopolymère

#### *I.4.1. Géopolymère à base de laitier*

Les géopolymères à base de laitier sont fabriqués en utilisant du laitier de haut fourneau, un sous-produit résultant de la production de fonte dans l'industrie sidérurgique. Ce matériau est souvent considéré comme un déchet, mais il peut être valorisé en tant que matière première pour la fabrication de géopolymères.

Ces géopolymères à base de laitier sont largement utilisés dans l'industrie de la construction en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur résistance aux produits chimiques. Lorsqu'ils sont mélangés avec des activateurs alcalins, le laitier réagit chimiquement pour former une matrice solide et liée, qui présente des performances supérieures à celles des matériaux traditionnels tels que le ciment Portland.[8]

Les géopolymères à base de laitier offrent une résistance mécanique élevée, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des applications structurelles. Ils peuvent être utilisés pour

## CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères

---

la construction de fondations, de murs, de dalles et d'autres éléments de structure nécessitant une résistance et une durabilité élevées. De plus, ils présentent une excellente résistance aux produits chimiques, ce qui les rend appropriés pour des environnements agressifs où la corrosion ou la détérioration chimique peuvent être un problème, tels que les installations industrielles, les stations d'épuration ou les structures en contact avec des agents chimiques corrosifs.[9], [10]

### *1.4.2. Géopolymère à base de métakaolin*

Ces géopolymères sont produits en utilisant du métakaolin, qui est obtenu en calcinant de l'argile kaolin à des températures élevées (environ 600-800°C). Le processus de calcination élimine les impuretés et active les composants réactifs de l'argile, ce qui permet de former des géopolymères lorsqu'il est mélangé à des activateurs alcalins.

Ces géopolymères à base de métakaolin sont utilisés dans diverses applications en raison de leurs propriétés uniques. L'une des utilisations courantes est la réparation des structures, où les géopolymères à base de métakaolin sont utilisés comme matériaux de réparation pour restaurer l'intégrité structurelle des éléments endommagés tels que les murs, les piliers ou les planchers. Ils peuvent être utilisés pour renforcer les zones faibles, réparer les fissures et les défauts, et améliorer la durabilité globale des structures.

Les géopolymères à base de métakaolin sont également utilisés dans les revêtements de surface pour fournir des propriétés améliorées telles que la résistance à l'usure, la résistance chimique et la protection contre la corrosion. Ils peuvent être appliqués sur divers substrats tels que le béton, le métal ou le bois, offrant une barrière protectrice durable et résistante aux conditions environnementales agressives[11], [12].

### *1.4.3. Ciment géopolymère à base de cendres volantes*

Les géopolymères à base de cendres volantes sont fabriqués en utilisant des cendres volantes, un sous-produit résultant de la combustion du charbon dans les centrales électriques. Lorsque le charbon est brûlé pour produire de l'électricité, les cendres volantes sont générées et capturées à partir des gaz de combustion. Ces cendres volantes peuvent ensuite être utilisées comme matière première dans la fabrication de géopolymères. [13]

Ces géopolymères à base de cendres volantes sont largement appréciés pour leur faible impact environnemental. En utilisant les cendres volantes, qui seraient autrement considérées

comme des déchets, comme matériau de base, on évite leur élimination dans les décharges et on réduit ainsi leur empreinte écologique. De plus, les géopolymères à base de cendres volantes nécessitent généralement moins d'énergie lors de leur fabrication par rapport aux matériaux traditionnels tels que le ciment Portland, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et à la préservation des ressources naturelles.[14]

### I.5. Microstructure du liant géopolymère à l'état durci

Le matériau formé par le processus de géopolymérisation diffère considérablement des hydrates de ciment Portland (OPC). Dans une étude de 1979, Davidovits [1] a décrit le produit de la géopolymérisation comme un polymère amorphe à semi-cristallin d'aluminosilicate. Ce matériau est le résultat d'une réaction de polycondensation inorganique d'aluminosilicates en présence de solutions hautement concentrées d'hydroxyde ou de silicate de métal alcalin (Fig.1).

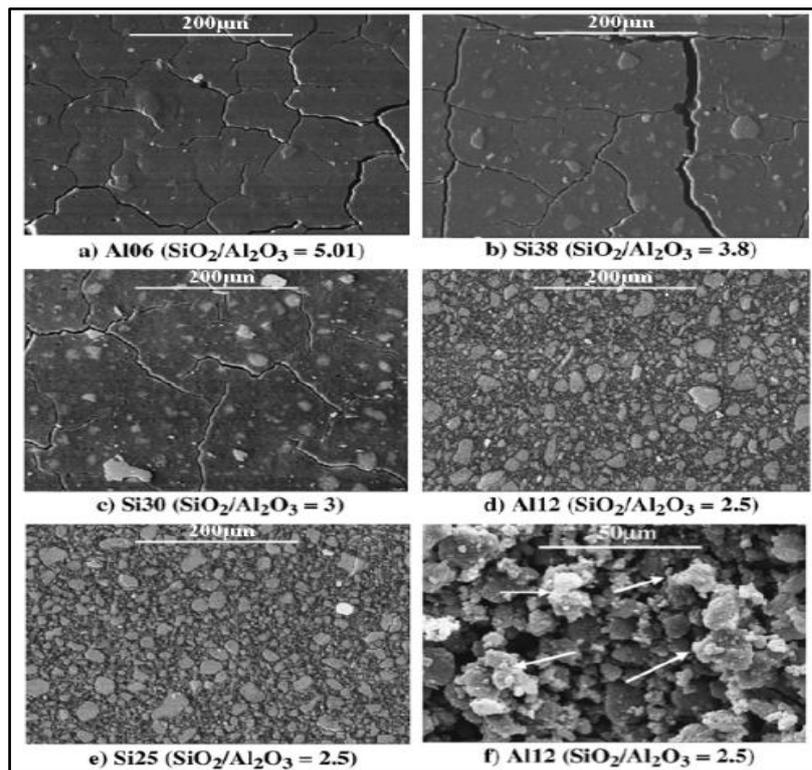


Fig. 1 Micrographies SEM

### I.6. Formulation des géopolymères

La formulation des géopolymères est un processus crucial dans la fabrication de ces matériaux inorganiques. Elle consiste à sélectionner et doser judicieusement les matières premières et les activateurs nécessaires pour obtenir les propriétés souhaitées.

Les principaux composants utilisés dans la formulation des géopolymères sont les précurseurs siliceux et aluminiques, les activateurs alcalins et éventuellement d'autres ajouts pour améliorer certaines propriétés spécifiques. Les précurseurs siliceux les plus couramment utilisés sont le métakaolin[11], un produit de l'argile calcinée[15], et les cendres volantes[13]. Les précurseurs aluminiques incluent souvent le laitier de haut fourneau[10], [16], qui est un sous-produit de l'industrie sidérurgique.

Les activateurs alcalins sont essentiels pour initier la réaction de géopolymérisation. Ils peuvent être des silicates alcalins, tels que l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH), ou des solutions de silicate alcalin, généralement appelées "liquides alcalins". Ces activateurs fournissent les ions alcalins nécessaires pour réagir avec les précurseurs et former le réseau tridimensionnel du géopolymère[17].

La formulation des géopolymères nécessite une bonne connaissance des interactions chimiques et des ratios appropriés entre les précurseurs et les activateurs. Des essais préliminaires sont souvent réalisés pour déterminer les proportions optimales de chaque composant, en tenant compte des propriétés souhaitées, telles que la résistance mécanique, la durabilité, la résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

Outre les précurseurs et les activateurs, d'autres ajouts peuvent être incorporés dans la formulation des géopolymères pour améliorer certaines caractéristiques. Par exemple, des fibres peuvent être ajoutées pour renforcer la résistance à la traction et à la flexion du matériau. Des adjuvants peuvent également être utilisés pour modifier la rhéologie de la pâte géopolymère, facilitant ainsi sa mise en œuvre et son application.

Une fois la formulation établie, les différentes matières premières sont mélangées soigneusement pour assurer une homogénéité de la pâte géopolymère. Le mélange peut être réalisé à sec, en mélangeant les poudres des précurseurs, ou en utilisant une méthode humide, en incorporant progressivement les liquides alcalins dans les précurseurs. Des techniques de

mélange spécifiques, telles que le malaxage ou le mélange à haute énergie, peuvent être utilisées pour obtenir une dispersion uniforme des composants.

La formulation des géopolymères est un processus dynamique, où différents paramètres peuvent être ajustés en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Les chercheurs et les ingénieurs travaillent constamment pour développer de nouvelles formulations et optimiser les propriétés des géopolymères, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications industrielles dans des domaines tels que la construction, l'aérospatiale, l'environnement et bien d'autres.

### I.7. Application des géopolymères

Les géopolymères sont largement utilisés dans divers secteurs tels que le génie civil, l'automobile, l'aéronautique, la métallurgie, la fonderie de métaux non ferreux, la plasturgie, la gestion des déchets, la construction et la restauration de bâtiments . Dans le domaine de l'ingénierie, de nouveaux types de ciments géopolymères, comme le American Cement PYRAMENT, ont été développés et sont sur le marché depuis 1988 aux États-Unis. Ces produits sont ultra-rapides et performants, ce qui les rend idéaux pour l'entretien et la construction de plates-formes d'atterrissage en béton [18].

Dans l'industrie aérospatiale, les moules et les outils en géopolymère réfractaires sont utilisés pour fabriquer en toute sécurité des alliages aluminium/lithium liquides hautement corrosifs. Cette application est essentielle pour la fabrication de pièces aéronautiques de haute qualité, où les géopolymères offrent une résistance chimique et thermique exceptionnelle.[19]

Dans le domaine de l'automobile, des composites carbone/géopolymère sont utilisés pour la protection thermique des voitures de course. Ces composites offrent une excellente résistance à la chaleur et peuvent résister aux conditions extrêmes rencontrées dans les véhicules de course.[19]

Dans le domaine du génie civil, les applications pratiques des géopolymères peuvent être regroupées en trois catégories distinctes. Tout d'abord, ils sont utilisés dans la construction de bâtiments et d'éléments préfabriqués pour des ouvrages d'art, offrant des avantages tels qu'une meilleure résistance aux intempéries, une durabilité accrue et une réduction de l'empreinte carbone par rapport aux matériaux traditionnels.[20]

## CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères

---

Ensuite, les géopolymères sont utilisés dans la production d'éléments de maçonnerie tels que des blocs, des pavés, des corps creux, etc. Ces produits offrent des performances supérieures en termes de résistance mécanique, d'isolation thermique et acoustique, et de résistance aux produits chimiques, contribuant ainsi à des constructions durables et de haute qualité.

Enfin, les géopolymères sont utilisés dans la construction de routes et de canalisations dans les travaux publics. Ils offrent une excellente résistance à la fatigue, une meilleure durabilité et une résistance chimique élevée, ce qui en fait des choix attrayants pour les infrastructures routières et les systèmes de drainage.

Un exemple de réalisation notable dans l'utilisation des bétons géopolymères à base de laitier remonte à 1986-1994, lorsque la société russe Tsentrometallurgremonta a réussi à construire une série de bâtiments en utilisant ces matériaux (Fig.2). Ces bétons géopolymères à base de laitier ont démontré leurs excellentes propriétés mécaniques et leur résistance aux produits chimiques, offrant ainsi une alternative durable et performante aux bétons traditionnels.

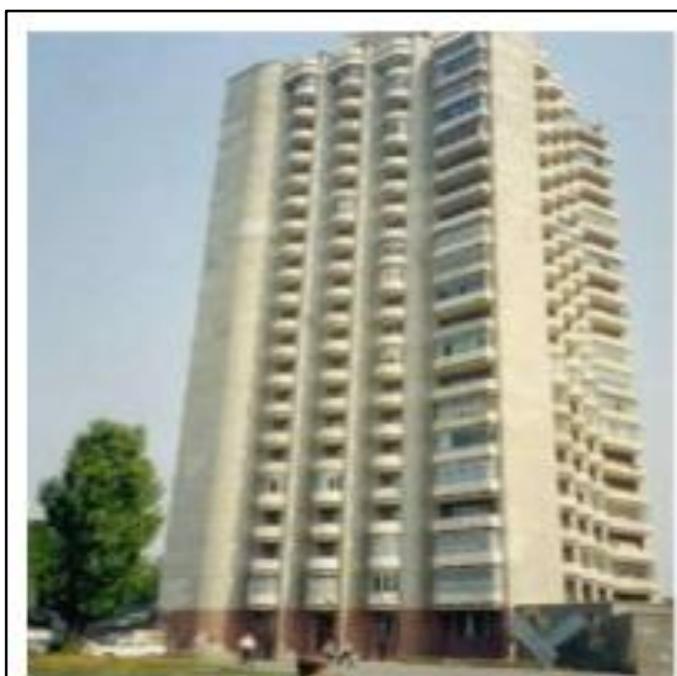


Fig. 2 Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994

### I.8. Avantages et inconvénients des géopolymère

Les géopolymères présentent plusieurs avantages et inconvénients, qui peuvent varier en fonction de leur formulation spécifique et de leur application. Voici quelques-uns des principaux avantages et inconvénients des géopolymères [21]–[26].

#### *I.8.1. Avantages des géopolymères*

- Durabilité : Les géopolymères sont connus pour leur durabilité exceptionnelle. Ils offrent une résistance élevée aux attaque chimiques, à la chaleur, à l'abrasion et aux intempéries, ce qui en fait des matériaux adaptés aux environnements difficiles.
- Résistance mécanique : Les géopolymères peuvent présenter une résistance mécanique élevée, ce qui les rend adaptés à des applications nécessitant une bonne stabilité structurelle, telles que la construction d'ouvrages d'art et de bâtiments.
- Faible empreinte carbone : Les géopolymères peuvent être fabriqués à partir de sous-produits industriels, tels que le laitier de haut fourneau ou les cendres volantes, ce qui réduit leur empreinte carbone par rapport aux matériaux traditionnels. Ils peuvent également contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre lors de leur fabrication.
- Utilisation de déchets : Les géopolymères offrent la possibilité d'utiliser des déchets industriels comme matières premières, tels que les cendres volantes, contribuant ainsi à la gestion des déchets et à la promotion de l'économie circulaire.
- Isolation thermique : Certains géopolymères présentent de bonnes propriétés d'isolation thermique, ce qui les rend utiles pour l'isolation des bâtiments et la réduction des pertes d'énergie.

#### *I.8.2. Inconvénients des géopolymères*

- Coût initial plus élevé : Les géopolymères peuvent être plus coûteux à produire que les matériaux traditionnels tels que le ciment Portland. Cela est dû à la nécessité de matières premières spécifiques et d'un processus de fabrication plus complexe.
- Sensibilité à l'humidité : Certains géopolymères peuvent être sensibles à l'humidité pendant leur durcissement, ce qui nécessite des conditions de séchage et de durcissement contrôlées.

- Temps de durcissement plus long : Les géopolymères peuvent nécessiter un temps de durcissement plus long que les matériaux traditionnels, ce qui peut prolonger les délais de construction dans certains cas.
- Variabilité des propriétés : Les propriétés des géopolymères peuvent varier en fonction de leur formulation et de leur processus de fabrication, ce qui nécessite une expertise et un contrôle stricts pour assurer une performance cohérente.

### **I.9. Conclusion**

Cette revue de littérature débute en mettant en évidence la possibilité de remplacer le ciment Portland par des liants géopolymères, tout en soulignant la complexité de créer une méthode de formulation standardisée répondant à tous les besoins techniques. Ensuite, les principales propriétés des géopolymères sont présentées de manière concise.

Selon des études antérieures, les géopolymères présentent des performances mécaniques, une résistance au feu et une résistance à l'attaque chimique similaires à celles du béton traditionnel. De plus, plusieurs exemples concrets démontrent la capacité des géopolymères à répondre à un large éventail d'applications dans le domaine de la construction.

## **CHAPITRE II**

## CHAPITRE II : Les déchets dans les géopolymères

### II.1. Introduction

La production et la gestion des déchets sont des enjeux majeurs dans notre société contemporaine. Face à ces défis, l'utilisation des déchets comme matières premières dans des applications innovantes est devenue une priorité pour promouvoir une économie circulaire et durable. Dans ce contexte, les géopolymères se démarquent comme une solution prometteuse, offrant la possibilité de valoriser ces déchets tout en réduisant l'impact environnemental de l'industrie de la construction.

Ce chapitre se concentre sur l'utilisation des déchets dans la fabrication des géopolymères. Nous explorerons les différentes catégories de déchets susceptibles d'être utilisés.

### II.2. Les déchets utilisés dans la fabrication des géopolymères

La valorisation des déchets dans la fabrication des géopolymères offre une solution prometteuse pour la gestion durable des déchets tout en réduisant la dépendance aux ressources naturelles. Cette section examinera les différents types de déchets qui peuvent être utilisés dans la formulation des géopolymères.

#### *II.2.1. Résidus industriels et sous-produits*

Les résidus industriels et les sous-produits issus de divers secteurs industriels représentent une source importante de matières premières pouvant être utilisées dans la fabrication des géopolymères. Ces déchets, qui seraient autrement considérés comme des déchets indésirables, peuvent être valorisés et transformés en matériaux de construction durables, offrant ainsi une solution à la fois économiquement viable et respectueuse de l'environnement.

Un exemple de résidu industriel couramment utilisé dans la fabrication des géopolymères est le laitier de haut fourneau, un sous-produit de l'industrie sidérurgique. Le laitier, composé principalement de silicates et d'aluminates, présente des propriétés chimiques et physiques favorables à la formation des géopolymères. En l'incorporant dans la formulation des géopolymères, le laitier peut remplacer efficacement une partie du ciment Portland,

réduisant ainsi la quantité de clinker utilisée et les émissions de gaz à effet de serre associées à sa production [27]

De même, les sous-produits générés par l'industrie de l'aluminium, tels que les scories d'aluminium, peuvent être valorisés dans les géopolymères. Ces scories contiennent des quantités significatives d'alumine et peuvent être utilisées comme source d'alumine dans la formulation des géopolymères. Cela permet non seulement de valoriser ces sous-produits, mais également de réduire la consommation d'alumine vierge, qui est une ressource naturelle limitée [28].

L'industrie chimique produit également divers sous-produits qui peuvent être utilisés dans les géopolymères. Par exemple, les cendres volantes provenant des centrales électriques à combustion de charbon peuvent être incorporées dans les géopolymères. Les cendres volantes sont riches en silice et en alumine, ce qui en fait des matériaux précieux pour la formation des géopolymères. En utilisant ces sous-produits de manière efficace, l'industrie chimique peut contribuer à la création d'un environnement plus durable tout en réduisant sa production de déchets. [28]

### *II.2.2. Cendres volantes et autres déchets de combustion*

Les cendres volantes, qui sont des résidus générés lors de la combustion du charbon dans les centrales électriques, représentent une ressource précieuse dans la fabrication des géopolymères. Ces déchets, composés principalement de silice et d'alumine, jouent un rôle essentiel dans la formation des géopolymères en tant que sources de ces éléments clés.

Les cendres volantes sont largement utilisées dans l'industrie des géopolymères en raison de leur composition chimique favorable. La silice ( $\text{SiO}_2$ ) et l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) présentes dans les cendres volantes réagissent avec les activateurs alcalins, tels que l'hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ ) ou l'hydroxyde de potassium ( $\text{KOH}$ ), pour former un gel d'aluminosilicate. Ce gel d'aluminosilicate est responsable de la solidification et du durcissement des géopolymères, leur conférant ainsi leurs propriétés mécaniques et leur résistance chimique [29].

Outre les cendres volantes, d'autres déchets de combustion peuvent également être utilisés dans les géopolymères. Les cendres de biomasse, qui sont des résidus de la combustion de matières organiques telles que les résidus agricoles ou forestiers, contiennent également des quantités significatives de silice et d'alumine. Ces cendres peuvent être incorporées dans les

formulations de géopolymères, offrant ainsi une solution supplémentaire pour valoriser ces déchets et les transformer en matériaux de construction durables [29].

De plus, les résidus issus de l'incinération des déchets, tels que les cendres d'incinération, peuvent également être utilisés dans les géopolymères. Ces résidus contiennent généralement une combinaison de silice, d'alumine et d'autres composants chimiques, ce qui en fait des candidats potentiels pour la fabrication des géopolymères. Leur incorporation dans les géopolymères permet non seulement de réduire leur élimination coûteuse, mais également de valoriser ces déchets en leur donnant une nouvelle utilité.

L'utilisation des cendres volantes et d'autres déchets de combustion dans les géopolymères présente de nombreux avantages. Tout d'abord, cela permet de réduire la quantité de déchets envoyés aux sites d'enfouissement, contribuant ainsi à la gestion durable des déchets. Ensuite, cela offre une alternative écologique à l'utilisation de matières premières vierges, réduisant ainsi l'impact environnemental associé à leur extraction et à leur production. Enfin, les géopolymères fabriqués à partir de ces déchets de combustion peuvent présenter des performances mécaniques et chimiques comparables, voire supérieures, à celles des matériaux traditionnels, offrant ainsi une solution durable et économiquement viable pour diverses applications de construction [29].

### *II.2.3. Les déchets de construction et de démolition*

Les déchets de construction et de démolition, tels que le béton concassé ou les granulats recyclés, sont des ressources précieuses qui peuvent être intégrées dans la formulation des géopolymères. Ces déchets, qui proviennent des activités de construction, de rénovation et de démolition, représentent une source abondante de matériaux qui peuvent être valorisés dans les géopolymères.

L'intégration de ces déchets dans les géopolymères présente de nombreux avantages. Tout d'abord, cela permet de réduire la quantité de déchets de construction envoyés aux sites d'enfouissement, contribuant ainsi à la gestion durable des déchets et à la préservation des ressources naturelles. En utilisant les déchets de construction et de démolition comme matières premières, on évite l'extraction de nouvelles ressources naturelles, ce qui réduit l'impact environnemental associé à leur exploitation [29].

De plus, l'utilisation de ces déchets dans les géopolymères contribue à promouvoir le principe de l'économie circulaire. Plutôt que de considérer les déchets de construction et de

démolition comme une simple nuisance à éliminer, ils sont transformés en ressources valorisables. Cette approche favorise la réutilisation des matériaux existants, réduisant ainsi la demande de nouvelles matières premières et les émissions de gaz à effet de serre associées à leur production [30].

Les déchets de construction et de démolition peuvent être utilisés de différentes manières dans les géopolymères. Par exemple, le béton concassé peut être utilisé comme granulats dans la formulation des géopolymères, remplaçant ainsi partiellement les granulats traditionnels. Les granulats recyclés, obtenus à partir du concassage et du tri des débris de béton, peuvent être intégrés dans les mélanges de géopolymères, offrant une solution durable pour la production de matériaux de construction.[29]

En intégrant ces déchets dans les géopolymères, on améliore également les performances des matériaux finaux. Les déchets de construction et de démolition, tels que le béton concassé, peuvent contenir des particules fines et des matériaux réactifs qui contribuent à renforcer les propriétés mécaniques des géopolymères. De plus, l'utilisation de ces déchets peut permettre d'obtenir des géopolymères présentant des caractéristiques spécifiques, telles qu'une meilleure résistance à l'abrasion ou une plus grande durabilité.[29].

### **II.3. Performances techniques et propriétés des géopolymères avec déchets**

L'utilisation de déchets dans la fabrication des géopolymères peut avoir un impact significatif sur leurs performances techniques et leurs propriétés. Ces déchets peuvent apporter des caractéristiques uniques aux géopolymères, les rendant adaptés à diverses applications dans le domaine de la construction et de l'industrie.

L'un des avantages des géopolymères avec des déchets est leur résistance mécanique. Les déchets de construction tels que le béton concassé ou les granulats recyclés contiennent souvent des agrégats solides et des particules réactives qui peuvent renforcer la structure des géopolymères. En incorporant ces déchets dans les formulations, il est possible d'améliorer la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à l'abrasion des géopolymères. Cela les rend adaptés à des applications nécessitant des matériaux solides et durables, tels que les dalles de béton, les revêtements de sol et les éléments structuraux.

De plus, l'utilisation de déchets dans les géopolymères peut également améliorer leur résistance chimique. Certains déchets industriels, tels que les cendres volantes issues de la combustion du charbon, contiennent des composés chimiques qui peuvent conférer aux

géopolymères une résistance accrue aux produits chimiques agressifs tels que les acides et les sels. Cela les rend appropriés pour une utilisation dans des environnements chimiquement corrosifs, tels que les stations d'épuration, les usines chimiques et les zones côtières soumises à une exposition saline [19].

Par ailleurs, l'utilisation de déchets dans les géopolymères peut également améliorer leur résistance au feu. Certains déchets, comme les cendres volantes, peuvent agir comme des charges ignifuges, retardant la propagation des flammes et réduisant la propagation de la chaleur. Cela permet aux géopolymères d'offrir une protection contre l'incendie dans les applications de construction nécessitant des matériaux ignifuges, tels que les revêtements de protection incendie et les éléments de structure dans les bâtiments [31].

Outre ces avantages techniques, l'utilisation de déchets dans les géopolymères peut également avoir des avantages environnementaux. En valorisant les déchets industriels et de construction, on réduit leur volume et leur impact sur les sites d'enfouissement, contribuant ainsi à la gestion durable des déchets. De plus, l'utilisation de déchets dans les géopolymères permet de réduire la consommation de ressources naturelles, telles que le sable et le gravier, qui sont généralement utilisées dans la fabrication du béton traditionnel. Cela favorise la préservation de l'environnement et la promotion de l'économie circulaire [20].

L'utilisation de déchets dans la fabrication des géopolymères peut offrir des performances techniques améliorées et des propriétés spécifiques aux matériaux finaux. Ces géopolymères avec déchets présentent une résistance mécanique accrue, une meilleure résistance chimique et une résistance au feu améliorée. De plus, l'utilisation de déchets permet de réduire l'impact environnemental en valorisant ces matériaux et en réduisant la consommation de ressources naturelles. En intégrant les déchets dans les géopolymères, on ouvre la voie à la création de matériaux de construction durables, économiquement viables et respectueux de l'environnement.

### **II.4. Impact environnemental et durabilité des géopolymères avec déchets**

L'utilisation de déchets dans la fabrication des géopolymères présente des avantages notables en termes d'impact environnemental et de durabilité. Ces matériaux offrent une alternative écologiquement viable aux méthodes de construction traditionnelles, contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone et à la préservation des ressources naturelles.

## CHAPITRE II : Les déchets dans les géopolymères

---

L'un des principaux avantages des géopolymères avec déchets est la réduction significative des émissions de gaz à effet de serre. Contrairement au ciment Portland, dont la production est responsable d'une quantité importante de CO<sub>2</sub>, les géopolymères utilisant des déchets industriels ou de construction comme matières premières émettent beaucoup moins de gaz à effet de serre lors de leur fabrication[32]. Cela s'explique par le fait que les déchets sont des produits déjà existants qui nécessitent moins d'énergie pour être transformés en géopolymères par rapport à l'extraction et à la production de matériaux vierges.

De plus, l'utilisation de déchets dans les géopolymères contribue à la gestion des déchets et à la réduction de l'enfouissement. En intégrant ces déchets dans les formulations de géopolymères, on leur donne une seconde vie utile, évitant ainsi leur accumulation dans les sites d'enfouissement et réduisant les impacts négatifs sur l'environnement. Cela favorise également le principe de l'économie circulaire en transformant les déchets en ressources valorisées [28].

Les géopolymères avec déchets présentent également des caractéristiques de durabilité remarquables. Grâce à l'utilisation de déchets riches en silice et en alumine, ces matériaux peuvent offrir une résistance accrue à l'abrasion, aux produits chimiques agressifs et à la dégradation due aux conditions environnementales [26]. Cela se traduit par une durée de vie plus longue des structures construites avec des géopolymères, réduisant ainsi la nécessité de réparations et de remplacements fréquents, et donc la consommation de ressources supplémentaires.

Par ailleurs, les géopolymères avec déchets sont également recyclables. À la fin de leur vie utile, ils peuvent être broyés et réutilisés comme matière première dans la production de nouveaux géopolymères, contribuant ainsi à la fermeture du cycle des matériaux et à la réduction de la demande en ressources naturelles vierges.

L'utilisation de déchets dans la fabrication des géopolymères présente un impact environnemental positif en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en favorisant la gestion des déchets. Ces matériaux durables offrent une alternative écologiquement responsable aux méthodes de construction traditionnelles. Grâce à leur résistance et à leur recyclabilité, les géopolymères avec déchets contribuent à la préservation des ressources naturelles et à la promotion de l'économie circulaire.

### II.5. Applications et perspectives

#### *II.5.1. Utilisation des géopolymères avec déchets dans l'industrie de la construction*

Les géopolymères avec déchets ont trouvé de nombreuses applications dans l'industrie de la construction. Leur utilisation dans la fabrication de bétons, de mortiers, de revêtements de surface et d'autres matériaux de construction offre une alternative durable et écologique aux méthodes conventionnelles.

Dans le domaine des bétons, les géopolymères avec déchets ont été utilisés avec succès pour la construction de structures résidentielles, commerciales et industrielles. Ils offrent une résistance mécanique comparable voire supérieure au béton traditionnel, tout en présentant une meilleure résistance à la corrosion et aux attaques chimiques. De plus, leur capacité à incorporer des granulats recyclés ou d'autres déchets de construction contribue à la réduction des déchets et à la promotion de l'économie circulaire.

Les géopolymères avec déchets sont également utilisés dans la fabrication de mortiers de réparation et de revêtements de surface. Leur adhérence et leur résistance aux conditions environnementales agressives en font des solutions idéales pour la réhabilitation et la protection des structures existantes. De plus, leur durabilité et leur faible porosité contribuent à prolonger la durée de vie des bâtiments et des infrastructures.

#### *II.5.2. Avancées récentes et projets de recherche en cours*

Les avancées récentes dans le domaine des géopolymères avec déchets ont permis d'améliorer leurs performances et d'explorer de nouvelles applications. Les chercheurs se concentrent sur l'optimisation des formulations, la compréhension des mécanismes de durcissement et les améliorations des propriétés spécifiques.

De plus, des projets de recherche en cours visent à explorer des combinaisons de déchets spécifiques pour produire des géopolymères adaptés à des besoins spécifiques. Par exemple, l'utilisation de déchets organiques dans les géopolymères ouvre de nouvelles possibilités dans les domaines de l'isolation thermique et de la décontamination de l'eau.

#### *II.5.3. Perspectives d'évolution et d'adoption à plus grande échelle*

Les géopolymères avec déchets présentent un potentiel prometteur pour une adoption à plus grande échelle dans l'industrie de la construction. Leur impact environnemental positif,

leur durabilité et leurs performances techniques en font une alternative attrayante aux matériaux conventionnels.

Cependant, pour une adoption plus large, certains défis doivent être relevés. Il est nécessaire de développer des normes et des réglementations appropriées pour garantir la qualité et la fiabilité des géopolymères avec déchets. De plus, des études économiques approfondies sont nécessaires pour évaluer leur viabilité financière et leur compétitivité sur le marché.

Malgré ces défis, les perspectives d'évolution des géopolymères avec déchets restent encourageantes. L'engagement croissant en faveur de la durabilité et de la gestion des déchets dans l'industrie de la construction ainsi que les avancées constantes dans la recherche et le développement ouvrent la voie à une adoption plus large de ces matériaux. Ils pourraient jouer un rôle clé dans la transition vers une construction plus durable et respectueuse de l'environnement.

### **II.6. Conclusion**

L'utilisation des déchets dans la fabrication des géopolymères revêt une importance significative à plusieurs niveaux. Tout d'abord, elle permet de résoudre le problème croissant de la gestion des déchets, en transformant des matériaux qui seraient autrement destinés à la décharge en ressources précieuses. Cela contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction de l'empreinte écologique de l'industrie de la construction.

Ensuite, l'utilisation des déchets dans les géopolymères favorise la transition vers une économie circulaire, où les déchets deviennent des matières premières pour de nouveaux produits. Cela stimule l'innovation et encourage l'adoption de pratiques plus durables dans l'industrie.

En fin, l'utilisation des déchets dans la fabrication des géopolymères est une approche prometteuse qui combine à la fois des avantages environnementaux, économiques et techniques. Elle offre des solutions durables pour l'industrie de la construction, en réduisant les déchets, en préservant les ressources et en contribuant à la construction d'un avenir plus durable.

## **CHAPITRE III**

## CHAPITRE III : Etude Expérimentale

### III.1. Introduction

La qualité et les performances d'un mortier géopolymère dépendent largement des matériaux utilisés dans sa composition. Ainsi, il est crucial de normaliser les méthodes d'essai et d'identification de la composition des mortiers géopolymères conformément aux normes en vigueur afin d'obtenir des résultats comparables à ceux présentés dans la littérature scientifique. Ce chapitre décrit les différents matériaux employés pour la fabrication des mortiers étudiés et les essais réalisés selon les normes et les pratiques en vigueur.

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont des matériaux locaux, et leurs propriétés ont été expérimentalement évaluées dans le Laboratoire de Chimie et Génie Civil de l'Université EL BACHIR EL IBRAHIMI Bordj Bou Arreridj.

### III.2. Sable

Pour caractériser les matériaux utilisés, plusieurs tests ont été effectués, notamment l'analyse granulométrique par tamisage, la mesure de la masse volumique, du module de finesse et de l'équivalent de sable. Les propriétés physiques du sable ont été recueillies et sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 Différentes caractéristiques du sable utilisé.

<b>Equivalent de sable [NA EN 933-8]</b>	<b>Module de finesse</b>	<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>) [NA EN 1097-6]</b>	<b>Masse volumique apparente(g/cm<sup>3</sup>) [NA EN 1097-6]</b>
86,39%	2,072	2,620	1,551

L'équivalent de sable est une mesure qui évalue la pureté d'un sable en indiquant la quantité de particules fines d'origine argileuse, végétale ou organique qui se trouvent à la surface des grains. Le tableau 1 présente les valeurs de l'équivalent de sable selon la norme 933-8+A1 de 2015. Selon les résultats de ce tableau, on peut conclure que le sable utilisé est de très bonne qualité et présente une faible quantité de particules fines.

➤ *Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1]*

## CHAPITRE III : Etude Expérimentale

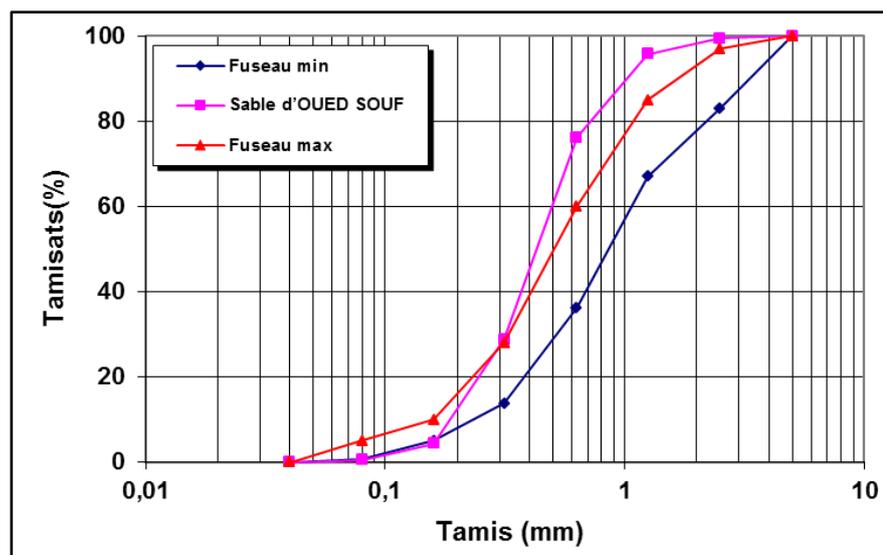


Fig. 3 Courbe granulométrique du sable de dune

Il est notable que le sable que nous avons utilisé se situe dans la plage d'équivalence recommandée, ce qui indique que ce sable est tout à fait approprié pour être utilisé dans la préparation d'un mortier.

### III.3. Activateurs

#### III.3.1. Silicate de sodium liquide

Le fournisseur du silicate de sodium utilisé dans cette étude est ARES, situé à SIDI AISSA M'SILA. Les propriétés physico-chimiques de ce produit sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 Caractéristiques chimiques du silicate de sodium.

Compositions chimiques	Résultat d'analyse
SiO <sub>2</sub>	29,8
Na <sub>2</sub> O	14,43
PH	13,01
Densité à 20° C (en g/cm <sup>3</sup> )	1,53
Concentration (%)	45
R=(SiO <sub>2</sub> ) /Na <sub>2</sub> O	2,06
Degré Baume	50,2

## CHAPITRE III : Etude Expérimentale

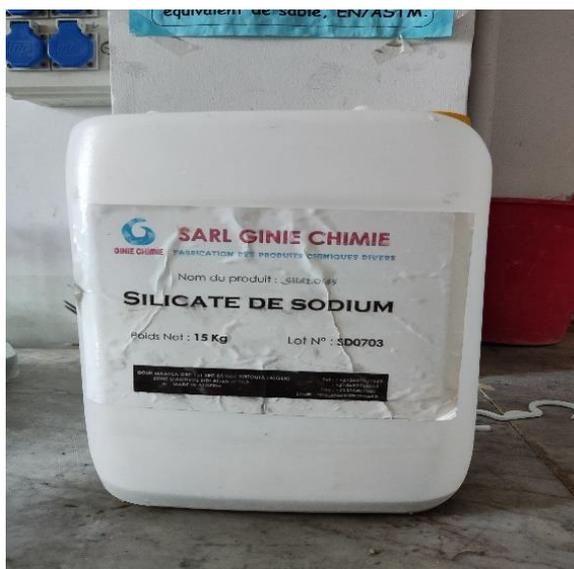


Fig. 4 Silicate de sodium.

### III.3.2. NaOH

Le laboratoire SPECILAB a fourni le NaOH utilisé dans cette étude. Ce produit est distribué par la société PROCHIMA SIGMA, qui est basée à Tlemcen en Algérie.



Fig. 5 NaOH

#### III.3.2.1. Propriétés physiques

L'hydroxyde de sodium est un solide blanc, sans odeur, très hygroscopique et déliquescent. Les impuretés les plus courantes sont le chlorure de sodium ( $\leq 2\%$ ), le carbonate

### CHAPITRE III : Etude Expérimentale

de sodium ( $\leq 1,0$  %) et le sulfate de sodium ( $\leq 0,2$  %). L'hydroxyde de sodium se mélange parfaitement avec l'eau à n'importe quelle proportion, mais il se solidifie à 20°C si la concentration dépasse 52 % en poids. Cette valeur est considérée comme la solubilité maximale dans l'eau à 20°C. L'hydroxyde de sodium est très soluble dans les alcools tels que le méthanol, l'alcool absolu et le glycérol. Il est insoluble dans l'acétone et l'éther éthylique. Ce produit est généralement livré sous forme solide (sous forme de blocs, d'écaillés, de grains, de perles ou de poudre) ou sous forme de solutions aqueuses à différentes concentrations.

Tableau 3 Caractéristiques physiques de NaOH.

Nom Substance	Détails
Hydroxyde de sodium	Formule NaOH
	N° CAS 1310-73-2
	Etat physique : Solide
	Masse molaire : 40,01
	Point de fusion 318 °C (solide, 100 %) 140 °C (solution à 80 %) 16 °C (solution à 40 %) - 26 °C (solution à 20 %)
	Point d'ébullition 1 390 °C (solide, 100 %) 216 °C (solution à 80 %) 128 °C (solution à 40 %) 118 °C (solution à 20 %)
	Densité : 2,13 (solide, 100 %) 1,43 (solution à 40 %) 1,22 (solution à 20 %)
	Pression de vapeur < 10 hPa à 25 °C (calculée)

#### III.3.2.2. Propriétés chimiques

L'hydroxyde de sodium est un produit extrêmement sensible à l'humidité qui absorbe rapidement l'humidité de l'air. En même temps, il réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former du carbonate de sodium. Lorsqu'il est dissous dans l'eau, l'hydroxyde de sodium produit une libération de chaleur très importante, et la réaction peut même être violente. Les solutions aqueuses d'hydroxyde de sodium libèrent également de la chaleur lorsqu'elles sont diluées, en particulier lorsqu'elles sont diluées à des concentrations élevées. Par exemple, une solution à 40 % ou plus d'hydroxyde de sodium peut générer une grande quantité de chaleur lors de sa dilution dans l'eau, ce qui peut conduire à des projections de liquide corrosif incontrôlables et dangereuses. Il est donc important de prendre des précautions lors des opérations de dissolution ou de dilution de l'hydroxyde de sodium. Les solutions aqueuses d'hydroxyde de sodium sont très alcalines, et elles réagissent vigoureusement avec les acides en raison de leur forte basicité.

### III.4. Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier granulé utilisé dans cette étude est un sous-produit de la fonderie d'El-Hadjar Annaba. Il a été broyé pendant 1h et 30 min au laboratoire de la cimenterie de Ain Elkabira/Sétif à l'aide d'un broyeur horizontal à boulets de type BURBERS. Les caractéristiques physiques et chimiques de ce laitier sont présentées dans le tableau III.4



Fig. 6 Broyage du laitier

Tableau 4 Propriétés physiques de laitier.

	<b>PAF</b>	<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>L</b>	1.03	4155	3.08

### III.3. Les fines traitées

Les fines de mortier recyclées ont été générées à partir de mortier provenant d'échantillons écrasés, puis broyées et placées dans un broyeur à billes. Ensuite, les fines obtenues ont été soumises à un traitement thermique dans un four à haute température. La température a été augmentée de 10 °C/min à partir de la température ambiante (20 °C) jusqu'à atteindre 650 °C. Cette température a été maintenue pendant 3 heures afin d'assurer une activation adéquate des fines.

Le processus de génération de fines traitées à partir de mortier recyclé et leur traitement thermique sont des étapes essentielles dans la valorisation des déchets de construction. En soumettant les fines de mortier à une température élevée, on favorise leur activation, ce qui

### CHAPITRE III : Etude Expérimentale

améliore leurs propriétés et leur rendement dans diverses applications. L'activation thermique permet de libérer les composants réactifs des fines, ce qui peut améliorer leur réactivité et leur adhérence dans les matériaux de construction.

En maintenant la température à 650 °C pendant 3 heures, on garantit une activation suffisante des fines. Cette durée permet aux composants du mortier de subir des transformations chimiques bénéfiques, renforçant ainsi leurs propriétés mécaniques et leur capacité à agir comme liants dans les mélanges de matériaux de construction.

#### III.5. Formulation des géopolymères

La formulation des géopolymères demeure encore approximative aujourd'hui. En effet, plusieurs chercheurs, tels que Davidovit [1] ont élaboré des méthodes les plus efficaces pour obtenir un mélange de géopolymères qui peut offrir des caractéristiques optimales tout en permettant une bonne revalorisation des déchets existants. Dans notre étude expérimentale, nous avons ajouté différents dosages (10%, 20% et 30% par rapport au laitier) de fines recyclées dans les mortiers. La composition de différents mortiers confectionnés est illustrée dans le tableau 5.

Tableau 5 Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.

	<b>M-C</b>	<b>M-10F</b>	<b>M-20F</b>	<b>M-30F</b>	<b>M-10CF</b>	<b>M-20CF</b>	<b>M-30CF</b>
<b>Laitier(g)</b>	504,36	454	403,5	353,05	454	403,5	353,05
<b>Fine recyclée(g)</b>	0	50,43	100,87	151,31	0	0	0
<b>Fine recyclée calcinée(g)</b>	0	0	0	0	50,43	100,87	151,31
<b>Sable(g)</b>	1261	1261	1261	1261	1261	1261	1261
<b>NaOH(g)</b>	88,262	88,262	88,262	88,262	88,262	88,262	88,262
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(g)</b>	264,794	264,794	264,794	264,794	264,794	264,794	264,794

### III.6. Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes

#### III.6.1. Malaxage du mortier

Nous procédons à un malaxage mécanique de chaque batch de mortier géopolymère à l'aide d'un malaxeur spécifique pour les mortiers.



Fig. 7 Malaxeur à mortier

- Tout d'abord on a mélangé les poudres ( laitier et fine recyclée ) à l'état sec.
- Puis on mis le mélange dans la cuve.
- En ajoutant la solution chimique ( NaOH et NaSiO<sub>4</sub> ) , qui été déjà préparé un jour à l'avance.

Pour préparer la solution chimique en mélangeant la silicate de sodium, l'hydroxyde de sodium et l'eau. Puis on mixe la solution à l'aide d'un afitateur.

- En mélange les composants 30s avec une vitesse lente, après on rajoute le sable avec des petites quantité en 30s.
- Le malaxage sera avec une vitesse rapide pendant 30s. Arrêter le malaxage puis racler pendants 15 secondes.
- Finalement, mettre en marche le malaxeur pendant 1 minutes supplémentaires.

## CHAPITRE III : Etude Expérimentale

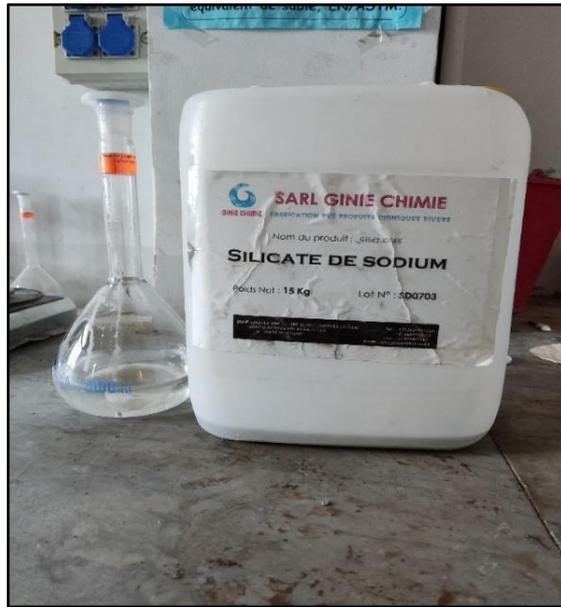


Fig. 8 Préparation de la solution chimique

### III.6.2. Préparation des éprouvettes

- Les éprouvettes sont de forme rectangulaire (40 mm × 40 mm × 160 mm).
- Les moules doivent être huilés avant le coulage.
- La mise en place doit être par couche et on utilise la table vibrante pour un mortier moins de pores.
- Le démoulage doit être après 24 heures depuis le coulage.



Fig . 9 Les moules

## CHAPITRE III : Etude Expérimentale



Fig . 10 Les mortiers confectionnés

### III.6.3. Conservation

Les moules contenant les échantillons de mortier ont été enveloppés d'un film plastique et placés dans un environnement de laboratoire pour permettre la détermination des propriétés mécaniques et physiques. Après une période de 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés dans des boîtes en plastique jusqu'aux tests qui seront réalisés après 28 jours.

## III.7. Résistances mécaniques

### III.7.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression du mortier est mesurée en utilisant des nombres semi-premiers. Un demi-prisme est positionné entre les deux plateaux du dispositif MATEST, et une charge est appliquée à une vitesse constante de 0,05 MPa/s jusqu'à ce que le mortier se rompe. Nous enregistrons la valeur de la charge d'écrasement (p) ainsi que la résistance de l'appareil (exprimée en MPa).



Fig . 11 Essai de compression

## CHAPITRE III : Etude Expérimentale

### III.7.2. Résistance à la flexion

Pour évaluer la résistance à la flexion par traction des mortiers, nous avons utilisé une presse hydraulique MATEST, conformément à la norme NF EN 196-1. Pour chaque composition, nous avons fabriqué trois prismes de dimensions 40x40x160 mm<sup>3</sup>. Après un durcissement de 28 jours, les échantillons ont été soumis à un essai de flexion à trois points. La vitesse de chargement était de 0,5 MPa par seconde pour certains essais et de 0,05 MPa par seconde pour d'autres, comme indiqué dans la figure correspondante.

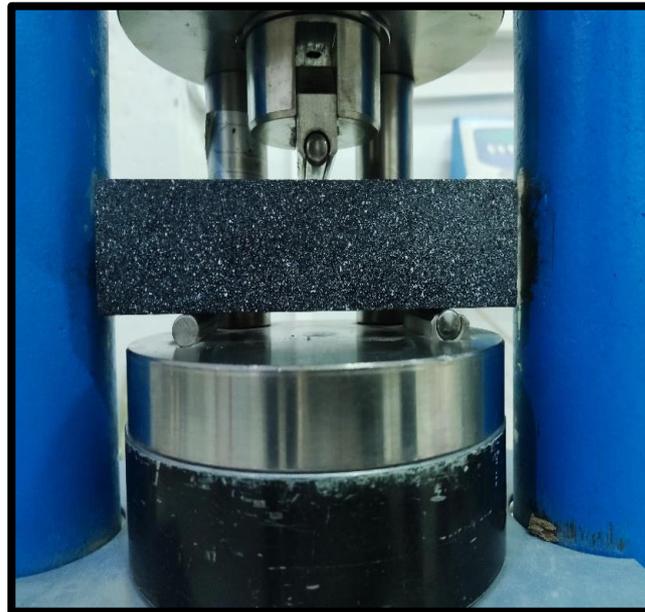


Fig . 12 Essai de flexion

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la caractérisation de diverses combinaisons de matériaux de base conformément aux normes et recommandations des mortiers géopolymères. En respectant ces directives, nous pouvons plus aisément adopter la méthode de formulation appropriée. L'examen de ces propriétés spécifiques des composants nous aide à comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges dans différentes conditions de contrainte

## **CHAPITRE IV**

## CHAPITRE IV : Discussion des Résultats

### IV.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude des résultats de résistance à la compression, à la flexion et d'absorption d'eau des geopolymères contenant des fines recyclées, qu'elles soient traitées ou non thermiquement. L'objectif est d'évaluer l'impact de ces fines sur les performances des geopolymères, en termes de résistance mécanique et de capacité à absorber l'eau.

Les tests de résistance à la compression et à la flexion fournissent des informations essentielles sur la capacité du matériau à supporter des charges et à résister aux contraintes. En comparant les résultats de ces tests entre les geopolymères contenant des fines recyclées et ceux sans fines, nous pouvons évaluer l'influence de ces fines sur les propriétés mécaniques des matériaux. De plus, l'absorption d'eau est un indicateur important de la porosité et de la durabilité des geopolymères, et son évaluation nous permettra de comprendre l'effet des fines sur la perméabilité et la résistance à l'eau des matériaux.

Nous examinerons également l'effet du traitement thermique des fines recyclées sur les propriétés des geopolymères. Le traitement thermique peut éliminer les impuretés et améliorer la pureté des fines, ce qui peut potentiellement influencer leurs performances dans les geopolymères.

En explorant les résultats de résistance à la compression, à la flexion et d'absorption d'eau des geopolymères contenant des fines recyclées, nous pourrions évaluer l'efficacité de l'utilisation de ces fines comme matériau de substitution dans les geopolymères. Ces résultats contribueront à améliorer notre compréhension des propriétés des geopolymères et à optimiser leur formulation pour des applications futures dans le domaine de la construction durable.

### IV.2. Résistance à la flexion

Figure 13 Représente la résistance à la flexion des différents geopolymeres utilisés.

## CHAPITRE IV : Discussion des Résultats

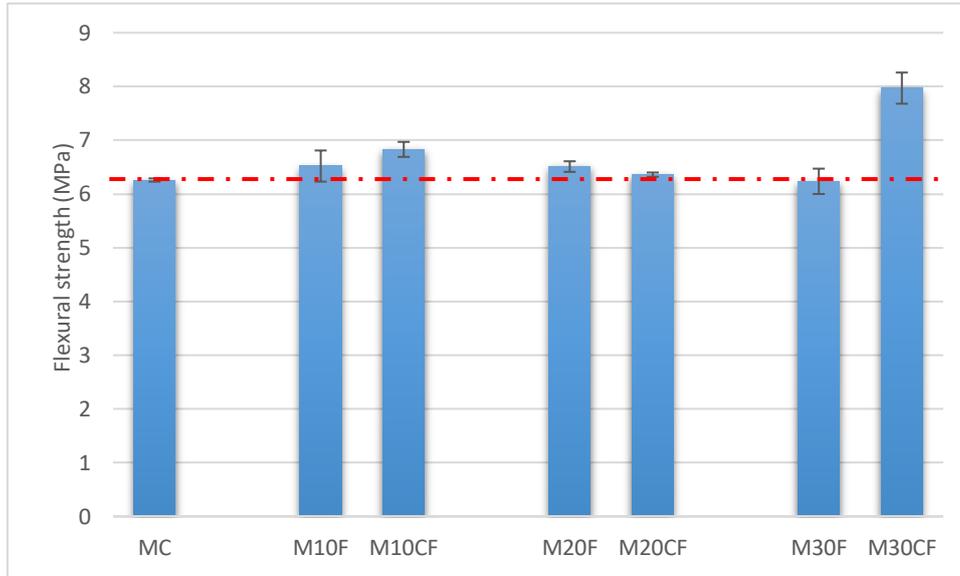


Fig . 13 Résistance à la flexion

Les résultats des essais de résistance à la flexion indiquent que l'incorporation de fines recyclées non traitées thermiquement en remplacement partiel du laitier n'a pas eu d'impact significatif sur la résistance à la flexion des mortiers obtenus. En fait, les valeurs de résistance à la flexion des mortiers contenant des FR (M10F, M20F et M30F) étaient comparables à celles du groupe témoin (MC), la valeur la plus élevée étant enregistrée pour M20F (6,51 MPa). En revanche, l'introduction de FR activées traitées thermiquement (M10CF, M20CF et M30CF) a conduit à une amélioration substantielle de la résistance à la flexion des mortiers géopolymères obtenus. La valeur de résistance la plus élevée a été observée pour M30CF (7,97 MPa), représentant une augmentation de 21,5 % et 22,5 % par rapport à MC et M30F, respectivement. Cette amélioration significative peut être attribuée à plusieurs facteurs. Le processus de traitement thermique élimine les composés organiques et autres impuretés des fines, ce qui augmente la pureté du matériau et améliore ses propriétés physiques. Cette amélioration des propriétés physiques des FR améliore l'adhérence et les caractéristiques mécaniques du mortier géopolymère, augmentant ainsi sa résistance à la flexion. De plus, l'augmentation de la résistance à la flexion observée dans les mortiers géopolymères incorporant des pourcentages plus élevés de FR activées thermiquement peut être attribuée à la présence accrue d'alumine réactive, de silice et de CaO dans les fines. Ces composants réactifs contribuent au processus de géopolymérisation et à la formation du gel géopolymère, améliorant ainsi les propriétés mécaniques du mortier géopolymère. Selon plusieurs auteurs [8], [9], [33], l'augmentation de la résistance n'est pas seulement due à la réorganisation rapide de la phase déshydratée (comprenant CaO et des composés d'aluminium déshydratés), mais aussi à la réhydratation

## CHAPITRE IV : Discussion des Résultats

progressive de la phase C-S-H composée de C2S actif déshydraté et polycristallin métastable amorphe. Cette découverte est en accord avec les conclusions présentées dans la section 3.2.

### IV.2. Résistance à la compression

La Figure IV.2 présente les valeurs de résistance à la compression des divers géopolymères utilisés.

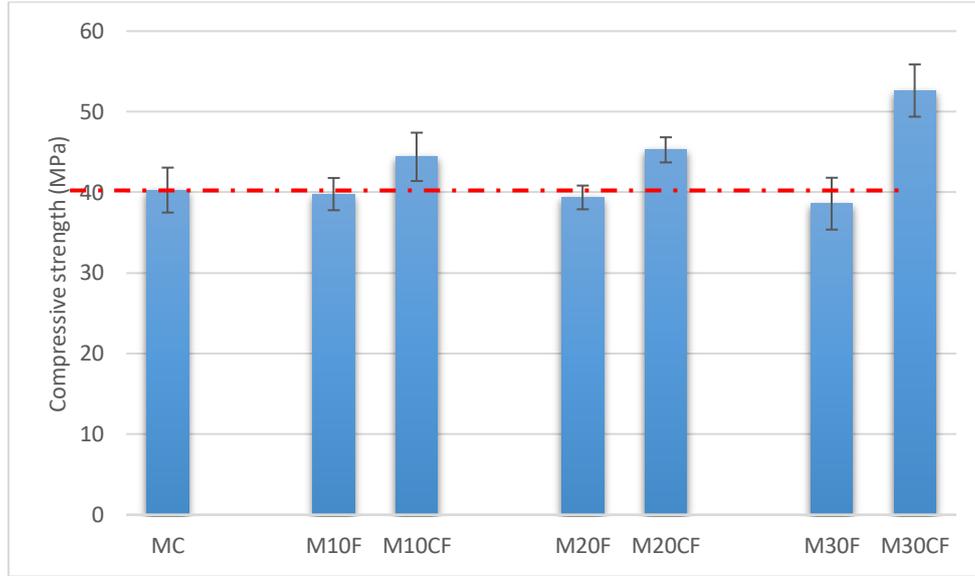


Fig . 14 Résistance à la compression

Les résultats des essais de résistance à la compression montrent que l'incorporation de fines de mortier recyclé dans les mortiers géopolymères a entraîné une diminution de la résistance à la compression par rapport au mélange de référence (MC). Les valeurs de résistance à la compression des mélanges contenant des fines de mortier recyclé (M10F, M20F et M30F) étaient respectivement de 39,78 MPa, 39,36 MPa et 38,59 MPa, tandis que le mélange de référence avait une résistance à la compression de 40,27 MPa. La réduction de la résistance à la compression observée dans les mortiers géopolymères avec l'incorporation de fines de mortier recyclé (M10F, M20F et M30F) peut être attribuée à plusieurs facteurs. Tout d'abord, les fines de mortier recyclé peuvent avoir réduit les propriétés mécaniques globales de la matrice géopolymère en raison de leur résistance inférieure par rapport au liant géopolymère à base de laitier. De plus, la porosité plus élevée des fines de mortier recyclé aurait pu entraîner la formation de vides ou de points faibles à l'intérieur de la structure géopolymère, affaiblissant ainsi la résistance à la compression globale. De plus, la présence de fines de mortier recyclé pourrait avoir contribué à la formation de microfissures à l'intérieur de la structure géopolymère

## CHAPITRE IV : Discussion des Résultats

en raison de leur distribution inégale et de leur compatibilité avec la matrice géopolymère [10]. Cela peut encore affaiblir la résistance à la compression des mortiers géopolymères. Il convient de noter que la réduction de la résistance à la compression était plus prononcée dans les mélanges contenant des pourcentages plus élevés de fines de mortier recyclé, indiquant un niveau d'influence plus élevé des fines de mortier recyclé sur la résistance à la compression globale. Dans l'ensemble, les résultats suggèrent que l'incorporation de fines de mortier recyclé en substitution du liant géopolymère à base de laitier peut avoir un impact négatif sur la résistance à la compression des mortiers géopolymères résultants.

Cependant, les mélanges contenant des fines de mortier recyclé traitées thermiquement (M10CF, M20CF et M30CF) ont montré une amélioration de la résistance à la compression par rapport au mélange de référence. Les valeurs de résistance à la compression des mélanges traités thermiquement étaient respectivement de 44,40 MPa, 45,27 MPa et 52,62 MPa, ce qui représente une augmentation de la résistance à la compression pouvant aller jusqu'à 30,6% par rapport au mélange de référence. Cette amélioration peut être attribuée à plusieurs facteurs. Tout d'abord, le processus de traitement thermique a éliminé toute matière organique présente dans les fines de mortier recyclé, ce qui aurait pu contribuer à la faiblesse de la structure géopolymère. La matière organique peut créer des vides ou des points faibles à l'intérieur de la structure géopolymère [9].

### IV.3. Absorption d'eau

La Figure 15 illustre les résultats de l'absorption d'eau obtenus pour les différents géopolymères utilisés.

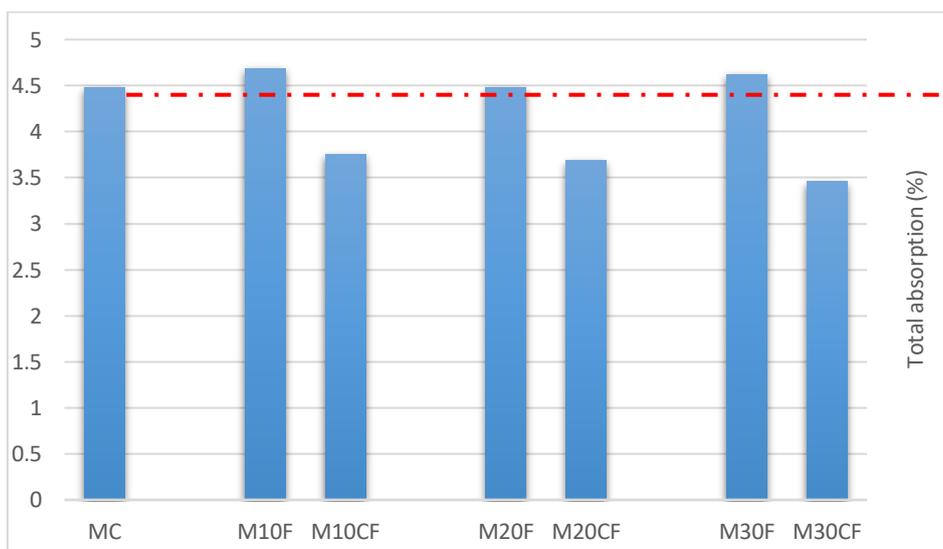


Fig . 15 Absorption d'eau

## CHAPITRE IV : Discussion des Résultats

Les résultats des tests d'absorption totale indiquent que l'incorporation de fines recyclées non traitées thermiquement (FR) en remplacement partiel du laitier n'a pas eu d'impact significatif sur l'absorption totale des mortiers obtenus. En fait, les valeurs d'absorption totale des mortiers contenant des FR (M10F, M20F et M30F) étaient comparables à celles du groupe témoin (MT), la valeur la plus élevée étant enregistrée pour M10F (4,7 %).

En revanche, l'introduction de FR activées traitées thermiquement (M10CF, M20CF et M30CF) a conduit à une diminution substantielle de l'absorption totale des mortiers géopolymères obtenus. La valeur d'absorption totale la plus faible a été observée pour M30FC (3.5%), représentant une diminution de 32 % par rapport à MT. Cette diminution significative peut être attribuée à plusieurs facteurs. Le processus de traitement thermique élimine les composés organiques et autres impuretés des fines, ce qui augmente la pureté du matériau et améliore ses propriétés physiques. Cette amélioration des propriétés physiques des FR améliore la compacité du mortier géopolymère.

De plus, la diminution de l'absorption totale observée dans les mortiers géopolymères incorporant des pourcentages plus élevés de FR activées thermiquement peut être attribuée à la présence accrue d'alumine réactive, de silice et de CaO dans les fines. Ces composants réactifs contribuent au processus de géopolymérisation et à la formation du gel géopolymère, améliorant ainsi les propriétés mécaniques du mortier géopolymère.

### IV.4. Relation entre la résistance à la compression et à l'absorption d'eau

La Figure 16 présente les données relatives à la relation entre la résistance à la compression et l'absorption d'eau des géopolymères étudiés.

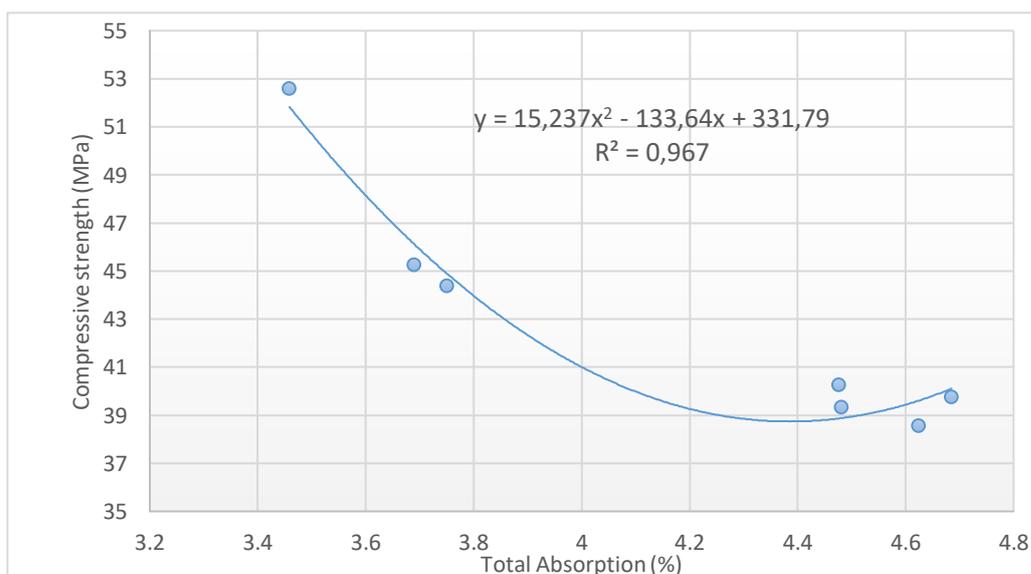


Fig . 16 Relation entre l'absorption totale et la résistance à la compression

## CHAPITRE IV : Discussion des Résultats

Lorsqu'on étudie la relation entre l'absorption totale et la résistance à la compression des mortiers, une fonction polynomiale avec un coefficient de corrélation élevé de  $R^2=0,96$  suggère une forte corrélation entre ces deux variables. Cela signifie que l'absorption totale est un bon indicateur de la résistance à la compression.

Une fonction polynomiale peut être utilisée pour modéliser cette relation, ce qui implique qu'il existe une relation non linéaire entre l'absorption totale et la résistance à la compression. La forme exacte de la fonction polynomiale dépendra des données spécifiques et de leur distribution.

Un coefficient de corrélation élevé de 0,96 indique que 96% de la variation observée dans la résistance à la compression peut être expliquée par la variation de l'absorption totale. En d'autres termes, il y a une forte association entre ces deux variables, et l'absorption totale peut servir de prédicteur fiable de la résistance à la compression des mortiers.

Cependant, il est important de noter que cette interprétation est basée sur les données spécifiques utilisées pour calculer le coefficient de corrélation. Il est essentiel de prendre en compte d'autres facteurs et d'effectuer des analyses supplémentaires pour confirmer cette relation et garantir sa validité dans d'autres contextes.

### IV.5. Conclusion

En conclusion, l'étude des résultats de résistance à la compression, à la flexion et d'absorption d'eau des géopolymères contenant des fines recyclées, traitées ou non thermiquement, nous permet de tirer des conclusions importantes sur les performances de ces matériaux alternatifs et durables.

Nos résultats ont montré que l'incorporation de fines recyclées, qu'elles soient traitées thermiquement ou non, n'a pas eu d'impact significatif sur la résistance à la flexion des mortiers géopolymères. Cependant, l'introduction de fines recyclées traitées thermiquement a conduit à une amélioration substantielle de la résistance à la flexion des mortiers géopolymères obtenus. Cela peut être attribué à l'élimination des composés organiques et des impuretés, ce qui améliore la pureté du matériau et renforce ses propriétés physiques. L'amélioration des propriétés physiques des fines recyclées activées thermiquement a également augmenté l'adhérence et les caractéristiques mécaniques des mortiers géopolymères, améliorant ainsi leur résistance à la flexion.

## CHAPITRE IV : Discussion des Résultats

De plus, nous avons constaté que l'augmentation de la résistance à la flexion observée dans les mortiers géopolymères incorporant des pourcentages plus élevés de fines recyclées traitées thermiquement peut être attribuée à la présence accrue d'alumine réactive, de silice et de CaO dans les fines. Ces composants réactifs favorisent le processus de géopolymérisation et la formation d'un gel géopolymère, ce qui améliore les propriétés mécaniques du mortier géopolymère.

Par conséquent, l'ajout de fines recyclées traitées thermiquement représente une stratégie prometteuse pour améliorer les performances mécaniques et physiques des mortiers géopolymères. Cette approche permet non seulement de valoriser les déchets industriels et de réduire l'empreinte environnementale, mais aussi d'obtenir des matériaux de construction plus résistants et durables.

Il est essentiel de souligner que ces conclusions sont basées sur les résultats spécifiques de notre étude et doivent être confirmées par des recherches supplémentaires et des analyses approfondies. Cependant, ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation des fines recyclées traitées thermiquement dans le développement de matériaux de construction plus performants et respectueux de l'environnement.

En définitive, l'incorporation de fines recyclées traitées thermiquement offre de réels avantages en termes d'amélioration des performances mécaniques et physiques des mortiers géopolymères, contribuant ainsi à une construction plus durable et à la préservation de l'environnement.

**CONCLUSION GENERALE**

# Conclusion générale

L'industrie de la construction joue un rôle crucial dans notre société moderne en façonnant nos infrastructures et notre environnement bâti. Cependant, elle est également confrontée à des défis environnementaux majeurs, notamment une consommation excessive de ressources naturelles et une production importante de déchets. Pour atténuer l'impact environnemental de cette industrie, il est impératif de repenser nos pratiques de construction et de promouvoir l'utilisation de matériaux durables et respectueux de l'environnement.

L'utilisation de fines recyclées de mortier traitées thermiquement dans les géopolymères présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet de réduire la quantité de déchets de construction envoyés en décharge, favorisant ainsi une gestion plus responsable des déchets et limitant leur impact sur l'environnement. De plus, cette approche contribue à la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre associées à la production de matériaux de construction conventionnels.

Les géopolymères fabriqués à partir de fines recyclées de mortier traitées thermiquement présentent des propriétés mécaniques et physiques satisfaisantes, ce qui en fait une alternative viable aux matériaux traditionnels. Ils offrent une résistance et une durabilité comparables, voire supérieures, tout en favorisant la réutilisation des matériaux existants. De plus, l'incorporation de ces fines dans les géopolymères contribue à la réduction de la consommation de ciment, qui est une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie de la construction.

Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les formulations et les procédés de production afin d'exploiter pleinement le potentiel des fines recyclées de mortier traitées thermiquement dans les géopolymères. Des études approfondies sur les propriétés des matériaux, leur durabilité à long terme et leur comportement dans différentes applications de construction sont essentielles pour garantir leur performance et leur acceptation sur le marché.

En conclusion, l'incorporation des fines recyclées de mortier traitées thermiquement dans la production des géopolymères représente une approche prometteuse pour promouvoir la durabilité et la circularité dans l'industrie de la construction. Cette innovation permet de

## **CONCLUSION GENERALE**

---

valoriser les déchets de construction, de réduire l'empreinte carbone et de préserver les ressources naturelles. En poursuivant les recherches et en favorisant l'adoption de ces matériaux innovants, nous pouvons contribuer à une construction plus durable et respectueuse de l'environnement.

## **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- [1] J. Davidovits, “Geopolymers and geopolymeric materials,” *Journal of thermal analysis*, vol. 35, no. 2, pp. 429–441, 1989, doi: 10.1007/BF01904446.
- [2] M. W. Barsoum, A. Ganguly, and G. Hug, “Microstructural Evidence of Reconstituted Limestone Blocks in the Great Pyramids of Egypt,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, no. 12, pp. 3788–3796, 2006, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01308.x>.
- [3] V. D. Glukhovskiy, “Soil silicates: their properties, technology and manufacturing and fields of application,” *Doct. Tech. Sc. Degree Thesis, Civil Engineering Institute, Kiev, Ukraine*, 1965.
- [4] Saloni, Parveen, Y. Y. Lim, T. M. Pham, Jatin, and J. Kumar, “Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies,” *Constr Build Mater*, vol. 283, May 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122795.
- [5] S. Nenadović *et al.*, “Structural, Mechanical and Chemical Properties of Low Content Carbon Geopolymer,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 9, May 2022, doi: 10.3390/su14094885.
- [6] F. Giacobello, I. Ielo, H. Belhamdi, and M. R. Plutino, “Geopolymers and Functionalization Strategies for the Development of Sustainable Materials in Construction Industry and Cultural Heritage Applications: A Review,” *Materials*, vol. 15, no. 5. MDPI, Mar. 01, 2022. doi: 10.3390/ma15051725.
- [7] I. Pol Segura, N. Ranjbar, A. Juul Damø, L. Skaarup Jensen, M. Canut, and P. Arendt Jensen, “A review: Alkali-activated cement and concrete production technologies available in the industry,” *Heliyon*, vol. 9, no. 5, May 2023, doi: 10.1016/J.HELIYON.2023.E15718.
- [8] E. H. Alakara, Ö. Sevim, İ. Demir, and G. Günel, “Effect of waste concrete powder on slag-based sustainable geopolymer composite mortars,” *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, vol. 13, no. 3, 2022, doi: 10.20528/cjcr.l.2022.03.003.
- [9] X. Liang and Y. Ji, “Mechanical properties and permeability of red mud-blast furnace slag-based geopolymer concrete,” *SN Appl Sci*, vol. 3, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1007/s42452-020-03985-4.
- [10] Ş. Bingöl, C. Bilim, C. D. Atiş, and U. Durak, “Durability Properties of Geopolymer Mortars Containing Slag,” *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 44, pp. 561–569, Oct. 2020, doi: 10.1007/s40996-019-00337-0.
- [11] M. Liu, R. Hu, Y. Zhang, C. Wang, and Z. Ma, “Effect of ground concrete waste as green binder on the micro-macro properties of eco-friendly metakaolin-based geopolymer mortar,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106191.
- [12] N. H. Jamil, Mohd. M. A. B. Abdullah, F. Che Pa, H. Mohamad, W. M. A. W. Ibrahim, and J. Chaiprapa, “Influences of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO and MgO in phase transformation of sintered kaolin-ground granulated blast furnace slag geopolymer,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 14922–14932, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.045>.
- [13] R. M. Kalombe, V. T. Ojumu, C. P. Eze, S. M. Nyale, J. Kevern, and L. F. Petrik, “Fly ash-based geopolymer building materials for green and sustainable development,” *Materials*, vol. 13, no. 24, pp. 1–17, Dec. 2020, doi: 10.3390/ma13245699.

- [14] S. Puligilla and P. Mondal, "Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer," *Cem Concr Res*, vol. 43, pp. 70–80, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.004>.
- [15] B. Lavanya, P. D. Kuriya, S. Suganesh, R. Indrajith, and R. B. Chokkalingam, "Properties of geopolymer bricks made with flyash and GGBS," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 872, no. 1, p. 012141, Jun. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/872/1/012141.
- [16] Z. Prošek, V. Nežerka, R. Hlůžek, J. Trejbal, P. Tesárek, and G. Karra'a, "Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines," *Constr Build Mater*, vol. 201, pp. 702–714, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.227.
- [17] E. M. Foley, J. J. Kim, and M. M. Reda Taha, "Synthesis and nano-mechanical characterization of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) made with 1.5 CaO/SiO<sub>2</sub> mixture," *Cem Concr Res*, vol. 42, no. 9, pp. 1225–1232, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.014>.
- [18] K. Almutairi, J. Nossent, D. Preen, H. Keen, and C. Inderjeeth, "The global prevalence of rheumatoid arthritis: a meta-analysis based on a systematic review," *Rheumatol Int*, vol. 41, no. 5, pp. 863–877, 2021, doi: 10.1007/s00296-020-04731-0.
- [19] V. Sata and P. Chindapasirt, "19 - Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer concrete," in *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*, F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R. Tuladhar, and A. Koutamanis, Eds., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, 2020, pp. 385–403. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00019-X>.
- [20] C. P. Ginga, J. M. C. Ongpeng, and M. K. M. Daly, "Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production," *Materials*, vol. 13, no. 13, MDPI AG, pp. 1–18, Jul. 01, 2020. doi: 10.3390/ma13132970.
- [21] Saloni, Parveen, Y. Y. Lim, T. M. Pham, Jatin, and J. Kumar, "Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies," *Constr Build Mater*, vol. 283, May 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122795.
- [22] C. L. Wong, K. H. Mo, U. J. Alengaram, and S. P. Yap, "Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobee.2020.101655.
- [23] M. Zajac, J. Skocek, P. Durdzinski, F. Bullerjahn, J. Skibsted, and M. Ben Haha, "Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance," *Cem Concr Res*, vol. 134, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106090.
- [24] F. Giacobello, I. Ielo, H. Belhamdi, and M. R. Plutino, "Geopolymers and Functionalization Strategies for the Development of Sustainable Materials in Construction Industry and Cultural Heritage Applications: A Review," *Materials*, vol. 15, no. 5, MDPI, Mar. 01, 2022. doi: 10.3390/ma15051725.
- [25] G. Bumanis, L. Vitola, I. Pundiene, M. Sinka, and D. Bajare, "Gypsum, geopolymers, and starch-alternative binders for bio-based building materials: A review and life-cycle assessment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 14, Jul. 2020, doi: 10.3390/su12145666.
- [26] A. Heath, K. Paine, and M. McManus, "Minimising the global warming potential of clay based geopolymers," *J Clean Prod*, vol. 78, pp. 75–83, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.046.

- [27] Z. Duan, S. Hou, J. Xiao, and A. Singh, "Rheological properties of mortar containing recycled powders from construction and demolition wastes," *Constr Build Mater*, vol. 237, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117622.
- [28] M. Alhawat, A. Ashour, G. Yildirim, A. Aldemir, and M. Sahmaran, "Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104104, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104104>.
- [29] M. Alhawat, A. Ashour, G. Yildirim, A. Aldemir, and M. Sahmaran, "Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 50. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2022. doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104104.
- [30] A. Mohajerani *et al.*, "Recycling waste materials in geopolymer concrete," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, no. 3. Springer Verlag, pp. 493–515, Apr. 15, 2019. doi: 10.1007/s10098-018-01660-2.
- [31] Y. Sui, C. Ou, S. Liu, J. Zhang, and Q. Tian, "Study on properties of waste concrete powder by thermal treatment and application in mortar," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 3, Feb. 2020, doi: 10.3390/app10030998.
- [32] "L'empreinte carbone du béton," *Infociments*. [Online]. Available: <https://www.infociments.fr/reduire-les-emissions-de-co2/empreinte-carbone-du-beton>
- [33] D. Neeraj Varma and S. Prasad Singh, "Recycled waste glass as precursor for synthesis of slag-based geopolymer," *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.516.