République algérienne démocratique et populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifiques
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Université Mohamed El Bachir El Iibrahimi. B.B.A
جامعة محمد البشير الابراهيمي – برج بوعريريج–
Département de Génie Civil
قسم الهندسة المدنية

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master
Filière : Génie civil
Spécialité : Matériaux en génie civil
Intitulé :

Les propriétés physico- mécaniques , des matériaux de construction a base de déchets de plastique et de la laine naturelle exposé a des températures élevées .

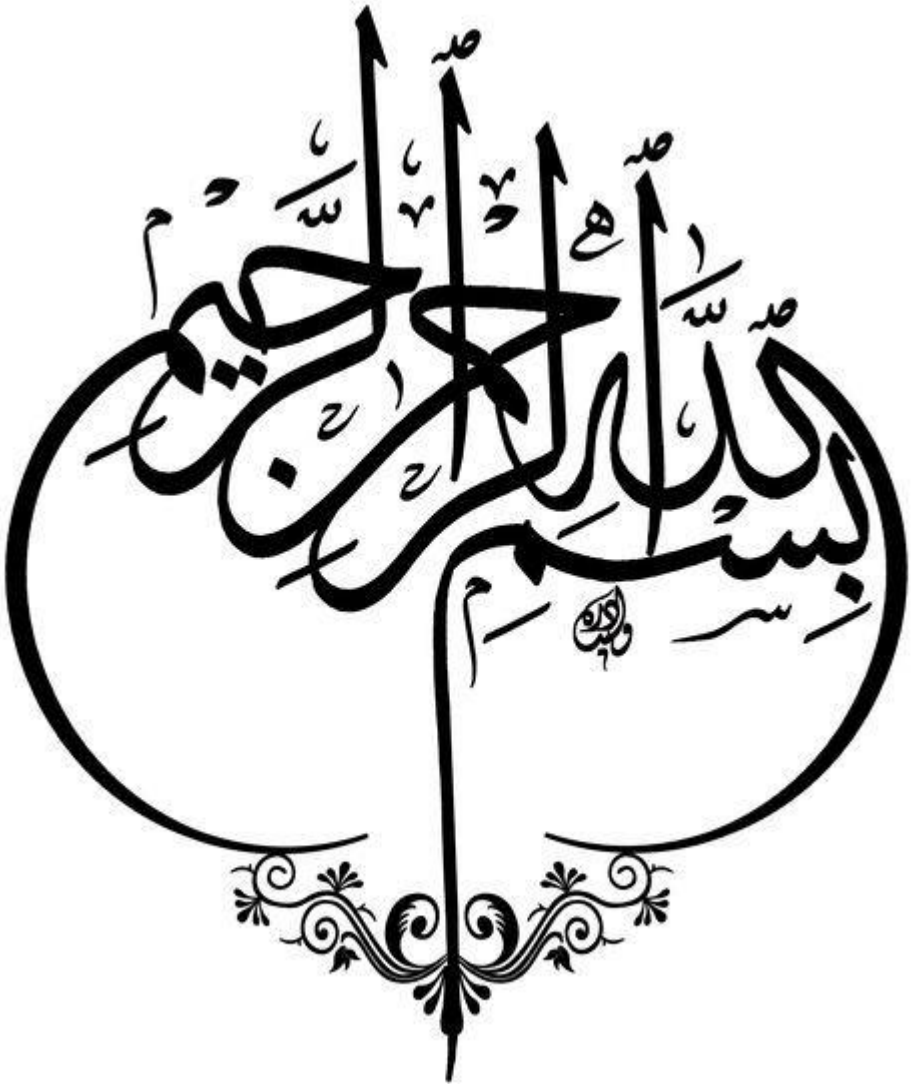
Présenté par ;Touati Meriem

Chihi Salah El Dinne

Soutenu Publiquement Le: 30/06/2025 Devant Le Jury composé de :

Nom et Prénom	*Qualité*	*Etablissement*
Dr HAMLA Wafa	*Encadrant*	*Université B.B. A*
Dr NOUI Ammar	*CO-Encadrant*	*Université B.B. A*
Dr BENAHCENE MOUNIR	*Président*	*Université B.B. A*
DEGHFEL MOUSSA	*Examinateur 1*	*Université B.B. A*
GOUFI ABDELMALEK	*Examinateur 2*	*Université B.B. A*

2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Au début je remercie Allah de m'avoir donné le courage, la détermination, le pouvoir et la patience nécessaires pour finaliser ce mémoire

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et mes remerciements à mes encadrants de mémoire, ***Dr Hamla Wafa*** *et* ***Dr Noui Ammar****, qui m'ont encadré, orienté, aidé et conseillé.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils.

Je remercie très chers ma famille, qui ont toujours été là pour moi

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à:

À la mémoire de mon pére ,

Mon premier guide et source d'iinspiration , qui continue de vivre à travers chacun de mes pas .

Qu'Allh lui accorde sa miséricorde et l'accueille dans son vaste paradis .

À ma chére mére ,

Pour son amour inconditionnel, ses priéres silencieuses et son soutien indéfectible .

Merci d'avoir toujours cru en moi .

À mes amies précieuse, Nesrine et Leila .

À tous mes enseignants,

Qui m'ont transmis leur savoir avec passion et bienveillance ,

Merci pour votre dévouement et votre inspiratio

TOUATI MERIEM

Dédicace

À Dr. Wafa Hamla, mon encadrant,

Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde gratitude. Votre confiance, votre bienveillance et vos précieux conseils ont été pour moi une source constante de motivation et d'inspiration.

Aux responsables et au chef de département de génie civil, Dr. Benouadah abdelatif

Ainsi qu'aux ingénieurs du laboratoire pédagogique, en particulier M. Farid et M. Zoubir,

À ma chère famille,

Pour votre amour, votre patience, votre encouragement indéfectible,

Ce travail vous est tout spécialement dédié.

À mes collègues et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de cette thèse,

Recevez ici l'expression de ma reconnaissance sincère.

CHIHI SALAH EL DINNE

Table des matières

Introduction générale 1

CHAPITRE I

Béton Géopolymère

1. Introduction 5
2. Historique du béton géopolymère 5
3. Définition 6
4. Constituants des géopolymères 6
5. Avantage et innovaient des béton géopolymères 8
6. Domaines d'application 9
7. Propriété des bétons géopolymères 10
8. Déchets utilisés dans les bétons géopolymères 15
9. Conclusion 19

CHAPITRE II

Matériaux et méthodes

1. Introduction 21
2. Matériaux utilisés 21
2.1. Sable 21
2.3 Laitier de haut fourneau 23
2.2. Fumée de silice 23
2.3. Déchets de plastique 24
2.4. La laine de mouton 25
2.5. Soude caustique 26
2.6. Silicates d'alcaline Na_2SiO_3 28
3. Méthodologie 29
3.1. Préparation des mélanges 29
3.2. Les essais exprimant eaux 32
3.2.1. Etalement 32
3.2.2. Absorption d'eau 33
3.2.3. Résistances à la compression 34
3.2.4. Résistances à la flexion 35

3.2.5. La vitesse d'impulsion ultrasonore 36
3.2.6. Exposition des Échantillons à Haute Température 36
4. Conclusion 37

CHAPITRE III

Résultats et discussions

1. Introduction 39
2. L'influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à la compression : 39
3. L'influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à la flexion 41
4. L'influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à l'étalement 44
5. L'influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à l'absorption d'eau 46
6. Caractérisation ultrasonique des matériaux géopolymères 48
7. Le comportement de béton géopolymère à base de FM et de déchet de plastique à haute température 50
8. Conclusion 55

Résumé

Le but de cette recherche est d'étudier l'impact de la fibre naturelle et le plastique sur les propriétés physiques mécaniques d'un béton géopolymère léger, ou une quantité de fumée de silice va être incorporé comme substituts partiels au laitier de haut fourneau dans le but d'améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons géopolymère léger. Et le granulat fin va être partiellement remplacés par des granulats de plastique et de la laine, respectivement.

L'objectif principal de cette étude c'est l'évaluation des performances mécaniques d'un béton géopolymère léger contenant des fibres de laine à des températures élevées. Les résultats indiquent que l'incorporation de déchets de plastique et la laine influence la maniabilité, la densité, la porosité et sur la résistance mécanique des géopolymères.

Ce type de travail aide à l'avancement du développement des matériaux de construction durables en examinant des méthodes novatrices pour réutiliser les résidus industriels (déchets), préparant ainsi le terrain pour des bétons écologiques plus respectueux de l'environnement.

Mots Clés:

Géopolymère, la laine, déchets de plastique, fumée de silice, résistance mécanique.

الملخص

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة تأثير الألياف الطبيعية والبلاستيك على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لخرسانة جيوبوليمرية خفيفة الوزن، حيث سيتم دمج كمية من دخان السيليكا كبديل جزئي للخبث العالي بهدف تحسين الخصائص الريولوجية والميكانيكية لهذه الخرسانة الجيوبوليمرية الخفيفة. كما سيتم استبدال الركام الناعم جزئيا بركام من البلاستيك والصوف على التوالي.

اما الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم الأداء الميكانيكي لخرسانة جيوبوليمرية خفيفة تحتوي على ألياف الصوف عند درجات حرارة مرتفعة. وتشير النتائج إلى أن دمج نفايات البلاستيك والصوف يؤثر على قابلية التشغيل، والكثافة، والمسامية، وكذلك على المقاومة الميكانيكية للجيوبوليمرات.

يساهم هذا النوع من العمل في دفع عجلة تطوير مواد البناء المستدامة من خلال دراسة طرق مبتكرة لإعادة استخدام النفايات الصناعية، مما يمهد الطريق نحو خرسانة صديقة للبيئة وأكثر استدامة.

الكلمات المفتاحية:

جيوبوليمر، الصوف، نفايات البلاستيك، دخان السيليكا، المقاومة الميكانيكية.

Abstract

The aim of this research is to study the impact of natural fiber and plastic on the physical and mechanical properties of lightweight geopolymer concrete, in which a quantity of silica fume will be incorporated as a partial substitute for blast furnace slag in order to improve the rheological and mechanical characteristics of lightweight geopolymer concrete. Fine aggregate will also be partially replaced by plastic and wool aggregates, respectively.

The main objective of this study is to evaluate the mechanical performance of lightweight geopolymer concrete containing wool fibers at high temperatures. The results indicate that the incorporation of plastic and wool waste affects the workability, density, porosity, and mechanical strength of the geopolymers.

This type of work contributes to the advancement of sustainable construction materials development by exploring innovative methods for reusing industrial waste, thereby paving the way for more environmentally friendly concrete solutions.

Keywords :
Geopolymer, wool, plastic waste, silica fume, mechanical strength.

Figures	Titres	Pages
Figure I.1	Les publications sur les géopolymères et le béton géopolymère au fil des années.	**06**
Figure I.2	Applications des matériaux géopolymères selon le rapport Si/Al	**10**
Figure 1. 3	Les principaux facteurs affectant la résistance à la compression (RC) des bétons géopolymères à l'âge de 28 jours, et le degré de leur influence	**12**
Figure I. 4	Les principaux facteurs affectant la résistance à la traction des bétons géopolymères à l'âge de 28 jours, et le degré de leur influence	**13**
Figure I. 5	Comparaison de la résistance à la traction par fendage entre le béton OPC et le béton géopolymère	**14**
Figure I. 6	Comparaison du module d'élasticité entre le béton Ciment Portland Ordinaire et le béton géopolymère à différents âges de cure.	**15**
Figure I. 7	Lavage des déchets de verre	**16**
Figure I. 8	Déchets en polyéthylène à haute densité	**18**
Figure II.1	Préparation du sable pour son utilisation dans le mélange	**22**
Figure II. 2	Analyse granulométrique	**22**
Figure II.3	Laitier de haut fourneau	**23**
Figure II.4	Fumée de silice	**24**
Figure II.5	Déchet de plastique	**24**
Figure II.6	Courbes granulométriques des déchets en plastique.	**25**
Figure II.7	Préparation de laine de mouton	**26**
Figure II.8	Préparation de la solution	**28**
Figure II.9	Silicates d'alcaline Na2SiO3	**28**
Figure II.10	Malaxage et remplissage des moules	**31**
Figure II.11	Les échantillons démoulés	**32**
Figure II.12	Essai d'étalement.	**33**
Figure II.13	Essai d'absorption d'eau	**34**
Figure II.14	Essai de la résistance à la compression	**35**
Figure II.15	Essai de la résistance à la flexion	**35**
Figure II.16	Essai de l'ultrasonique	**36**
Figure III.1	Exposition des échantillons géopolymères à haute température.	**37**
Figure III.1	Effet de la FM et le déchet de plastique sur la résistance à la compression.	**39**
Figure III.2	Effet de la FM et le déchet de plastique sur la résistance à la flexion.	**42**
Figure III.3	Écrasem ent de l'éprouvette sous l'essai flexion.	**43**
Figure III.4	Effet de la FM et le déchet de plastique sur l'étalement des géopolymères.	**45**
Figure III.5	Effet de la FM et le déchet de plastique sur l'absorption d'eau des géopolymères.	**47**

Figure III.6	Effet de la FM et le déchet de plastique sur la vitesse d'impulsion	**49**
Figure III.7	Perds de résistance du béton géopolymère soumis à haute température.	**50**
Figure III.8	Présentation des éprouvettes fabriqué après exposition au température élevée.	**52**
Figure III.9	Perds de poids du béton géopolymère soumis à haute température.	**53**

tableaux	Titres	Pages
Tableau II. 1	Propriétés physiques du sable utilisé.	**22**
Tableau II.2	Des caractéristiques Soude caustique	**27**
Tableau II.3	Caractéristiques Silicates d'alcaline	**29**
Tableau II. 4	De préparation des mélanges	**30**

Introduction générale

Introduction générale

La production du ciment augmente considérablement en Algérie grâce aux activités. De construction, les prévisions à partir de l'année 2020 tablent sur une capacité de production nationale de 40,6 millions de tonnes, répartie respectivement entre le Groupe public Industriel des Ciments d'Algérie (GICA, 20 millions de tonnes), Lafarge Holcim Algérie (11,1 millions de tonnes) et le reste sont des opérateurs privés (9,5 millions de tonnes).[1] Ce qu'il augmente la consommation de l'énergie de gaz et engendre des émissions de CO_2 à effet de serre.

Cependant ces émissions ont un impact sur notre environnement notamment le réchauffement climatique, ce qui nous a poussé à penser de trouver une solution pour réduire ce dernier. et c'est la raison pour laquelle Le développement durable est devenu une priorité mondiale dans le domaine de la construction, poussant les chercheurs et les professionnels à explorer de nouvelles approches pour réduire l'empreinte environnementale tout en améliorant les performances des matériaux de construction.

Dans ce contexte, les géopolymères émergent comme une alternative prometteuse aux bétons traditionnels, offrant des avantages significatifs en termes de durabilité, de résistance et de réduction des émissions de CO_2. [2]

Parallèlement, la gestion croissante des déchets, notamment les déchets plastiques et les sous-produits agricoles comme la laine de mouton non valorisée, représente un défi environnemental et économique majeur. L'intégration de ces déchets dans les matériaux de construction pourrait non seulement offrir une voie de valorisation durable, mais potentiellement aussi conférer de nouvelles propriétés aux bétons. Cependant, l'impact de ces ajouts sur les performances fondamentales des bétons géopolymères en particulier sur leurs propriétés mécaniques à l'état frais et durci, leur durabilité face à l'eau, et leur comportement sous des contraintes environnementales extrêmes comme les hautes températures reste à être caractérisé de manière exhaustive. De plus, les interactions complexes entre la matrice géopolymère et ces matériaux organiques, ainsi que leurs effets combinés, ne sont pas encore pleinement comprises et quantifiées.

Problématique :

Dans quelle mesure l'incorporation de fibres de laine de mouton et de déchets plastiques dans des bétons géopolymères à base de laitier de haut fourneau affecte-t-elle leurs propriétés à l'état frais et durci (maniabilité, résistance à la compression, résistance à la flexion, vitesse d'impulsion ultrasonore, absorption d'eau) et leur performance résiduelle après exposition à haute température, et quel est le compromis optimal entre la valorisation de ces déchets et les propriétés techniques du matériau ?

Pour répondre à cette problématique, les objectifs de ce mémoire sont structurés comme suit ;

Objectifs du mémoire

L'objectif principal de ce mémoire est de décrire de manière approfondie les effets des fibres de mortier et des déchets plastiques sur les propriétés du béton à haute teneur en géopolymères, y compris son coût et sa durabilité, ainsi que son comportement suite à une exposition à des températures élevées. Cette étude s'articule autour de plusieurs objectifs spécifiques, définis comme suit :

- Évaluer l'impact de l'incorporation de la laine de mouton et des déchets plastiques sur la maniabilité (à travers l'essai d'étalement) des mélanges de béton géopolymère à l'état frais.
- Déterminer l'effet de ces ajouts sur les propriétés mécaniques initiales des bétons géopolymères à température ambiante, notamment la résistance à la compression et la résistance à la flexion.
- Quantifier l'influence des déchets de laine de mouton et de plastique sur l'intégrité interne du matériau en mesurant la vitesse d'impulsion ultrasonore.
- Analyser l'impact de ces additions sur la durabilité du béton vis-à-vis de l'eau en mesurant le taux d'absorption d'eau.
- Caractériser le comportement résiduel des bétons géopolymères modifiés après exposition à différentes températures élevées (200°C, 400°C, 600°C, 800°C), en mesurant la résistance à la compression résiduelle et la perte de masse.

- Comparer les performances des mélanges modifiés par rapport au béton géopolymère de référence, afin d'identifier les dosages optimaux et d'évaluer les compromis techniques associés à la valorisation de ces déchets.
- Proposer des applications potentielles pour les bétons géopolymères développés, en tenant compte de leurs propriétés spécifiques.

Plan du mémoire

Ce mémoire est structuré en trois chapitre afin de répondre aux objectifs fixés. Le premier chapitre présentera une revue de la littérature consacrée aux géopolymères, aux types de déchets utilisés dans leur formulation, ainsi qu'aux propriétés des mélanges géopolymère.

Le deuxième chapitre explore en détail la méthodologie expérimentale de l'étude. Il présente tous les matériaux utilisés, allant du précurseur géopolymère et de l'activateur jusqu'aux déchets valorisés, tout en décrivant leurs caractéristiques. Ensuite, la procédure pour élaborer les différents mélanges de béton géopolymère est expliquée, suivie d'une présentation des tests réalisés pour évaluer les propriétés à l'état frais, et à l'état durci, ainsi que le comportement sous haute température.

Le chapitre numéro 3 constitue le cœur de l'étude, où les données expérimentales collectées sont présentées, analysées et interprétées. Il détaille les performances des différents bétons géopolymères, tant à l'état frais (maniabilité) qu'à l'état durci (résistances à la compression et à la flexion, vitesse d'impulsion ultrasonore, absorption d'eau), ainsi que leur comportement sous exposition à haute température. Une analyse critique des résultats met en lumière l'influence spécifique et combinée de la laine de mouton et des déchets plastiques sur chaque propriété.

Finalement la conclusion de ce mémoire récapitulera les résultats essentiels de l'étude, en mettant en lumière les contributions scientifiques concernant le comportement des bétons géopolymères à base des fibres de laine et des déchets plastiques. Elle mettra également en avant les principales implications de ces résultats, tout en proposant des pistes pour de futures recherches et des applications concrètes.

CHAPITRE I
Béton Géopolymère

1. Introduction

La production continue de ciment a entraîné une augmentation des émissions de CO_2 dans l'atmosphère, exacerbant ainsi la problématique du réchauffement climatique, qui a des répercussions délétères sur l'environnement. En conséquence, il est devenu impératif d'adopter une approche plus durable ainsi que de procéder à un examen approfondi des adjuvants actuellement utilisés en substitution du béton conventionnel. Dans cette optique, de nombreuses études concernant le béton géopolymère, qui affichent une durabilité comparable voire supérieure ainsi qu'une résistance significative par rapport au béton traditionnel, ont été réalisées par divers chercheurs.

Dans ce chapitre, nous aborderons les généralités concernant les bétons géopolymères, ainsi que leurs propriétés à l'état frais, leurs propriétés mécaniques et les déchets utilisés dans la formulation des géopolymères.

2. Historique du béton géopolymère

L'analyse des géopolymères dans le cadre de la recherche internationale contemporaine connaît une croissance significative, notamment depuis l'année 2010, comme l'illustre l'histogramme présenté en Figure (I. 1) [3] l'origine, l'idée de concevoir une structure de ressources géopolymères a été avancée en 1979 par le chercheur français J. Davidovits [4].

Bien qu'initialement, ces sujets n'aient pas suscité un intérêt considérable de la part des scientifiques et des chercheurs, il convient de noter qu'au cours des douze dernières années, on a observé une augmentation exponentielle du nombre de publications consacrées à divers aspects de l'étude des matériaux géo polymères ainsi qu'aux différentes technologies associées à leur production. Le béton géopolymère constitue une innovation récente dans le domaine de la production de béton à l'échelle mondiale, où le ciment Portland ordinaire est intégralement remplacé par des matériaux aluminosilicatés, lesquels sont activés par des solutions alcalines puissantes afin de servir de liant dans le béton [5]

Cette technologie a récemment suscité un intérêt considérable de la part des chercheurs en raison de ses avantages environnementaux, tels que la réduction des émissions de CO2 et la diminution de l'épuisement des ressources naturelles [6]. Par ailleurs, les matériaux géopolymères peuvent être considérés comme une alternative au ciment en raison de leur

durabilité supérieure et de leurs propriétés mécaniques avancées. Leur utilisation connaît une croissance rapide chaque jour, en réponse à l'augmentation des besoins en logements et en activités économiques.

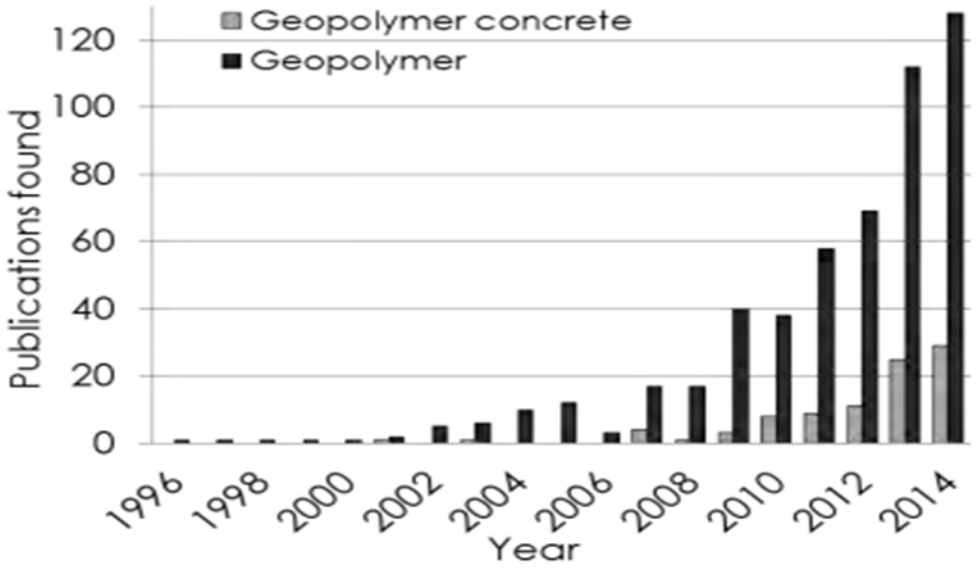


Figure I.1 : Les publications sur les géopolymères et le béton géopolymère au fil des années.

3. Définition

Le béton géopolymère représente un matériau de construction novateur et respectueux de l'environnement, pourrait être une alternative au béton de ciment Portland ordinaire [7].

Le béton géopolymère peut être élaboré par la polymérisation des aluminosilicates, tels que les cendres volantes, le méta kaolin, les scories, les cendres de balle de riz ainsi que les cendres de bois à haute teneur en calcium , par activation à l'aide d'une solution alcaline [8].

4. Constituants des géopolymères

Les géopolymères sont obtenus par l'activation de divers matériaux aluminosilicates (appelés précurseurs) avec une solution fortement alcaline (activateur alcalin), telle que l'hydroxyde de sodium, l'hydroxyde de potassium, le silicate de sodium ou le silicate de potassium.

Tout matériau riche en silicium (Si) et aluminium (Al) sous forme amorphe peut servir de source d'aluminosilicates pour les géopolymères.

Cendres volantes

La cendre volante est définie comme étant un résidu de combustion provenant du charbon, se composant de particules fines éjectées de la chaudière avec les gaz de combustion, qui sont les gaz d'échappement chauds produits dans les centrales électriques [9].

Le géopolymère à base de cendres volantes à faible teneur en calcium, provenant des centrales électriques à charbon et généré lors de la combustion du charbon bitumineux ou anthracite, ont être élaboré selon les travaux de recherche d'Adam [10], ainsi que de Talakokula et ses collègues [11].

- **Meta kaolin**

Le méta kaolin est produit à partir d'argile kaolinique de haute pureté, par le biais d'un processus de calcination à des températures variant entre 650 et 800 °C. Le kaolin est un matériau qui peut être extrait de gisements naturels ou obtenu en tant que composant de résidus miniers ou de déchets issus de l'industrie papetière. De plus, il est accessible à l'échelle mondiale [12].

Le méta kaolin constitue une source remarquable d'alumine et de silice. Il présente une réactivité significative au contact des solutions alcalines, en comparaison avec d'autres matériaux aluminosilicates, ce qui favorise et optimise le processus de géo polymérisation [13]. En parallèle de son application dans la fabrication de géopolymères, cet élément est principalement employé en tant qu'additif au ciment Portland et au béton, en raison de sa teneur élevée en silice et en alumine sous une forme active.

- **Laitier de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau est un coproduit sidérurgique issu de la fabrication d'acier. Sa composition varie selon le procédé de production de l'acier (filière fonte ou filière électrique) [14]. En fonction de son traitement thermique de refroidissement, il peut prendre différentes formes : laitier agrégat (un matériau cristallin gris pierreux), laine de laitier (un isolant pour la construction), laitier granulé de haut fourneau (utilisé dans les ciments)

Parmi les activateurs alcalins les plus utilisés pour l'élaboration des géopolymères, on retrouve l'hydroxyde de sodium NaOH, l'hydroxyde de potassium dont l'usage est cependant moins fréquent, et les silicates alcalins (Na2SiO3/K2SiO3)

- **NaOH/ KOH**

L'hydroxyde de sodium reste l'activateur alcalin le plus couramment utilisé dans la synthèse des géopolymères en raison de sa large disponibilité, de son faible coût et de sa faible viscosité. Généralement, dans les solutions alcalines de type NaOH ou KOH, les cations Na+ sont connus pour accroître la dissolution de la phase amorphe par association avec des monomères de silicate, et les cations K+ sont connus pour augmenter la croissance du gel par association avec de plus gros anions aluminosilicates.

- **Silicates alcalins (Na2SiO3/K2SiO3)**

Comme pour les hydroxydes, les silicates alcalins les plus utilisés sont à base de sodium et moins fréquemment de potassium. Ils jouent un rôle très important dans la réaction de géo polymérisation. En effet, plusieurs travaux ont montré que cette réaction est plus rapide lorsque la solution alcaline contient du silicate de sodium ou de potassium, en comparaison avec celle ne contenant que de l'hydroxyde alcalin [15]. La formation des matériaux de type géopolymères repose sur la dissolution des matières minérales solides initialement présentes dans le mélange. La solubilité de la silice amorphe est très faible en solution neutre mais augmente rapidement avec la concentration en ions alcalins [16].

5. Avantage et innovaient des béton géopolymères

5.1. Avantages du Béton Géopolymère

- **Durabilité élevée**: Le béton géopolymère est largement reconnu pour sa résistance exceptionnelle à la corrosion, ainsi qu'aux acides et aux conditions environnementales industrielles et maritimes [17].

- **Empreinte carbone réduite** : Le béton géopolymère, élaboré à partir de sous-produits industriels tels que les cendres volantes et le laitier de haut fourneau, contribue de manière significative à la diminution des émissions de dioxyde de carbone en comparaison avec le béton traditionnel.

- **Résistance à des températures élevées** : Le béton géopolymère offre une résistance supérieure à la chaleur, ce qui le rend particulièrement approprié pour des applications dans des environnements soumis à des températures élevées.
- **Recyclabilité** : Le béton géopolymère a la capacité d'incorporer des matériaux recyclés tels que les cendres volantes et le laitier de haut fourneau [18].
- **Résistance mécanique élevée** : Le béton géopolymère a la capacité de fournir une résistance mécanique équivalente, voire supérieure, à celle du béton traditionnel [19].

5.2. Inconvénients du Béton Géopolymère

- **Coût de production élevé** : La fabrication de béton géopolymère requiert des matières premières particulières, telles que les cendres volantes et le laitier, dont la disponibilité locale peut être limitée, entraînant ainsi une augmentation des coûts de production.
- **Sensibilité à l'humidité** : Le béton géopolymère peut subir des impacts en raison de fluctuations d'humidité durant la phase de durcissement, ce qui pourrait compromettre ses performances à long terme [20].
- **Difficulté de mise en œuvre** : L'emploi du béton géopolymère peut requérir des équipements ainsi que des techniques de fabrication particulières, ce qui rend son adoption à grande échelle plus complexe.

6. Domaines d'application

Les géopolymères trouvent des applications variées dans de nombreux domaines. Ils sont utilisés notamment dans l'isolation thermique [21], la fonderie [22], la fabrication d'objets de décoration en pierre [23], ainsi que dans les biotechnologies, notamment pour des applications médicales [24]. Ils jouent également un rôle important dans la réparation et le renforcement des infrastructures [25], la fabrication de ciments et bétons et plus récemment, dans la gestion des déchets radioactifs et toxiques. Le rapport atomique Si/Al dans la structure du poly(sialate) est un facteur déterminant des propriétés des géopolymères et oriente leurs domaines d'utilisation. La figure 7 illustre les applications réussies des géopolymères, réalisées depuis 1979, en fonction de ce rapport Si/Al.

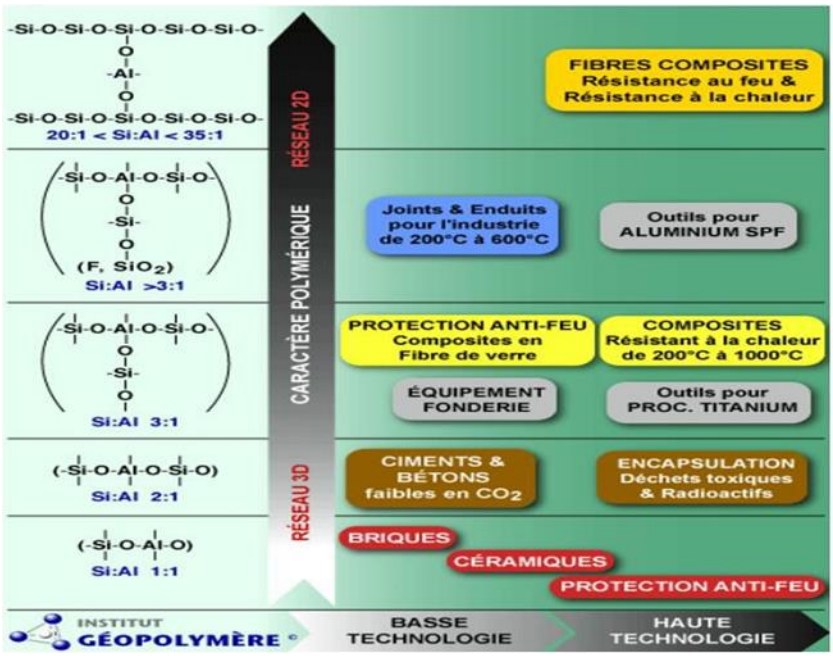


Figure I. 2 : Applications des matériaux géopolymères selon le rapport Si/Al

7. Propriété des bétons géopolymères

- **Ouvrabilité**

Nath et Sarker [26] ont affirmé que l'accroissement de la concentration en liquide alcalin peut diminuer la résistance et optimiser la maniabilité du béton, en raison du rapport élevé entre le liquide et le solide dans le mélange présentant la plus forte teneur en liquide.

En conséquence, l'emploi d'un mélange contenant 5 % de ciment portland ordinaire peut permettre d'atteindre une résistance considérablement élevée en début de maturation, ainsi qu'un temps de prise et une maniabilité adéquats pour le géopolymère portland ciment à base de Fly Ash durci à l'air ambiant [27].

- **Temps de prise**

Le mortier géopolymère présente un temps de prise initial de 35 minutes et un temps de prise final de 600 minutes, dans des conditions de durcissement variant entre 20 °C et 80 °C [28].

Le Fly Ash à faible teneur en calcium présente un temps de prise considérablement plus long que celui à haute teneur en calcium.

- **Propriétés mécaniques**

Après le durcissement, il est impératif de vérifier que le béton possède une résistance adéquate pour supporter les charges de service et structurelles qui lui sont appliquées. Néanmoins, il convient de noter que le béton géopolymère, élaboré à partir de matériaux de haute qualité et soumis à des processus de proportionnément, de mélange, de manipulation, de placement et de finition rigoureux, se classe parmi les matériaux de construction les plus durables et résistants disponibles sur le marché.

Les caractéristiques mécaniques de béton géopolymère, englobant ses résistances à la compression, à la traction ainsi qu'à la traction par fendage, son comportement en termes de contrainte-déformation et son taux d'accroissement de la résistance, seront analysées dans les sous-sections qui suivent.

- **Résistance à la compression R_c**

Les propriétés de résistance du béton géopolymère, qu'il soit durci ou en cours de durcissement, sont établies par ses constituants ainsi que par leur composition granulométrique [29]. La résistance à la compression du béton géopolymère est influencée par la nature du sable ainsi que par la proportion de liant en relation avec le sable.

Par conséquent, l'utilisation de sable de chaux entraîne une diminution de la résistance des compositions géopolymères par rapport à celle observée avec le sable de quartz conventionnel [30].

En règle générale, la proportion de liant par rapport au sable exerce un impact favorable sur la résistance lorsque celle-ci atteint sa valeur optimale. Il a été observé que la résistance maximale du béton géopolymère peut être atteinte avec une proportion de liant par rapport au sable de 0,5. Le dépassement de cette valeur entraîne une diminution de la capacité de service.

Il a également été observé qu'une augmentation de la proportion de dioxyde de silicium par rapport à l'oxyde d'aluminium entraîne la participation active de ce dernier à la réaction de

polymérisation durant les premiers stades de durcissement, ce qui conduit à sa carence lors des phases ultérieures de la réaction de polymérisation [31].

Il a également été observé qu'une élévation de la molarité des composants du béton géopolymère, au cours du processus de polycondensation optimisé, entraîne également une augmentation de la résistance à la compression du matériau durci. De plus une élévation de la molarité de l'hydroxyde de sodium ainsi que de la proportion de métasilicate de sodium par rapport à l'hydroxyde de sodium entraîne une augmentation de la résistance à la compression (R_C) du béton géopolymère activé par alkali basé sur le Grand Granulats Blast Furane. En revanche, une augmentation de la proportion d'activateur alcalin par rapport au le Grand Granulats Blast Furane présente un effet inverse sur la RC [32].

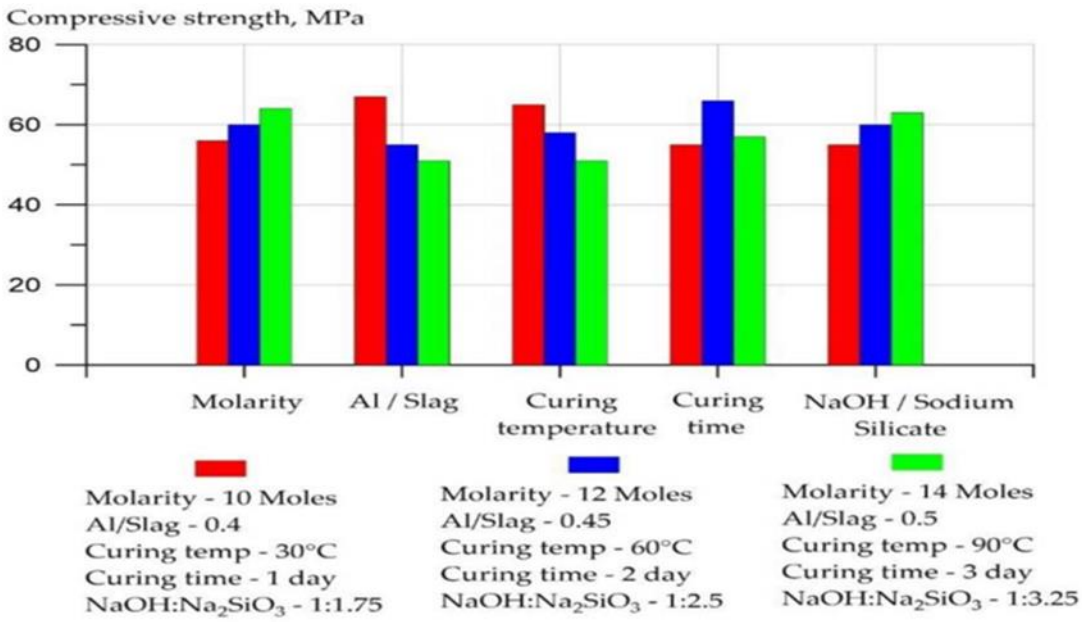


Figure I. 3 : Les principaux facteurs affectant la résistance à la compression (RC) des bétons géopolymères à l'âge de 28 jours, et le degré de leur influence [33].

- **Résistance à la traction R_T**

La résistance à la traction d'un béton géopolymère constitue un paramètre essentiel pour l'évaluation de ses performances mécaniques, en particulier dans des applications soumises à des

efforts de traction, de flexion ou de torsion. Le béton géopolymère, présente une résistance à la compression supérieure à celle à la traction. Islam et al [34].

Ont établi que le Palan Oïl Fuel Ash et le Grand Granulats Blast Furane ont la capacité d'accroître la résistance à la traction du géopolymère portland ciment d'environ 6 % à 9 % et de 9 % à 11 %, respectivement. Par ailleurs, l'incorporation de 0,03 vol% d'acier, de 10% de matériau synthétique, de 2% de sorgho sucré, de 1% à 5% de carbone, de 0,5 vol% de non-métal, ainsi que de 0,5 vol% de fibres de polypropylène peut engendrer une augmentation de la résistance à la traction de géopolymère portland ciment de 16%, 12,8%, 36%, 8,4%, 12% et 14,4%, respectivement [35].

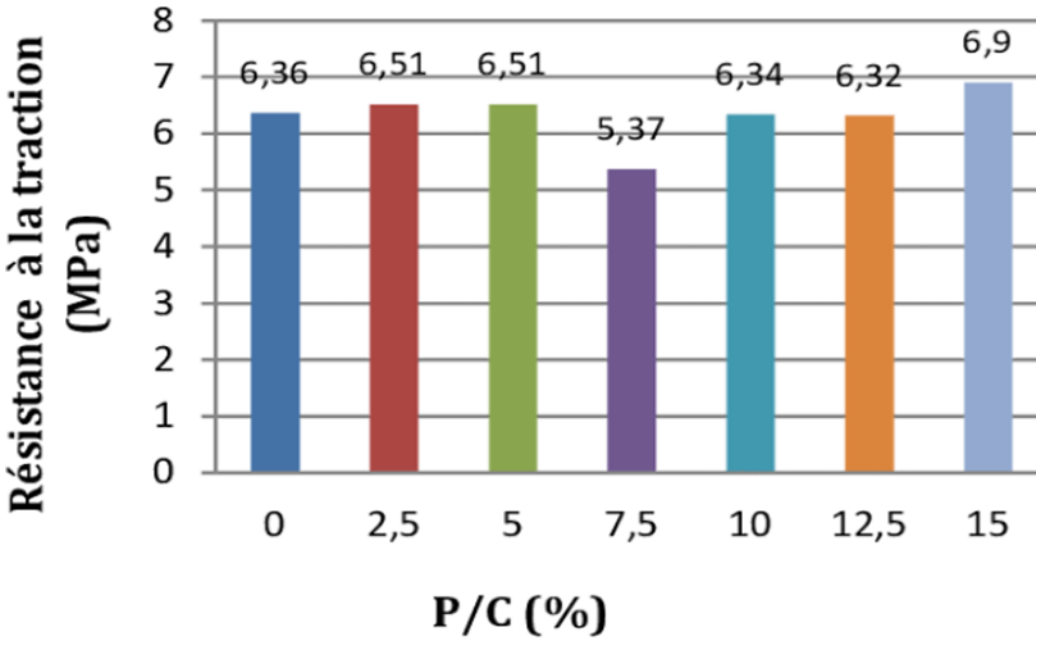


Figure I. 4 : Les principaux facteurs affectant la résistance à la traction des bétons géopolymères à l'âge de 28 jours, et le degré de leur influence

- **Résistance à la traction par fendage**

La résistance à la traction par fendage constitue une caractéristique essentielle et significative du béton, qui présente une faible résistance à la traction en raison de sa nature fragile et n'est généralement pas conçue pour supporter des efforts de traction directe [36].

L'emploi de laitier en tant que substitut partiel de la farine d'argile peut contribuer à l'amélioration de la résistance à la traction par fendage de béton géopolymères. En revanche, l'incorporation de 10 % et 30 % d'agrégats recyclés de béton [37], ou de 10 % d'agrégat de coque de palme peut entraîner une diminution de la traction par fendage (Liu et al., 2016 ; Mo et al., 2015a).

Farooq, F. et al.[38] ont réalisé une étude comparative de la résistance à la traction par fendage entre le béton géopolymère et le béton à base de ciment Portland , mesurée sur plusieurs périodes de durcissement (1, 3, 7, 28 et 91 jours),

Le béton géopolymère se distingue par des propriétés mécaniques supérieures, notamment en ce qui concerne la résistance à la traction, par rapport au béton traditionnel à base de ciment Portland, Cette supériorité est observable dès les premiers jours de durcissement et se renforce progressivement au fil du temps. Ainsi, la résistance du béton géopolymère atteint son apogée à 91 jours, avec une valeur avoisinante 7 MPa, contre 5 MPa pour le béton Ordinary Portland Cement.

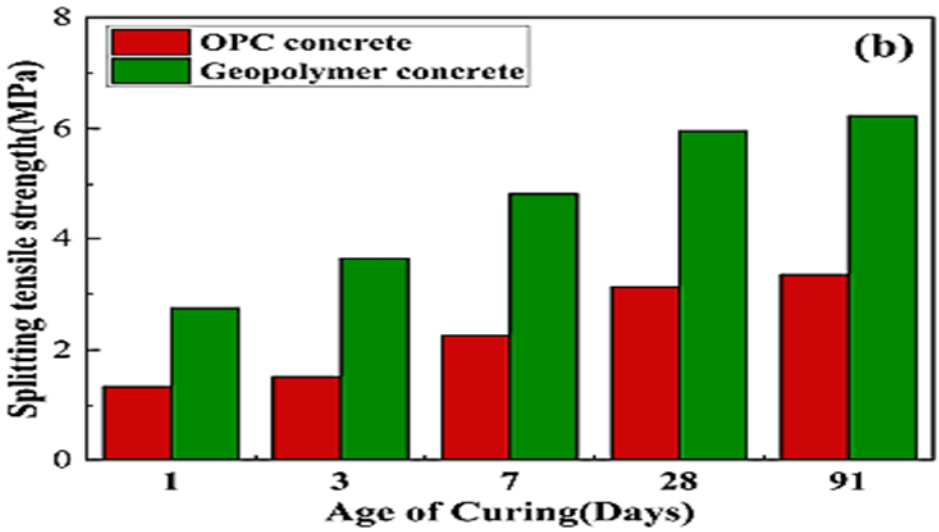


Figure I. 5 : Comparaison de la résistance à la traction par fendage entre le béton OPC et le béton géopolymère [39].

- **Module d'élasticité**

Le module d'élasticité selon la norme présente une corrélation significative avec la résistance à la compression de tout type de béton. Par conséquent, un degré plus élevé de géo polymérisation peut engendrer une matrice géopolymère plus dense, ce qui se traduit par un module d'élasticité supérieur [40]. Cependant, la géo polymérisation est définie comme le processus de formation de polysialies, qui dépend considérablement des propriétés minéralogiques, chimiques et physiques des matières premières, de la quantité d'activateur ainsi que des conditions de durcissement [41]. Un faible module d'élasticité peut atténuer l'ampleur de la propagation des fissures engendrée par la corrosion des barres en acier.

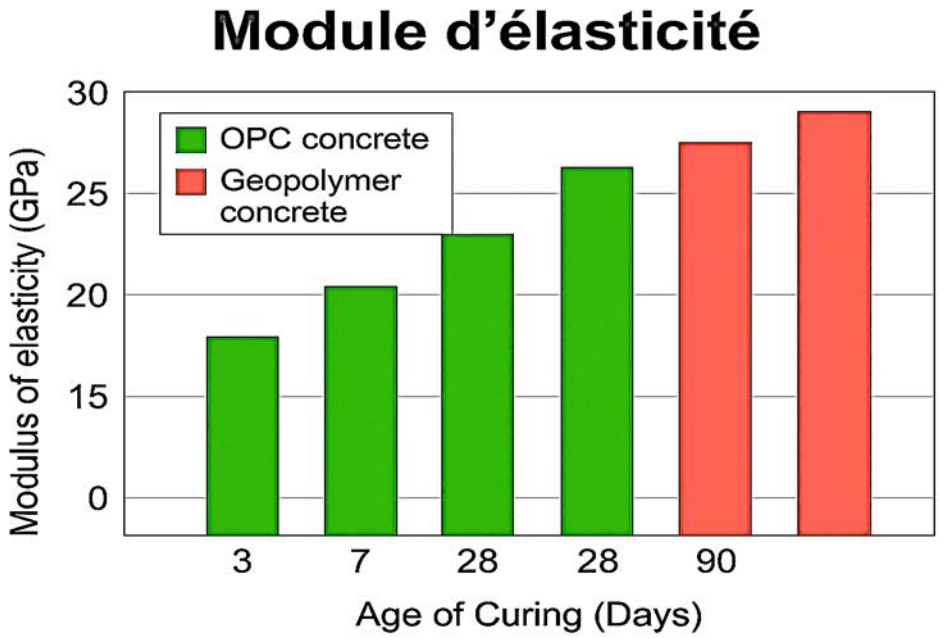


Figure I. 6 : Comparaison du module d'élasticité entre le béton Ciment Portland Ordinaire et le béton géopolymère à différents âges de cure.

8. Déchets utilisés dans les bétons géopolymères

- **Verre**

Le verre est un matériau solide, non cristallin et homogénéité , présentant une teneur élevée en silice, ce qui lui confère des propriétés pouzzolaniques remarquables. Cependant, en raison de

la présence d'alcali en quantités élevées (10-16 %), le béton contenant du verre pourrait être particulièrement susceptible aux réactions alcali-silice (RAS).

Le recyclage des déchets de verre pose des défis dans les zones urbaines des pays développés, ce qui a engendré un intérêt croissant pour leur incorporation dans le béton au cours des dernières années [42]. Étant donné que le déchet de verre constitue un sous-produit, son emploi en tant que matériau source pour la fabrication de géopolymères ne requiert pas une consommation énergétique significative, hormis celle liée au processus de broyage. Cela constitue une alternative pertinente pour accroître la valorisation de la poudre de verre dans les matériaux de construction.

Cyr et al. [43] Ont développé des géopolymères à partir de poudre de verre, en utilisant comme activateurs alcalins le NaOH et le KOH, avec des concentrations respectives de 1, 5 et 10 M. D'autres chercheurs, tels que Lin et al. 44], Ont également examiné le potentiel de l'utilisation de la poudre de verre électronique en tant que substitut pouvant atteindre jusqu'à 40 % du métakaolin dans la formulation de géopolymères.

Figure I. 7 : Lavage des déchets de verre

- ## Cendres de balle de riz

La cendre de balle de riz constitue un produit respectueux de l'environnement, présentant une neutralité en matière de carbone [45]. Elle est principalement employée comme source de cendre pour la production d'énergie [46], ou comme combustible pour chaudières dans le cadre du traitement du riz, avec un volume variant entre 20 % et 25 % de la balle de riz. Cette dernière, étant une enveloppe extérieure indigestible, est retirée et incinérée soit dans des cuisinières

domestiques, soit dans des centrales électriques locales, afin de générer de la vapeur destinée à la cuisson du riz [47].

En revanche, au sein des structures géopolymère portland ciment élaborées à partir de cendres de balle de riz (RHA), la présence de silicates de sodium activés par des alcalins à des températures élevées peut engendrer la formation de nouvelles phases cristallines, telles que les feldspaths sodiques, l'albite ($NaAlSi_3O_8$) et la néphéline ($NaAlSiO_4$), ce qui contribue à une stabilité thermique accrue à des températures élevées [48].

- **Granulats grossiers**

Environ 75 % des granulats grossiers recyclés (GCR) proviennent de la transformation du béton, tandis que le reste est composé de maçonnerie, d'asphalte, de tuiles et d'autres matériaux [58]. Les granulats de construction recyclés (GCR) peuvent remplacer partiellement les granulats grossiers naturels (GCN) dans le cadre du géopolymère portland ciment , à des proportions de 15 %, 30 % et 50 % [49]. Compte tenu de l'accroissement constant de l'utilisation du béton chaque année, l'extraction des granulats naturels destinés à sa production pourrait engendrer des conséquences préjudiciables sur l'écosystème naturel [50].

Plusieurs études ont également examiné la résistance à la compression du géopolymère portland ciment intégrant des GCR, qui utilise un géopolymère issu de cendres de boues de papier, en substitution de celui provenant de Fly Ash et de scories. Il a été constaté que la résistance à la compression de ce béton augmente d'environ 10 % entre le septième et le vingt-huitième jour, et que la forte concentration d'hydroxyde de sodium confère au GeoPC une résistance à la compression supérieure à celle du béton conventionnel.

- **Plastique**

La production mondiale de plastique s'élève à 400 millions de tonnes par an, dont près de 87 % se transforme en déchets plastiques, selon les rapports de 2022 du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Le recyclage des déchets plastiques, tout en générant des ressources précieuses pour le secteur de la construction, constitue une méthode durable de gestion des déchets plastiques [51].

Les plastiques usagés peuvent être intégrés dans le béton géopolymère (BGP) en tant que substitut partiel ou total des granulats naturels, ou bien sous forme de fibres additionnelles, Différents chercheurs ont intégré des plastiques dans le béton géopolymère (BGP) en tant que substitut d'agrégats ou en ajoutant des fibres, ce qui permet de justifier la durabilité et d'améliorer les propriétés du BGP [52].

Figure 1. 8 : Déchets en polyéthylène à haute densité

- **Déchets de la brique**

L'augmentation des déchets de briques en terre cuite, principalement due à l'augmentation des travaux de construction et de démolition dus au réaménagement urbain mondial, a suscité d'importantes préoccupations environnementales. Une partie importante, impropre à la réutilisation, contribue à la pollution et à des coûts d'élimination élevés. Avec des déchets de maçonnerie atteignant 25 millions de tonnes en 2019 contre 15 millions de tonnes en 2007, ils constituent l'un des principaux déchets d'Australie [53]. Cette élimination présente des risques environnementaux. Malgré les efforts de recyclage, une quantité importante reste inutilisée. Intégrer ces déchets dans la production de géopolymères marquerait une étape notable dans leur processus de recyclage. En revanche, la diminution progressive de la disponibilité des cendres volantes avec le passage à davantage d'énergies renouvelables entraînera à l'avenir une pénurie de matériaux cimentaires supplémentaires et de précurseurs géopolymères.

Il est donc crucial de trouver des matériaux de liaison alternatifs. Cette étude a examiné la faisabilité de l'utilisation des déchets de briques comme précurseur partiel de géopolymère. La

sélection était basée sur la similitude des compositions chimiques du (DBTC) et des cendres volantes, notamment en termes de teneurs en silicium (Si) et en aluminium (Al). Des études antérieures utilisaient souvent un mélange d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH) avec du silicate de sodium (Na2SiO3) comme activateur alcalin habituel lors de la synthèse d'un liant géopolymère [54]. Certaines études ont également utilisé ces activateurs individuellement [55]. Des recherches antérieures utilisaient 7 à 44 % d'activateur alcalin en masse du précurseur solide total [56]. D'autre part, les conditions de durcissement variaient, incluant à la fois le durcissement ambiant et thermique. Le durcissement thermique a été réalisé dans une plage de températures allant de 60 °C à 115 °C. En outre, différentes matières premières, utilisant diverses proportions de mélange de sable et de granulats grossiers, et méthodes de mélange différentes caractéristiques, notamment la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion et le module d'élasticité, ont été évaluées, montrant des résultats comparables à ceux du béton de ciment à base de clinker [57].

9. Conclusion

La technologie des géopolymères constitue une approche pertinente pour l'exploitation des sous-produits industriels, communément désignés comme déchets. Géopolymère portland ciment a gagné en popularité au cours des dernières décennies en raison de son impact environnemental plus favorable par rapport au ciment portland ordinaire traditionnel. Le géopolymère portland ciment est en mesure de proposer une résistance initiale exceptionnellement élevée, une durabilité accrue, une réduction des émissions de CO2 lors de la production, ainsi qu'une longévité supérieure dans diverses applications en matériaux de construction.

CHAPITRE II
Matériaux et méthodes

1. Introduction

Les propriétés des matières premières utilisées pour la fabrication d'un matériau doivent être parfaitement maîtrisées afin d'anticiper leur comportement et d'identifier les améliorations possibles lors de leur utilisation. Cette maîtrise repose sur la caractérisation précise de ces matières premières.

Dans cette démarche, nous nous intéressons aux matériaux suivants : sable, laitier de haut fourneau, fumée de silice, laine et déchets plastiques, qui seront utilisés dans le cadre de notre étude expérimentale. Nous procéderons ensuite à une série d'essais visant à analyser leurs caractéristiques, dont les procédures seront réalisées au laboratoire pédagogique de génie civil de l'Université de Bourdj boueriridj.

2. Matériaux utilisés

La connaissance approfondie des propriétés des matériaux est essentielle dans toutes les études, car elle garantit le respect des exigences de sécurité, de confort et d'impact environnemental des constructions. En effet, les performances et la durabilité des structures dépendent directement des caractéristiques des matériaux utilisés, qui doivent répondre aux normes et aux conditions spécifiques.

2.1. Sable

Le sable utilisé dans notre étude expérimentale était du sable de dunes de classe 0/5 mm prélevé de OUED SOUF ; leur distribution granulométrique a été réalisée par tamisage selon la norme NFP 18-560 et illustrée par la figure 9. Le Tableau résume les principales propriétés du sables utilisés

.

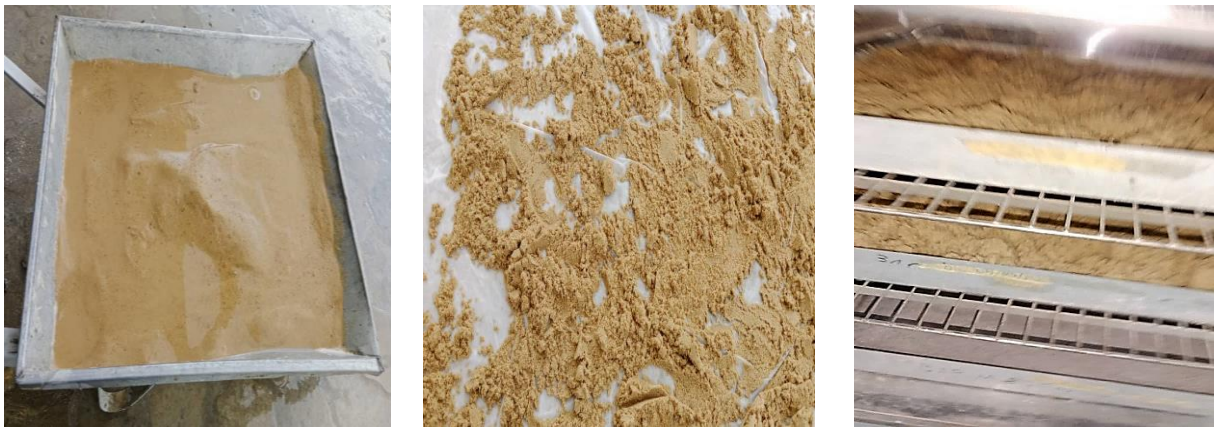


Figure II.1 : préparation du sable pour son utilisation dans le mélange

Figure II.2 : analyse granulométrique

Tableau II. 1 : Propriétés physiques du sable utilisé.

Type du sable	Apparence kg/m^3	Masse volumique kg/m^3	Compacité	Bleu de méthylène	Equivalent de sable	Module de finesse
SD	1,62	2,6	0,62	0,25	92,63	2,012

2.3 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau granulé moulu (GGBS, *Ground Granulated Blast Furnace Slag*) est un sous-produit amorphe vitreux issu de l'industrie sidérurgique, spécifiquement de la production de fonte. Sa composition chimique est principalement riche en silicates de calcium ($CaO{\cdot}SiO_2$) et d'aluminium (Al_2O_3), ainsi qu'en magnésie (MgO). Cette composition en fait un **excellent précurseur pour la synthèse de géopolymères**, car il est riche en phases amorphes de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3), éléments fondamentaux pour la réaction de géopolymérisation en présence d'un activateur alcalin.

Figure II.4 : Laitier de haut fourneau

2.2. Fumée de silice

La "fumée silice" utilisé est constitué de 93 à 98% de particules sphériques de SiO_2 amorphes avec des dimensions de quelques dixièmes de microns, c'est ainsi que sa surface spécifique s'élève à environ 220.000 cm^2/g (Blaine). Dans les bétons géopolymères, elle peut améliorer significativement la compacité de la matrice en remplissant les vides entre les particules de laitier, etde contribuer à la réaction géopolymérique en fournissant une source

supplémentaire de silice réactive. Son utilisation permet ainsi d'optimiser la microstructure du matériau, d'améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

Figure II.5 : Fumée de silice

2.3. Déchets de plastique

Face à l'accumulation croissante de ces matériaux et leurs impacts environnementaux, leur réintégration dans de nouveaux matériaux ou procédés représente un enjeu majeur. Leur utilisation vise non seulement à valoriser ces matériaux non biodégradables, mais aussi potentiellement à modifier les propriétés du béton, notamment sa masse volumique, sa maniabilité, son isolation thermique et son absorption d'eau. La nature hydrophobe et la faible densité des plastiques les rendent particulièrement intéressants pour ces applications, bien que leur comportement sous contraintes mécaniques et thermiques nécessite une caractérisation rigoureuse. La figure représente la distribution granulométrique de ce dernier

Figure II.5 : déchet de plastique

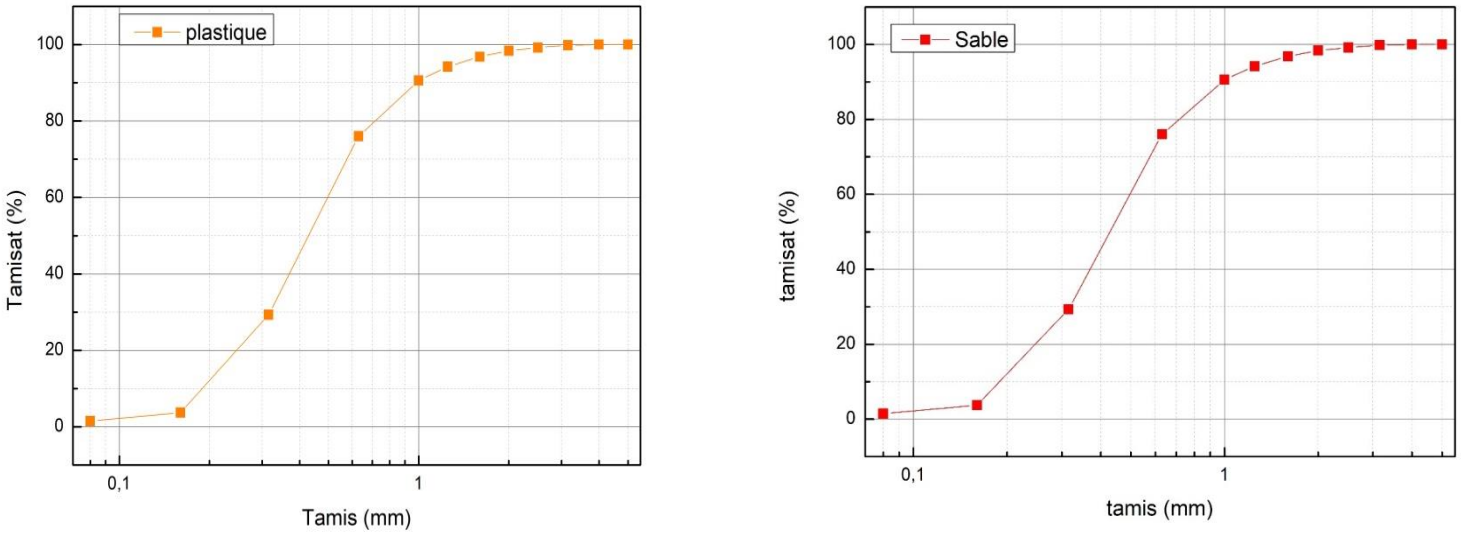


Figure II.6 : Courbes granulométriques de sable et le déchets de plastique.

2.4. La laine de mouton

Les fibres de laine de mouton , un sous-produit abondant de l'élevage ovin et souvent sous-valorisé, ont été incorporées comme renfort dans cette étude. Avant leur inclusion dans la matrice géopolymère, ces fibres ont été préalablement traitées avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). Ce traitement alcalin vise à éliminer les impuretés de surface, à améliorer la rugosité et l'hydrophilie des fibres, et potentiellement à modifier leur structure afin d'optimiser leur adhérence avec la matrice géopolymère. L'utilisation de ces fibres a pour objectif d'améliorer certaines propriétés mécaniques du béton, notamment sa résistance à la flexion et sa ténacité, tout en contribuant à la valorisation d'un déchet agricole.

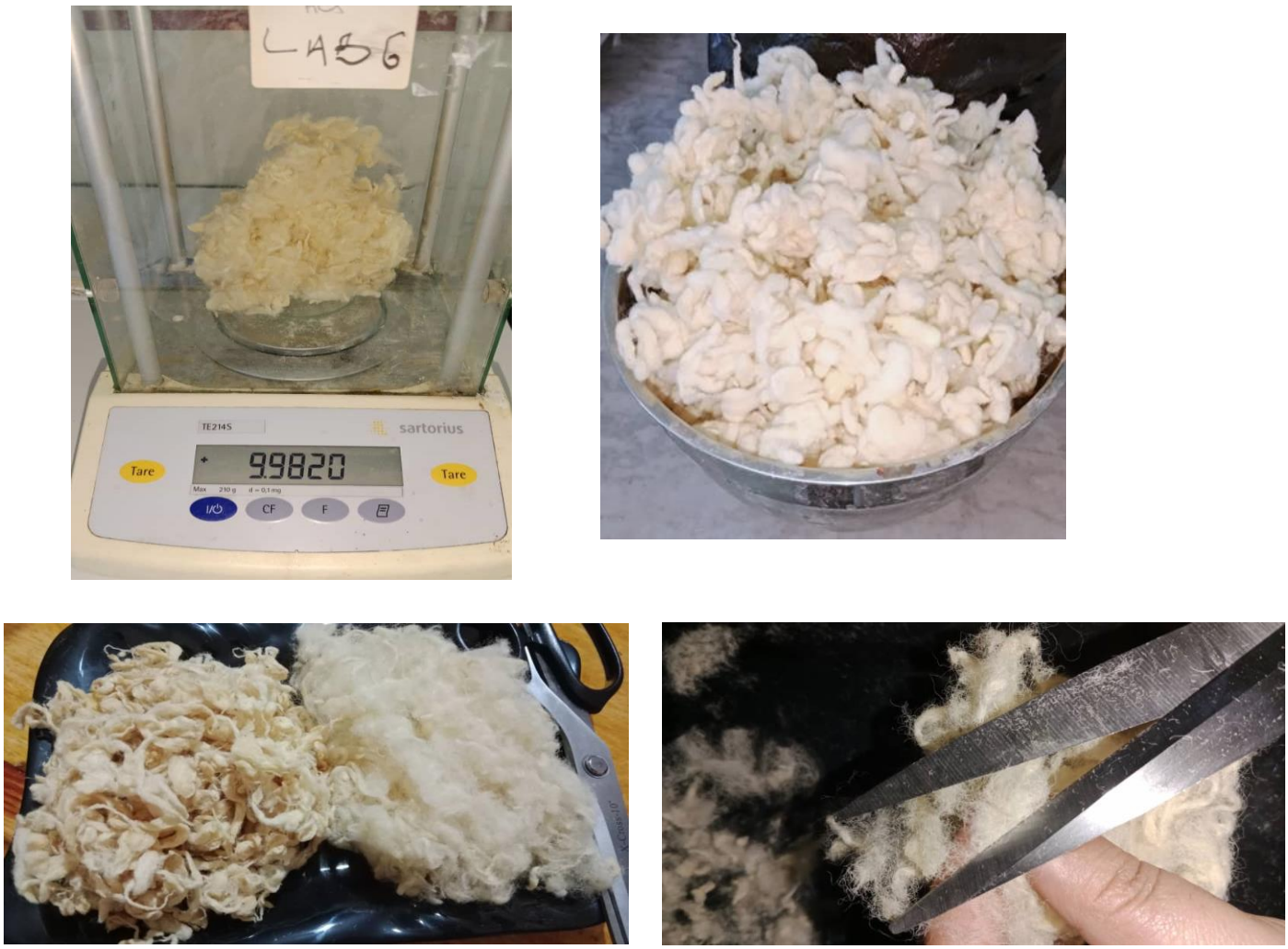


Figure II.7 : Préparation de laine de mouton

2.5. Soude caustique

La soude caustique employée dans notre étude est de l'hydroxyde de sodium sous forme de perles, ce produit est fourni par silicates alcalines (Na_2SIO_3/ K_2SIO_3), ayant une masse moléculaire de 40. Les spécifications détaillées de sa composition sont données dans le tableau 2.

Tableau II.2 : des caractéristiques Soude caustique

Information	**Détails**
Formule chimique	Na OH
Masse molaire (Mol Wt)	40,00 g /mol
Point d'ébullition	1390 °C
Point de fusion	319°C
Poids	1Kg

La préparation en laboratoire de 1000 ml d'une solution de NaOH 10M a exigé une méthode rigoureuse. Nous avons d'abord déterminé et pesé avec exactitude 404,04 g d'hydroxyde de sodium (NaOH) en perles, une quantité calculée en fonction de sa masse moléculaire et de la concentration visée de 10M (soit 40%). Cette masse a ensuite été introduite avec précaution dans un volume prédéfini d'eau déionisée, en raison de la forte réactivité de la soude caustique avec l'eau.

Une fois le NaOH ajouté à l'eau, nous avons mélangé doucement la solution à l'aide d'un agitateur jusqu'à dissolution complète du solide, en veillant à opérer sous hotte ventilée compte tenu de la chaleur significative et des vapeurs irritantes dégagées lors de la dissolution de la soude caustique. Enfin, la solution de NaOH (10M) a été transférée dans un récipient approprié et conserver pendent 3 h avant de l'utilisation ;

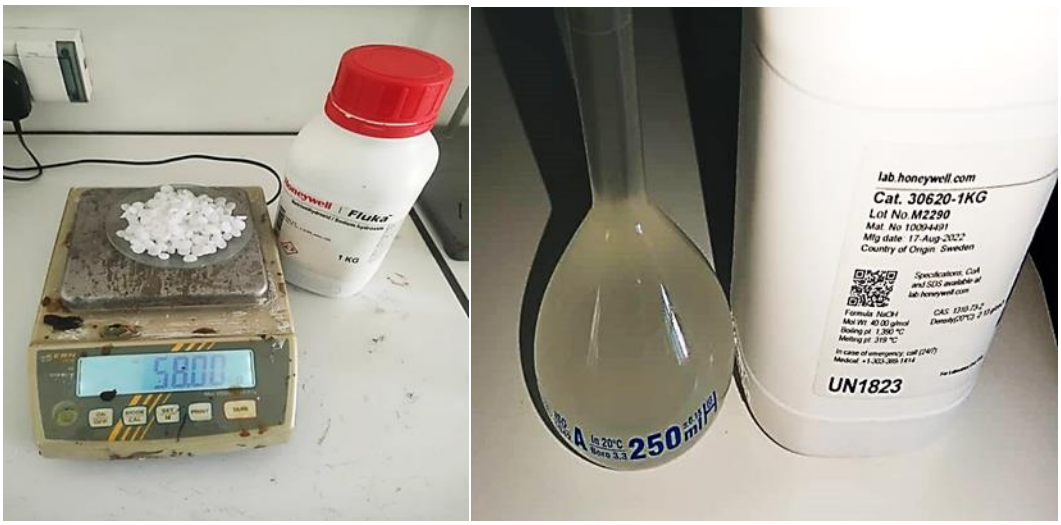


Figure II.8 : Préparation de la solution

2.6. Silicates d'alcaline Na_2SiO_3

Le silicate de sodium (Na_2SiO_3), ou verre soluble, a été introduit sous forme de grains (solide) comme un composant clé de l'activateur alcalin dans ce processus de géopolymérisation. Au contact de l'eau de gâchage et de la solution d'hydroxyde de sodium (si utilisée), ces grains se dissolvent pour libérer des ions hydroxydes (OH^-) et des monomères de silicate (SiO_2 solubilisé). Ces espèces dissoutes sont essentielles pour initier et soutenir la dissolution des phases riches en silice et alumine (laitier de haut fourneau, fumée de silice) des précurseurs. La présence de silicate soluble joue un rôle crucial dans la polymérisation et la condensation des aluminosilicates, menant à la formation du réseau géopolymérique. L'utilisation du silicate de sodium en grains permet de contrôler la concentration en silicates et l'alcalinité du système, influençant ainsi la cinétique de prise et les propriétés finales du géopolymère durci. Le tableau 3 présente les caractéristiques physico-chimiques du silicate de sodium utilisé.

Tableau II.3 : caractéristiques Silicates d'alcaline

Informations de l'étiquette	**Détails**
Nom du produit	Métasilicate de sodium penta hydraté
Composition	Na2O 29%, SiO2 28%, H2O 43%
Plage de température	F77-80°
Formule chimique	Na2SiO3 · 5H2O
Poids	1 Kg

Figure II.9 : Silicates d'alcaline Na2SiO3

3. Méthodologie

3.1. Préparation des mélanges

Les échantillons de géopolymère ont été préparés en suivant les compositions de mélange déterminées dans le tableau correspondant.

Tableaux II.4 : de préparation des mélanges

Mélanges	Laitier Haut Fourneau (kg)	Fumée de silice (kg)	Sable (kg)	Déchet de Plastiques (kg)	Pourcentage de laine %
M0	663	191	1130	0	0
M1	663	191	1130	0	1
M2	663	191	1130	0	1.5
M3	663	191	1130	0	2
M4	663	191	1017	113	1
M5	663	191	960.5	169.5	1
M6	663	191	904	226	1
M7	663	191	847.4	282.6	1
M8	663	191	1017	113	1.5
M9	663	191	960.5	169.5	1.5
M10	663	191	904	226	1.5
M11	663	191	847.4	282.6	1.5
M12	663	191	1017	113	2
M13	663	191	960.5	169.5	2
M14	663	191	904	226	2
M15	663	191	847.4	282.6	2

À température ambiante contrôlée du laboratoire, la préparation des mélanges de béton géopolymère a été initiée par l'introduction des constituants pulvérulents : le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et les silicates alcalins (sous forme granulaire). Ces matériaux ont été pré-homogénéisés dans un mélangeur à vitesse lente pendant deux (2) minutes afin d'assurer une répartition uniforme.

Ultérieurement, l'agrégat fin (sable) a été ajouté au mélange, et le malaxage a été poursuivi à vitesse lente pendant deux (2) minutes supplémentaires pour une dispersion optimale.

Les résidus plastiques, préalablement préparés, ont ensuite été incorporés au mélange, et l'agitation a été maintenue à vitesse lente pendant deux (2) minutes afin de garantir leur intégration homogénéité .

La solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), préparée séparément, a été introduite progressivement dans le mélangeur tout en maintenant une vitesse de malaxage lente pendant deux (2) minutes, jusqu'à l'obtention d'une pâte présentant une cohésion satisfaisante. Une quantité d'eau jugée nécessaire a ensuite été ajoutée graduellement, le malaxage étant continué à vitesse lente pendant deux (2) minutes, jusqu'à l'obtention d'une consistance semi-liquide.

Un malaxage final à vitesse rapide a été effectué pendant trente (30) secondes afin d'assurer l'homogénéité complète et la dispersion adéquate de tous les constituants du mélange de béton géopolymère.

Immédiatement après le malaxage, la pâte de béton géopolymère fraîchement préparée a été soumise à un essai d'étalement. Cette mesure a précédé la mise en forme des éprouvettes, la pâte a ensuite été soigneusement coulée et compactée dans des moules cubiques de dimensions 4x4x4 cm^3 et 4x4x16 cm^3 pour la fabrication des éprouvettes destinées aux essais de caractérisation à l'état durci.

Figure II.10 : Malaxage et remplissage des moules

Afin de favoriser la poursuite et l'optimisation des réactions de géopolymérisation, les spécimens ont été démoulés après un délai de vingt-quatre (24) heures suivant leur coulée. Immédiatement après démoulage, les éprouvettes ont été transférées dans une enceinte de cure contrôlée. Cet environnement a été rigoureusement maintenu à une température constante de 20±2∘C et à une humidité relative égale ou supérieure à 95% jusqu'à l'atteinte de l'âge d'essai requis pour les différentes caractérisations.

Figure 2.11 : Les échantillons démoulés

3.2. Les essais exprimant eaux

3.2.1. Etalement

Pour évaluer la maniabilité des mélanges de béton géopolymère à l'état frais, un essai d'étalement a été réalisé. Cette mesure a été effectuée conformément aux spécifications de la norme ASTM C1437 (Figure), permettant de quantifier la consistance et la fluidité des pâtes fraîchement préparées avant leur mise en place.

Figure II.12 : Essai d'étalement.

3.2.2. Absorption d'eau

Afin de déterminer la durabilité des de bétons géopolymères fabriqués aux conditions environnementales et d'examiner le rôle du déchet de plastique et du FM, les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant 24 heures, après quoi la teneur en eau a été calculée à l'aide de la formule suivante:

$$Ab = \frac{M.humide - M.seche}{M.seche} \times 100$$

Figure II.13 : Essai d'absorption d'eau

3.2.3. Résistances à la compression

Des essais de résistance à la compression ont été effectués à des âges de durcissement de vingt-huit (28) jours (Figure 22), conformément aux directives de la norme ASTM C109.

Figure II.13 : Essai de la résistance à la compression

3.2.4. Résistances à la flexion

La résistance à la flexion des bétons géopolymères durcis a été déterminée par un essai de flexion sur les éprouvettes (Figure23), conformément aux normes **ASTM C293**. Cet essai, réalisé à l'aide d'un dispositif de chargement à trois, permet de mesurer la capacité du matériau à résister aux contraintes de traction indirectes avant rupture.

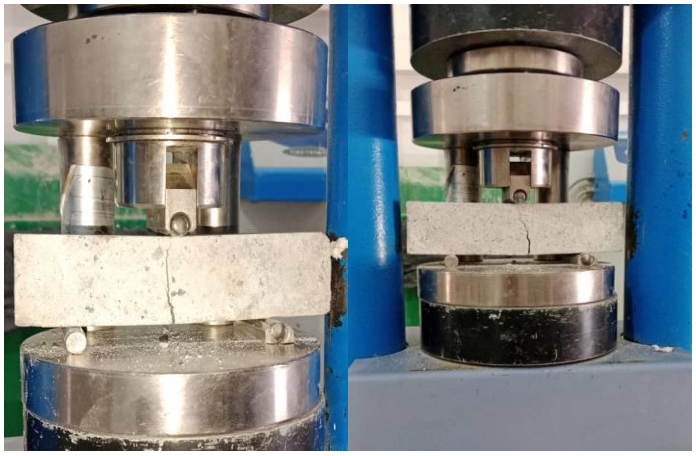


Figure II.14 : Essai de la résistance à la flexion

3.2.5. La vitesse d'impulsion ultrasonore

La vitesse d'impulsion ultrasonore a été déterminée à l'aide d'un appareil Ultrasonique Pulse Analyzer de la marque CONTROLS. Cette mesure a été réalisée conformément à la norme **ASTM C 597**, dans le but d'évaluer la qualité et l'homogénéité de la structure interne des bétons géopolymères, ainsi que sa corrélation avec leurs propriétés de résistance mécanique.

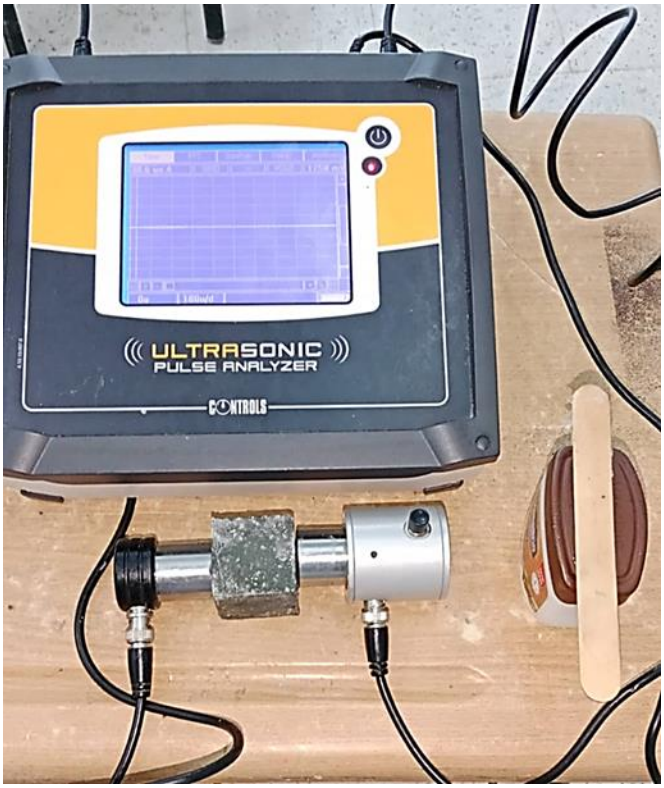


Figure II.15 : Essai de l'ultrasonique

3.2.6. Exposition des Échantillons à Haute Température

Pour évaluer le comportement thermique des bétons géopolymères, les éprouvettes durcies ont été soumises à des cycles de chauffage contrôlés dans un four électrique (figure 25). Les spécimens ont été exposés à différentes températures cibles : 200°C, 400°C, 600°C, et 800°C. À chaque palier de température, les éprouvettes ont été maintenues pendant 1h avant d'être refroidies à température ambiante du laboratoire. Ce processus a permis d'évaluer la résistance

résiduelle à la compression et la perte de masse des mélanges après exposition thermique, fournissant des données essentielles sur leur stabilité structurelle sous contraintes de chaleur.

Figure II.16 : Exposition des échantillons géopolymères à haute température.

4. Conclusion

Ce chapitre a soigneusement décrit la méthodologie expérimentale de l'étude. Il a mis en lumière la sélection rigoureuse et la caractérisation des matériaux utilisés, tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, les silicates alcalins, l'hydroxyde de sodium, le sable, ainsi que les déchets valorisés, notamment les fibres de laine de mouton traitées au NaOH et les déchets plastiques. La procédure de malaxage, définie avec précision, avait pour but d'assurer l'homogénéité des mélanges. Tous les essais de caractérisation ont été présentés selon les normes internationales, englobant les propriétés à l'état frais (étalement), à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la flexion, vitesse d'impulsion ultrasonore, absorption d'eau), et le comportement à haute température (perte de masse et résistance résiduelle). Cette approche méthodique et standardisée garantit la fiabilité des résultats obtenus, dont l'analyse sera approfondie dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III
Résultats et discussions

1. Introduction

Les données présentées dans ce chapitre proviennent d'une série d'essais rigoureux conçus pour caractériser les propriétés fondamentales de béton géopolymère fabriquer et à évaluer sa performance sous diverses contraintes. Nous commencerons par examiner les résultats relatifs à la résistance à la compression et à la flexion, qui sont des indicateurs essentiels de la capacité portante et de la durabilité structurelle du béton. En parallèle, nous détaillerons les mesures d'absorption d'eau et d'étalement.

Le chapitre abordera ensuite la vitesse de propagation de l'onde, cette analyse non destructive permettra d'évaluer l'homogénéité du matériau et d'apprécier sa qualité interne. Enfin, une partie importante sera dédiée à l'impact des températures élevées sur les propriétés de ce béton géopolymère, afin de mieux comprendre son comportement dans des conditions extrêmes et d'anticiper sa résistance au feu. Chaque section de résultats sera suivie d'une discussion critique pour interpréter les observations.

2. L'influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à la compression :

La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques les plus essentielles et les plus fréquemment mesurées pour les bétons, car elle indique leur capacité à supporter des charges axiales. La figure 1 représente la variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de FM de plastique.

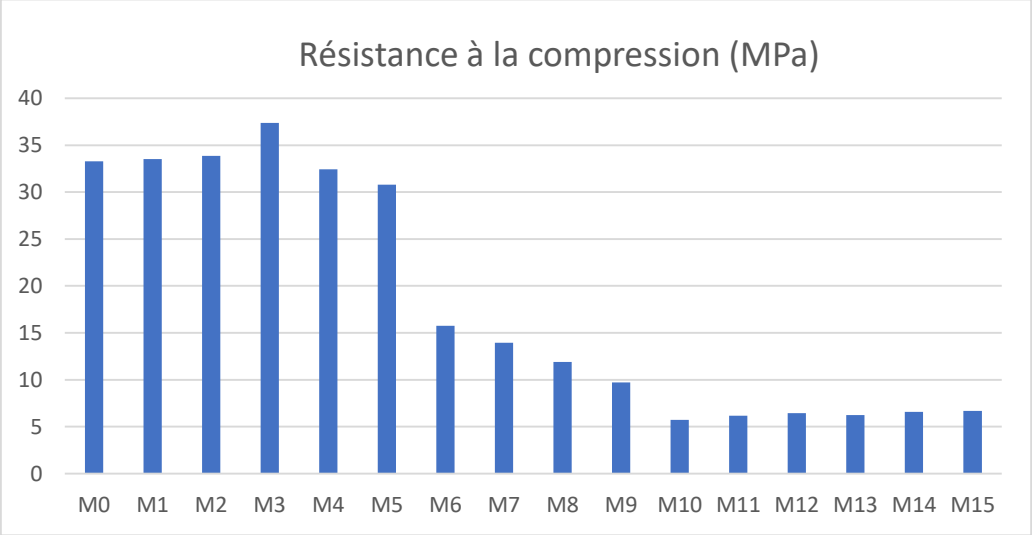


Figure III.1 : Effet de la FM et le déchet de plastique sur la résistance à la compression.

Le mélange M0, exempt de laine de mouton et de déchets plastiques, affiche une résistance à la compression de 33,295 MPa. Cette valeur sert de référence pour évaluer l'influence des différents ajouts. Elle est cohérente avec les résultats rapportés par Feiyu Shi [62], et reflète une performance mécanique solide pour un béton géopolymère, traduisant la formation d'une matrice bien structurée et dense.

L'ajout de fibres de laine de mouton dans les mélanges M1 (1 %), M2 (1,5 %) et M3 (2 %) a un effet à la fois surprenant et prometteur sur la résistance à la compression initiale, qui reste généralement équivalente, voire supérieure, à celle du mélange de référence M0. Le mélange M1 atteint 33,524 MPa, un peu au-dessus de M0, tandis que M2 enregistre 33,862 MPa, confirmant cette tendance. Le mélange M3, avec 2 % de fibres, se démarque particulièrement en atteignant 37,362 MPa, ce qui représente une amélioration significative d'environ 12,2 % par rapport à M0.

À l'inverse de ce que l'on pourrait penser en ajoutant des fibres organiques, aucune baisse de performance n'est constatée. Au contraire, ces résultats indiquent que la laine de mouton, à ces niveaux, ne nuit pas à la résistance à la compression et pourrait même l'améliorer. Cela pourrait être dû à une meilleure microstructure, à une redistribution plus efficace des contraintes, ou encore à un léger effet de comblement des pores, si les fibres agissent comme des agents de remplissage ou des sites de nucléation dans la réaction géo polymérique. Il est cependant important de noter que la dispersion homogénéité des fibres est cruciale pour éviter la formation de zones de faiblesse dans la matrice.

La figure 1 montre aussi que l'intégration simultanée de déchets plastiques et de laine de mouton aux mélanges (M4 à M15) entraîne une diminution générale de la résistance à la compression initiale par rapport à M0, avec une variabilité selon les proportions des additifs.

L'incorporation du plastique avec 1% de FM affiche des résistances varient entre 13,949 MPa et 32,423 MPa. Le remplacement du sable par des déchets plastiques, de densité et de rigidité inférieures, dégrade clairement la résistance à la compression. Le plastique agit comme une inclusion faible, augmentant la porosité et créant des interfaces moins résistantes avec la matrice géopolymère. L'effet négatif s'accentue fortement avec l'augmentation de la quantité de plastique.

Pour les groupes M8-M11 (1,5 % FM) et M12-M15 (2 % FM), on observe la même tendance : la résistance à la compression diminue à mesure que la quantité de plastique augmente. Quand on combine de grandes quantités de plastique avec des pourcentages plus élevés de laine de mouton (1,5 % et 2 %), cela entraîne une chute significative de la résistance à la compression.

L'effet cumulatif de l'ajout de ces deux phases nuit gravement à la capacité de la matrice à supporter des charges de compression. De plus, remplacer le sable par du plastique diminue également la densité et la compacité globales du béton.

En fin de compte, l'ajout de laine de mouton seul (jusqu'à 2%) n'a pas d'impact négatif significatif et peut même légèrement améliorer la résistance à la compression (M3). En revanche, l'incorporation de déchets plastiques entraîne une diminution progressive, et souvent drastique, de cette résistance. Lorsque ces deux additifs sont combinés, surtout à des proportions élevées de plastique, cela compromet sérieusement la performance mécanique.

Ces résultats sont essentiels pour évaluer les applications potentielles de ces bétons géopolymères recyclés, indiquant qu'ils seraient mieux adaptés à des usages non structurels ou dans des environnements où les exigences en matière de compression sont moins strictes.

3. L’influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à la flexion

L'étude de la résistance à la flexion (Rf) des divers mélanges de béton géopolymère nous aide à saisir comment l'ajout de laine de mouton et de déchets plastiques influence cette propriété mécanique essentielle, qui est souvent plus vulnérable aux imperfections internes que la résistance à la compression.

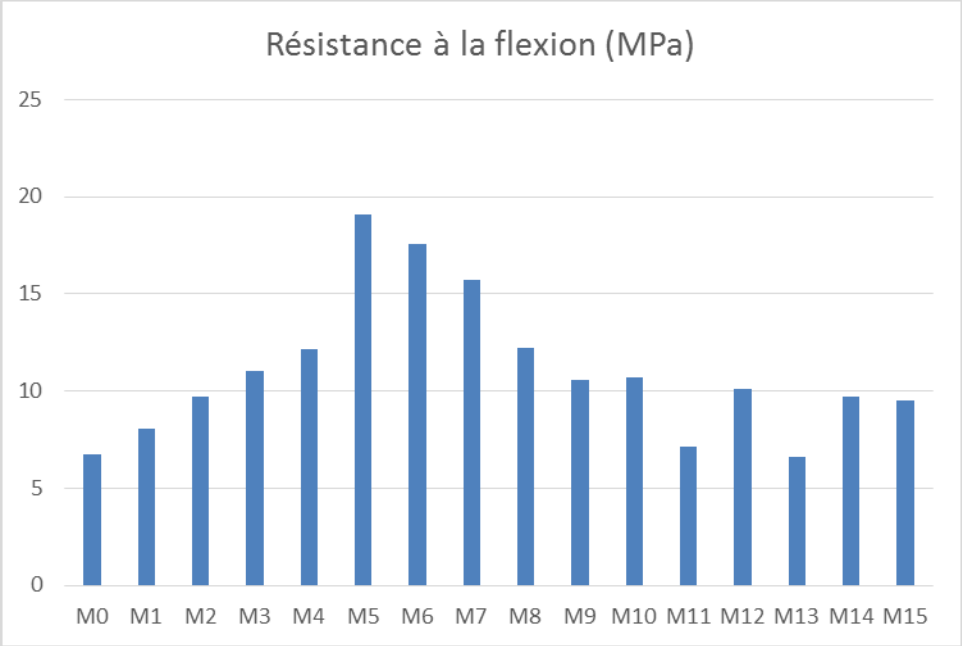


Figure III.2 : Effet de la FM et le déchet de plastique sur la résistance à la flexion.

Le mélange M0, représentant le béton géopolymère de référence sans additifs organiques, affiche une résistance à la flexion de 6,728 MPa, une valeur relativement élevée en comparaison aux travaux rapportés par A.A. Hilal et al. [63]. Cette performance est attribuée à la formation de gels C-A-S-H, des phases amorphes et polymériques générées par la réaction des ions calcium présents dans la solution alcaline. Ces gels jouent un rôle essentiel dans le renforcement de la structure interne du matériau, en comblant les vides et en établissant des liaisons chimiques solides entre les particules, ce qui améliore la cohésion et la résistance mécanique du composite géopolymère.

L'ajout de fibres de laine de mouton dans les mélanges M1 (1 %), M2 (1,5 %) et M3 (2 %) montre une amélioration progressive et significative de la résistance à la flexion. Le mélange M1 atteint 8,051 MPa, ce qui représente une augmentation d'environ 20 % par rapport à M0. Cette tendance se poursuit avec M2, qui atteint 9,728 MPa, soit un gain de près de 45 %. Enfin, le mélange M3, avec 2 % de FM, affiche la meilleure performance avec une résistance de 11,009 MPa, ce qui représente une amélioration impressionnante de plus de 63 % par rapport au mélange de référence.

Cette amélioration marquée s'aligne parfaitement avec le rôle des fibres dans les matrices géo polymériques. Les fibres de laine de mouton fonctionnent comme des renforts discontinus, reliant les microfissures qui apparaissent sous la pression de flexion (Figure 28). Cela permet au matériau d'absorber davantage d'énergie avant de se rompre, ce qui renforce sa ténacité et sa ductilité. L'augmentation de la Rf est directement liée à l'accroissement du pourcentage de fibres jusqu'à 2%, ce qui indique une optimisation de la répartition des fibres à ce niveau pour cette caractéristique.

Figure III.3 : écrasement de l'éprouvette sous l'essai flexion.

L'intégration simultanée de déchets plastiques et de laine de mouton (M4 à M15) révèle des résultats plus complexes pour la résistance à la flexion, mais souvent très prometteurs par rapport à M0.

Les mélanges M4 (10% de plastique, 1% de FM) et M5 (15% de plastique, 1% de FM) montrent des résistances à la flexion remarquablement élevées, atteignant respectivement 12,172 MPa et 19,092 MPa. M5 indique une augmentation d'environ 184% par rapport à M0 et de 73% par rapport à M3 (2% de FM).

L'augmentation du pourcentage de plastique à 20% (M6) et 25% (M7) permet de maintenir des résistances élevées (17,578 MPa et 15,7175 MPa), bien que celles-ci soient légèrement inférieures au pic observé avec M5.

L'ajout de plastique, surtout sous forme de petites particules ou de granulats légers, est un moyen efficace d'améliorer la résistance à la flexion. Ces particules agissent comme des inclusions souples qui aident à freiner la propagation des microfissures, tout en servant de points d'ancrage dans la matrice géopolymère. Quand on les associe à des fibres de laine de mouton, on observe un effet synergique : les fibres limitent l'apparition et l'élargissement des fissures, tandis que les particules plastiques renforcent la résilience du matériau et aident à mieux répartir les contraintes internes. Cette combinaison permet de retarder la propagation des ruptures. Le pic observé pour M5 indique un dosage optimal se situe autour de 10 % de plastique associé à 1 % de fibres de laine.

4. L’influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à l’étalement

L'essai d'étalement est une méthode qui permet d'évaluer la consistance et la maniabilité du béton frais. Il aide à déterminer comment le béton peut être mis en œuvre, coulé et compacté sans risque de ségrégation. Ce test est particulièrement sensible à la nature et à la quantité des matériaux utilisés. En analysant l'étalement de notre bétons géopolymères, pourrez mesurer l'impact de la laine de mouton et des déchets plastiques sur l'ouvrabilité du mélange lorsqu'il est encore frais.

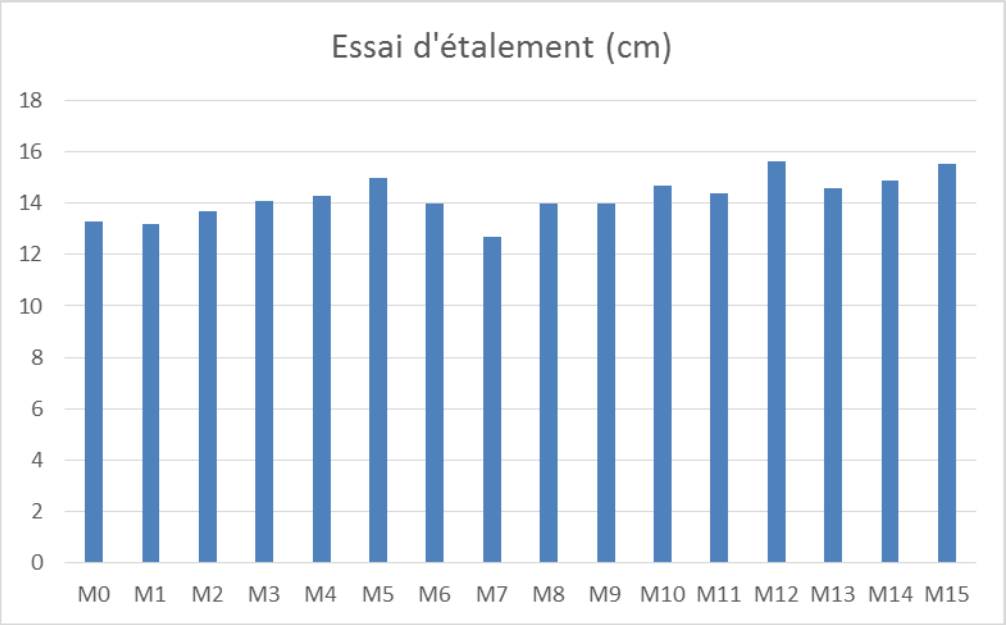


Figure III.4 : Effet de la FM et le déchet de plastique sur l'étalement des géopolymères.

Le mélange M0, qui sert de référence sans additifs organiques, affiche un étalement de 13,3 cm, ce qui représente la consistance de base du béton géopolymère non modifié. L'ajout de fibres de laine de mouton, à lui seul, a un impact modéré mais globalement positif sur l'étalement, indiquant une légère amélioration de la fluidité ou de la maniabilité du mélange.

Le mélange M1 (1 %) montre une valeur très proche de celle de M0, avec 13,2 cm. Le mélange M2 (1,5 %) atteint 13,7 cm, tandis que M3 (2 %) affiche la valeur la plus élevée, avec un étalement de 14,1 cm. Ces résultats laissent entendre qu'une augmentation de la quantité de fibres de laine de mouton peut favoriser une meilleure dispersion des particules solides, améliorant ainsi la maniabilité du béton géopolymère, dans certaines limites.

Le traitement des fibres avant de les incorporer au mélange peut vraiment aider à améliorer la rétention d'eau, en agissant comme un "lubrifiant" ou un "séparateur" entre les particules. Cela rend le béton géopolymère plus fluide. Une légère augmentation de l'étalement avec des taux de laine allant jusqu'à 2 % est donc un bon point, car cela améliore la maniabilité sans compromettre la qualité du mélange.

L'intégration combinée de déchets plastiques et de laine de mouton (M4 à M15) entraîne une augmentation générale de l'étalement par rapport à M0, ce qui indique une maniabilité améliorée pour la plupart de ces mélanges. Les particules de plastique n'absorbent pas l'eau de gâchage, la laissant disponible pour la matrice géopolymère, et peuvent réduire la friction entre les agrégats. Le pic à 15,0 cm pour M5 indique qu'il y a une quantité idéale de plastique qui améliore la maniabilité sans nuire à d'autres propriétés. En revanche, la légère baisse pour M6 et la chute à 12,7 cm pour M7, avec des niveaux très élevés de plastique, pourraient être dues à un effet de "remplissage excessif" ou à un changement dans la distribution granulométrique, rendant le mélange plus "sec" ou moins fluide, ou encore à une interaction négative à forte concentration. La valeur maximale pour M12 suggère que cette combinaison spécifique offre une excellente fluidité.

5. L'influence du FM et de déchet de plastique sur la résistance à l'absorption d'eau

L'absorption d'eau est une propriété clé pour évaluer la durabilité d'un béton, car elle est directement liée à sa porosité interconnectée et donc à sa susceptibilité aux attaques externes (cycle gel-dégel, pénétration de chlorures, carbonatation, etc.)

Une faible absorption d'eau est synonyme d'une matrice dense, moins perméable, et donc plus résistante aux agressions environnementales. L'analyse de cette propriété pour notre mélanges géopolymères avec laine de mouton et déchets plastiques permet d'évaluer leur potentiel de durabilité.

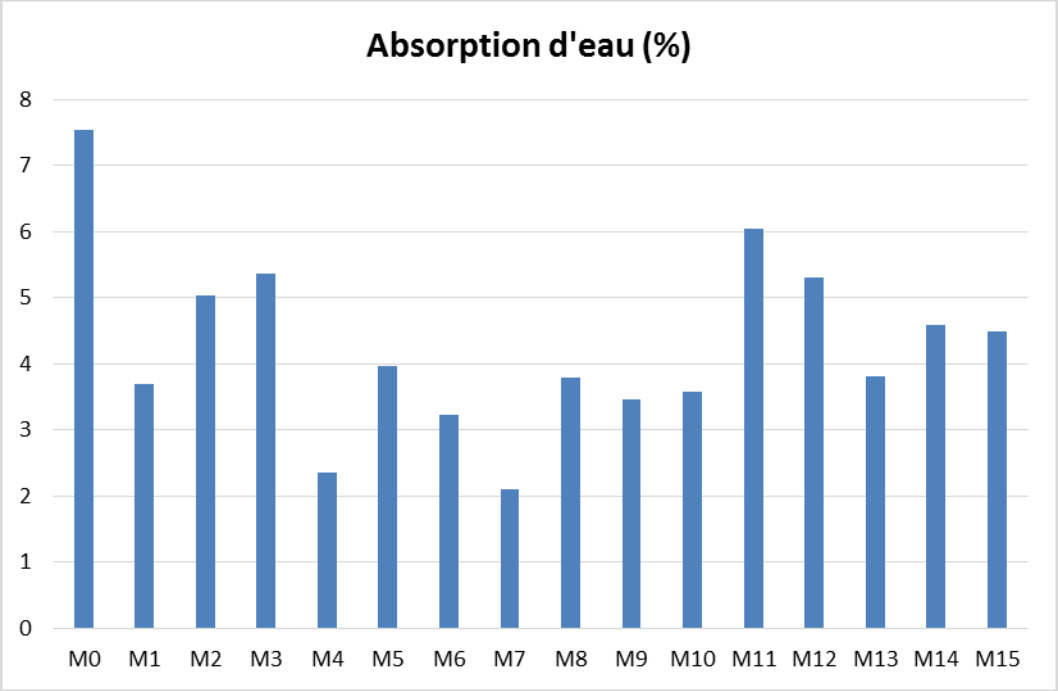


Figure III.5 : Effet de la FM et le déchet de plastique sur l'absorption d'eau des géopolymères.

Les bétons géopolymères ont généralement une absorption d'eau variable, souvent comparable ou parfois supérieure à celle des bétons de ciment Portland conventionnels Le mélange M0, sans additifs organiques, présente un taux d'absorption d'eau de 7,54%.

L'ajout de fibres de laine de mouton seules, dans les mélanges M1 à M3, tend à réduire l'absorption d'eau par rapport au mélange de référence M0, bien que cette réduction ne soit pas strictement proportionnelle au pourcentage de fibres. Le mélange M1, contenant 1 % de fibres, montre une diminution notable de l'absorption, avec une réduction de plus de 50 % par rapport à M0. En revanche, les mélanges M2 (1,5 %) et M3 (2 %) affichent des valeurs d'absorption légèrement supérieures à M1, tout en restant nettement inférieures à celle de M0.

Ces résultats suggèrent qu'un faible pourcentage de fibres (en particulier 1 %) est particulièrement efficace pour limiter la perméabilité, probablement en améliorant la compacité de la matrice ou en réduisant la connectivité des pores.

L'intégration simultanée de déchets plastiques et de laine de mouton entraîne une réduction très significative de l'absorption d'eau pour la majorité des mélanges par rapport à M0, et souvent

même par rapport aux mélanges avec seulement de la laine. Les déchets plastiques, étant naturellement hydrophobes, lorsqu'ils sont intégrés dans la matrice du béton, même en remplaçant du sable, contribuent à diminuer la porosité interconnectée ou à la rendre moins accessible à l'eau. Les valeurs très faibles pour M4 et M7 (2,36% et 2,105%) indiquent une amélioration considérable de l'imperméabilité. Cela pourrait être attribué à un effet de remplissage des pores ou à la nature non absorbante du plastique.

Les mélanges (M8 à M15) montrent des taux d'absorption d'eau qui sont clairement plus bas que ceux de M0, avec des valeurs variant de 3,455% pour M9 à 6,05% pour M11. Même s'il y a quelques différences, on peut dire que la tendance générale est à une absorption d'eau réduite par rapport à M0.

On observe que les mélanges avec 1% de FM (M4-M7) tendent à avoir les plus faibles absorptions d'eau, en particulier M7. L'augmentation du pourcentage de FM (1.5% et 2%) peut légèrement augmenter l'absorption par rapport aux mélanges à 1% FM, potentiellement en raison d'une porosité accrue générée par un excès de fibres. Cependant, l'effet bénéfique global du plastique sur l'hydrophobie reste dominant.

6. Caractérisation ultrasonique des matériaux géopolymères

L'analyse de la vitesse d'impulsion ultrasonore fournit des informations précieuses sur la qualité interne et l’ homogénéité des bétons géopolymères. Sa corrélation avec la résistance à la compression est un indicateur de l'intégrité structurelle du matériau.

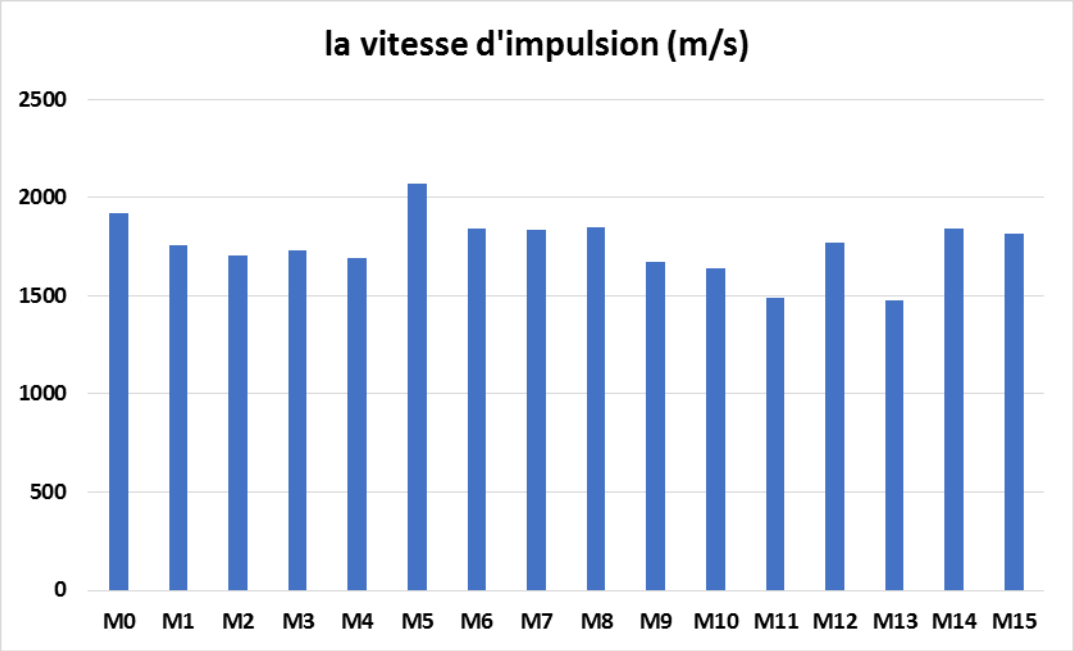


Figure III.6 : Effet de la FM et le déchet de plastique sur la vitesse d'impulsion

Le mélange M0, notre béton géopolymère de référence sans additifs, affiche la vitesse d'impulsion ultrasonore la plus élevée de l'étude, soit 1923,07 m/s. M0 possède également une résistance à la compression initiale élevée (33,295 MPa). Cette vitesse d'impulsion ultrasonore élevée pour M0 confirme une matrice géopolymère dense homogénéité et de bonne qualité.

La réduction de la vitesse d'impulsion ultrasonore avec l'ajout de laine de mouton (M1, M2, M3) est attendue. Bien que la laine de mouton puisse avoir un effet bénéfique sur la résistance à la flexion, sa présence introduit des discontinuités et une porosité dans la matrice qui ralentissent la propagation des ondes ultrasonores. Les fibres elles-mêmes sont moins denses que la matrice du béton et peuvent ne pas transmettre les ondes aussi efficacement.

L'intégration combinée de déchets plastiques et de laine de mouton (M4 à M15) a un impact significatif et généralement négatif sur la vitesse d'impulsion ultrasonore, avec une forte corrélation avec les résistances à la compression observées.

Un cas de M5 se distingue par une vitesse d'impulsion ultrasonore qui dépasse celle de M0, et il est fortement lié à sa remarquable résistance à la flexion (19,092 MPa) ainsi qu'à une résistance à la compression qui reste tout à fait respectable (30,802 MPa). Cela indique qu'avec cette

composition particulière (10% de plastique et 1% FM), le plastique n'a pas introduit de défauts significatifs et pourrait même avoir contribué à une meilleure compacité ou homogénéité de la matrice (possiblement par un effet de remplissage).

7. Le comportement de béton géopolymère à base de FM et de déchet de plastique à haute température

La figure 7 montrer la résistance à la compression en MPa des différents mélanges de béton géopolymère, exposé à différentes températures : à 20°C (condition initiale), après exposition à 200°C, à 400°C, à 600°C et à 800°C.L'analyse de la résistance à la compression après une exposition à haute température est essentielle pour évaluer la durabilité et la sécurité d'un matériau de construction.

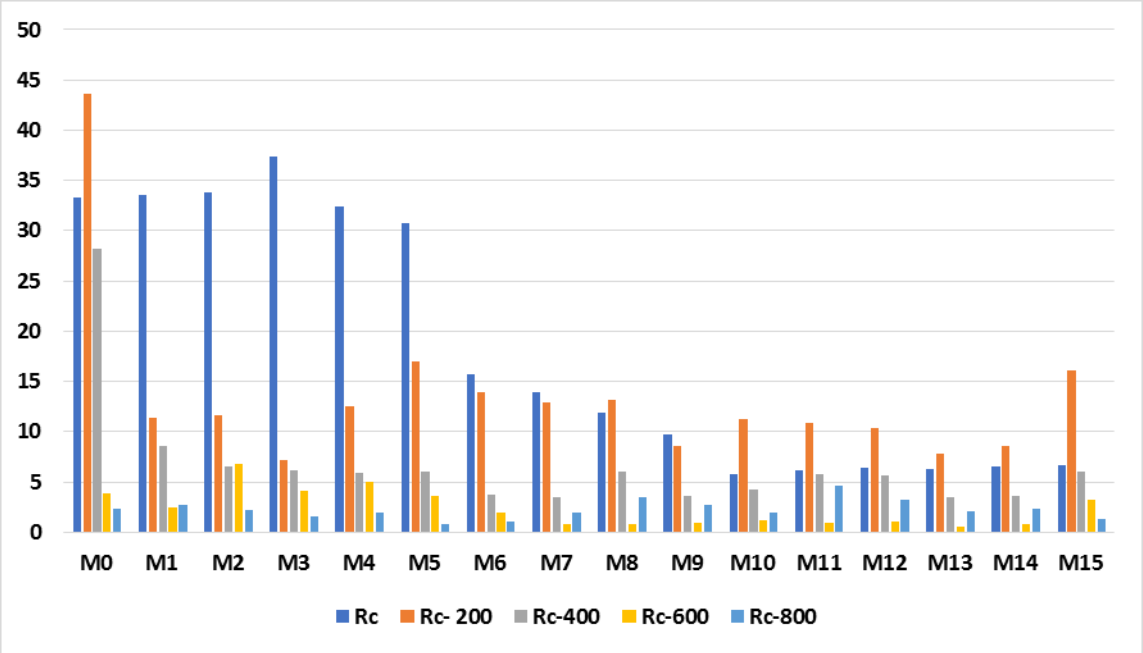


Figure III.7 : Perds de résistance du béton géopolymère soumis à haute température.

Le mélange témoin M0, qui ne contient ni laine de mouton ni déchets plastiques, sert de référence pour évaluer la performance intrinsèque de la matrice géopolymère. Il révèle une remarquable stabilité thermique jusqu'à des températures modérées. Non seulement sa résistance initiale est solide, mais on observe une augmentation significative de sa résistance à 200°C (passant de 33,295 MPa à 43,612 MPa, soit une amélioration de plus de 30%). Ce phénomène,

souvent attribué à une densification structurelle ou à la poursuite des réactions de géopolymérisation, témoigne de l'excellent comportement du géopolymère pur face à une exposition initiale à la chaleur. Bien qu'une dégradation commence au-delà de 400°C, M0 conserve encore près de 85% de sa résistance initiale à cette température. La chute devient drastique à partir de 600°C, indiquant la limite de sa stabilité thermique.

L'ajout de laine de mouton (M1 à M3) un effet marquant sur la réponse thermique du béton géopolymère. Contrairement à M0, ces mélanges montrent une perte de résistance assez marquée et précoce dès qu'on atteint 200°C. Par exemple, la résistance de M1 chute de 33,524 MPa à seulement 11,408 MPa, ce qui représente une perte d'environ 66%. Cette dégradation est directement liée à la nature organique de la laine, qui commence à se carboniser et à se décomposer à cette température. La combustion de ces fibres crée des vides et des micro-fissures dans la matrice , ce qui affaiblit considérablement sa capacité à supporter des charges. À des températures plus élevées, entre 400°C et 800°C, les résistances résiduelles de ces mélanges restent systématiquement inférieures à celles de M0, mettant en évidence l'effet durable et négatif de la laine sur la performance à haute température.

Figure III.8 : présentation des éprouvettes fabriqué après exposition au température élevée.

Les mélanges qui combinent des déchets plastiques et de la laine de mouton (M4 à M15) montrent la plus faible résistance après avoir été exposés à des températures élevées. Quand ces deux additifs organiques sont présents ensembles, on observe une perte de résistance significative dès 200°C, bien plus marquée que pour M0 ou même pour les mélanges contenant uniquement de la laine. Cette dégradation est due aux processus de fusion et de volatilisation du plastique, qui peuvent engendrer d'importants vides. À des températures de 400°C, 600°C, et surtout 800°C, la plupart de ces mélanges perdent presque toute leur résistance à la compression, agissant comme des matériaux structurellement affaiblis et incapables de supporter des charges importantes. Plus la proportion de plastique et de laine est élevée (comme dans le cas de M7, qui contient le plus de plastique), plus la résistance résiduelle est faible.

La perte de poids due à la température ne se limite pas simplement à une question de masse restante. C'est aussi un véritable indicateur des processus internes de dégradation, comme l'évaporation, la déshydratation, la décomposition, la combustion et la volatilisation, qui peuvent compromettre l'intégrité structurelle du béton géopolymère. La figure 8 présente les poids des différent échantillons soumis à diverses températures.

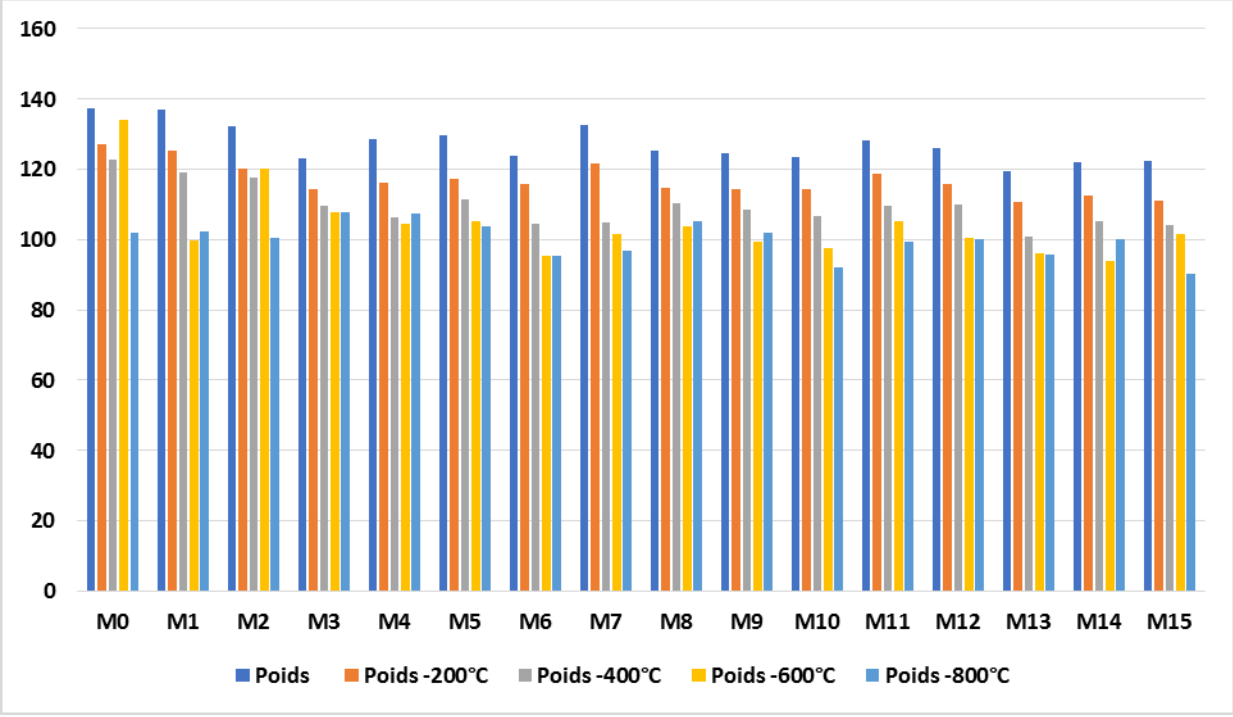


Figure III.9 : Perds de poids du béton géopolymère soumis à haute température.

La perte de poids à des températures plus basses, allant jusqu'à 200°C, est surtout due à l'évaporation de l'eau libre et de l'eau adsorbée qui se trouve dans la porosité du béton. Ensuite, entre 200 et 400 °C, on observe une perte de poids continue, qui est liée à la déshydratation des produits issus de la réaction géo polymérique. Au-delà de 400°C, la perte de poids devient beaucoup plus marquée.

Cela signale le début de la décomposition de la matrice géopolymère elle-même, entraînant des réarrangements ou des dépolymérisations de sa structure amorphe, ce qui libère d'autres composants volatils.

Pour le mélange témoin M0, la masse diminue progressivement avec l'augmentation de la température : de 137 g initialement à 101 g à 800°C. Les mélanges M1 (1% FM), M2 (1.5% FM) et M3 (2% FM) montrent des pertes de poids nettement plus importantes que M0 à toutes les températures. Cette différence devient encore plus marquée avec l'augmentation de la température et du pourcentage de FM.

De plus la perte de poids que l'on observe est due à la décomposition combinée de la laine de mouton et des déchets plastiques. Selon leur type, les plastiques ont des points de fusion relativement bas, souvent entre 100°C et 200°C, et ils commencent à se décomposer et à se volatiliser à des températures plus élevées, généralement entre 300°C et 600°C pour la plupart des polymères courants. La laine de mouton est une fibre organique qui commence à se décomposer et à se carboniser à une température de 200°C, à 400°C, 600°C et 800°C, la laine de mouton est presque entièrement consumée, contribuant massivement à la perte de poids globale des échantillons.

Les mélanges intégrant du plastique et du FM présentent les pertes de poids les plus élevées de tous les échantillons, et cela, à toutes les températures au-dessus de la température ambiante. Les mélanges contenant les plus grandes quantités de plastique (M7, M11, M15) et de FM (M8, M12, M13) affichent les pertes de poids maximales.

8. Conclusion

Ce chapitre a permis une exploration approfondie des performances du béton géopolymère élaboré avec l'incorporation de fibres de laine de mouton et de déchets plastiques, tant à l'état frais qu'à l'état durci, et sous l'influence de températures élevées.

Les résultats ont montré que la matrice géopolymère de référence (M0) possède des propriétés mécaniques initiales solides et une excellente stabilité thermique, avec même une amélioration de la résistance à la compression à 200°C. L'ajout de fibres de laine de mouton a apporté un avantage significatif à la résistance à la flexion du matériau, agissant comme un renfort interne. Cependant, ces fibres ont révélé une sensibilité précoce à la chaleur, entraînant une baisse notable de la résistance à la compression dès 200°C en raison de leur dégradation thermique et de la formation de porosité.

L'utilisation des déchets plastiques, associée à la laine de mouton, a montré des résultats à la fois complexes et souvent encourageants. D'un côté, cela a permis de réduire de manière significative l'absorption d'eau, ce qui laisse entrevoir un potentiel d'amélioration de la durabilité hydrique du béton. De l'autre, bien que certains mélanges aient amélioré la maniabilité et même la vitesse d'impulsion ultrasonore, des proportions élevées de plastique ont entraîné une chute notable de la résistance à la compression initiale et une dégradation importante à haute température, en raison de la formation de vides conséquents lors de leur volatilisation.

En somme, cette étude confirme le potentiel du béton géopolymère comme matériau durable tout en soulignant les défis liés à l'incorporation de ces additifs. Les résultats obtenus mettent en lumière l'existence de compromis entre la valorisation des déchets, l'ouvrabilité, la performance mécanique et la résistance au feu. Ces conclusions serviront de base à l'évaluation globale de l'aptitude de ce nouveau matériau pour des applications spécifiques (Béton de remplissage pour tranchées, fondations légères ou remblais, Blocs de maçonnerie non porteurs, Panneaux isolants).

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude visait à examiner les propriétés mécaniques, la durabilité et le comportement thermique de bétons géopolymères innovants, qui intègrent des déchets de laine de mouton et des déchets plastiques. En réalisant une série de tests (comme la résistance à la compression, la résistance à la flexion, l'absorption d'eau, l'étalement, la vitesse d'impulsion ultrasonore et le comportement à haute température), ce travail a permis de dresser un tableau complet des performances de ces matériaux composites et de répondre aux questions initiales sur leur viabilité technique et environnementale.

Les résultats obtenus confirment d'abord la performance intrinsèque remarquable de la matrice géopolymère de référence (M0). Celle-ci a démontré de bonnes résistances mécaniques à l'état initial, une maniabilité satisfaisante et, surtout, une stabilité thermique exceptionnelle jusqu'à 400°C, avec un gain de résistance à 200°C, ce qui la distingue favorablement des bétons de ciment Portland traditionnels.

L'ajout de fibres de laine de mouton a montré des résultats mitigés. D'un côté, cela a considérablement amélioré la résistance à la flexion, ce qui indique une meilleure ténacité et une capacité accrue à gérer les fissures. De l'autre, cela a rendu le matériau plus sensible aux températures élevées. La dégradation thermique de la laine à partir de 200°C a provoqué une perte de masse et une diminution notable de la résistance à la compression résiduelle, en raison de la formation de vides.

L'intégration des déchets plastiques, en combinaison avec la laine de mouton, a offert des perspectives particulièrement intéressantes et complexes. D'un point de vue de la durabilité hydrique, ces mélanges ont manifesté une réduction très significative de l'absorption d'eau, conférant au béton un potentiel accru de résistance à l'humidité et aux agressions environnementales associées.

Par ailleurs, la présence de plastique a généralement amélioré la maniabilité du béton frais, facilitant potentiellement sa mise en œuvre. Cependant, cet avantage s'est souvent accompagné d'un compromis sur la résistance à la compression initiale, qui a diminué avec l'augmentation de la teneur en plastique.

Les performances à haute température ont été fortement dégradées, en grande partie à cause de la volatilisation des plastiques, qui a provoqué une perte de masse importante et une chute quasi totale de la résistance mécanique dans les mélanges les plus chargés. Malgré cela, le mélange M5 s'est démarqué par une excellente résistance en flexion et la meilleure vitesse d'impulsion ultrasonore, indiquant qu'un dosage bien ajusté peut, dans certains cas, compenser les effets néfastes liés à la chaleur.

Finalement, cette étude met en lumière le double défi de la valorisation des déchets dans les bétons géopolymères : si elle offre une voie prometteuse pour réduire l'impact environnemental de la construction et améliorer certaines propriétés (flexion, maniabilité, absorption d'eau), elle exige une compréhension approfondie des interactions complexes entre les additifs et la matrice géopolymère, notamment en ce qui concerne la résistance thermique et la résistance à la compression.

Les contributions de cette mémoire résident dans la caractérisation détaillée d'un nouveau matériau composite et dans la quantification des impacts spécifiques de la laine de mouton et des déchets plastiques. Ces connaissances sont essentielles pour guider le développement de futures formulations.

Perspectives :

Pour aller au-delà de cette étude, des essais à long terme sur la durabilité (cycle gel-dégel, attaques chimiques) ainsi que des analyses microstructurales plus poussées (MEB, DRX) seraient également nécessaires pour affiner la compréhension des mécanismes d'interaction et de dégradation.

Enfin, des études technico-économiques et d'analyse du cycle de vie pourraient confirmer la viabilité de ces bétons géopolymères innovants pour des applications à grande échelle.

Références bibliographiques

[1] M. Boumediene, « étude des propriétés des matériaux géopolymères étuvés », université Mohamed Boudiaf – M'sila, 2022.

[2] M. F. Rozi, J. Tarigan, et A. Perwira, « Analisis Sifat Mekanik Beton Geopolymer Berbahan Dasar Fly Ash PLTU Pangkalan Susu », vol. 1, no 5, p. 567-579, 2020.

[3] Zhang, Z., et al., Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. Construction and building materials, 2014. **56**: p. 113-127.

[4] Hassan, A., M. Arif, and M. Shariq, Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment–A review of mechanical properties and microstructure. Journal of cleaner production, 2019. 223: p. 704-728.

[5] Davidovits, J., Geopolymer Chemistry & Applications, 4 th. Institut Géopolymère, Saint Quentin, France, 2015.

[6] Adam, A., Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete, 2009, Citeseer.

[7] Liu, M.Y.J., et al., Microstructural investigations of palm oil fuel ash and fly ash based binders in lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. Construction and building materials, 2016. 120: p. 112-122.

[8] Ma, C.-K., A.Z. Awang, and W. Omar, Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. Construction and building materials, 2018. 186 : p. 90-102.

[9] O. A. Abdulkareem et M. Ramli, « Optimization of alkaline activator mixing and curing conditions for a fly ash-based geopolymer paste system », Modern Applied Science, vol. 9, no 12, p. 61, 2015.

[10] D. Hardjito, C. C. Cheak, et C. H. L. Ing, « Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar », Modern applied science, vol. 2, no 4, p. 3-11, 2008.

[11] J. Davidovits, « Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting développement of very early high strength cement », Journal of Materials éducation, vol. 16, p. 91-91, 1994.

[12] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, et N. Roussel, « Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives », Cement and Concrete Research, vol. 40, no 5, p. 820-826, 2010.

[13] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, et X. Huang, « An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011) », Construction and building materials, vol. 31, p. 364-383, 2012.

[14] Farooq, F., et al., Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. Construction and building materials, 2021. 306 : p. 124762.

[15] Luhar, S. and U. Khandelwal, A study on water absorption and sorptivity of geopolymer concrete. International Journal of Civil Engineering, 2015. 2(8) : p. 1-9.

[16] Kumar, A. and S. Kumar, Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. Construction and building materials, 2013. 38: p. 865-871.

[17] Schwarz, N. and N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. Cement and concrete research, 2008. 38(4) : p. 429-436.

[18] Cyr, M., R. Idir, and T. Poinot, Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. Journal of materials science, 2012. 47(6): p. 2782-2797.

[19] Anuradha, R., R. Thirumala, and P.N. John, Optimization of molarity on workable self-compacting geopolymer concrete and strength study on SCGC by replacing fly ash with silica fume and GGBFS. Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng, 2014. 3(1): p. 11-18.

[20] Schwarz, N. and N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. Cement and concrete research, 2008. 38(4): p. 429-436.

[21] S. F. A. Zaidi et al., « Synthesis & characterization of natural soil based inorganic polymer foam for thermal insulations », Construction and Building Materials, vol. 157, p. 994-1000, 2017.

[22] J. Thaarrini et V. Ramasamy, « Properties of foundry sand, ground granulated blast furnace slag and bottom ash based geopolymers under ambient conditions », Periodica Polytechnica Civil Engineering, vol. 60, no 2, p. 159-168, 2016.

[23] D. B. Nergis, P. Vizureanu, L. Andrusca, et D. Achitei, « Performance of local fly ash geopolymers under different types of acids », présenté à IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, p. 012026.

[24] S. A. Rasaki, Z. Bingxue, R. Guarecuco, T. Thomas, et Y. Minghui, « Geopolymer for use in heavy metals adsorption, and advanced oxidative processes: A critical review », Journal of Cleaner Production, vol. 213, p. 42-58, 2019.

[25] S. M. Laskar et S. Talukdar, « Preparation and tests for workability, compressive and bond strength of ultra-fine slag based geopolymer as concrete repairing agent », Construction and Building Materials, vol. 154, p. 176-190, 2017.

[26] Vijai, K., R. Kumutha, and B. Vishnuram, Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete. International Journal of the Physical Sciences, 2010. 5(9): p. 1419-1423.

[27] Assi, L.N., E.E. Deaver, and P. Ziehl, Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. Construction and building materials, 2018. 167: p. 372-380.

[28] Ranjbar, N., et al., Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. Materials & Design, 2014. 59: p. 532-539.

[29] Ramujee, K. and M. PothaRaju, Mechanical properties of geopolymer concrete composites. Materials Today: Proceedings, 2017. 4(2): p. 2937-2945.

[30] Izquierdo, M., et al., Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching. Journal of hazardous materials, 2009. 166(1): p. 561-566.

[31] l-Majidi, M.H., A. Lampropoulos, and A.B. Cundy, Tensile properties of a novel fibre reinforced geopolymer composite with enhanced strain hardening characteristics. Composite Structures, 2017. 168 : p. 402-427.

[32] Farooq, F., et al., Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. Construction and building materials, 2021. 306: p. 124762.

[33] Druta, C., Tensile strength and bonding characteristics of self-compacting concrete2003: Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.

[34] Luhar, S. and U. Khandelwal, A study on water absorption and sorptivity of geopolymer concrete. International Journal of Civil Engineering, 2015. 2(8): p. 1-9.

[35] Topark-Ngarm, P., P. Chindaprasirt, and V. Sata, Setting time, strength, and bond of high-calcium fly ash geopolymer concrete. Journal of materials in civil engineering, 2015. 27(7): p. 04014198.

[36] Shalini, A., G. Gurunarayanan, and S. Sakthivel, Performance of rice husk ash in geopolymer concrete. Int. J. Innov. Res. Sci. Tech, 2016. 2: p. 73-77.

[37] Anuradha, R., R. Thirumala, and P.N. John, Optimization of molarity on workable self-compacting geopolymer concrete and strength study on SCGC by replacing fly ash with silica fume and GGBFS. Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng, 2014. 3(1): p. 11-18.

[38] olêdo Filho, R.D., et al., Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. Cement and Concrete Composites, 2003. 25(2): p. 185-196.

[39] Ajay, K., et al., Properties and industrial applications of rice husk: A review. International J. of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012. 2: p. 86-90.

[40] anjayan, J.G., A. Nazari, and H. Pouraliakbar, FEA modelling of fracture toughness of steel fibre-reinforced geopolymer composites. Materials & Design, 2015. 76: p. 215-222.

[41] Shaikh, F.U.A., H. Odoh, and A.B. Than, Effect of nano silica on properties of concretes containing recycled coarse aggregates. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2015. 168(2): p. 68-76.

[42] Panda, S., A. Nanda, and S.K. Panigrahi, Potential utilization of waste plastic in sustainable geopolymer concrete production: A review. Journal of Environmental Management, 2024. 366: p. 121705.

[43] A. A. Siyal, K. A. Azizli, Z. Man, et H. Ullah, « Effects of parameters on the setting time of fly ash based geopolymers using Taguchi method », Procedia engineering, vol. 148, p . 302-307, 2016.

[44] A. Antoni, S. W. Wijaya, et D. Hardjito, « Factors affecting the setting time of fly ash based geopolymer », présenté à Materials Science Forum, Trans Tech Publ, 2016, p. 90-97.

[45] S. A. Rasaki, Z. Bingxue, R. Guarecuco, T. Thomas, et Y. Minghui, « Geopolymer for use in heavy metals adsorption, and advanced oxidative processes: A critical review », Journal of Cleaner Production, vol. 213, p. 42-58, 2019.

[46] S. M. Laskar et S. Talukdar, « Preparation and tests for workability, compressive and bond strength of ultra-fine slag based geopolymer as concrete repairing agent », Construction and Building Materials, vol. 154, p. 176-190, 2017.

[47] D. Bondar, C. J. Lynsdale, N. B. Milestone, N. Hassani, et A. A. Ramezanianpour, « Engineering properties of alkali-activated natural pozzolan concrete », ACI Materials Journal, vol. 108, no 1, p. 64-72, 2011.

[48] J. L. Provis et J. S. J. Van Deventer, Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier, 2009.

[49] M. Bertolini et L. Guardigli, « Upcycling shipping containers as building components: an environmental impact assessment », The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 25, p. 947-963, 2020.

[50] C. Kizhakkethottam, « Sustainable Urban Resilience for the Next Generation (SURGe) Initiative-SURGe– », 2023.

[51] M. Wahlström, J. Laine-Ylijoki, O. Wik, A. Oberender, et O. Hjelmar, Hazardous waste classification : Amendments to the European Waste Classification regulation-what do they mean and what are the consequences? Nordic Council of Ministers, 2016.

[52] A. Vásquez, V. Cárdenas, R. A. Robayo, et R. M. de Gutiérrez, « Geopolymer based on concrete demolition waste », Advanced Powder Technology, vol. 27, no 4, p. 1173-1179, 2016.

[53] R. Hossain, M. T. Islam, A. Ghose, et V. Sahajwalla, « Full circle: Challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy », Journal of Cleaner Production, vol. 368, p. 133127, 2022.

[54] B. Nematollahi et J. Sanjayan, « Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer », Materials & Design, vol. 57, p. 667-672, 2014.

[55] J. Migunthanna, P. Rajeev, et J. Sanjayan, « Investigation of waste clay brick as partial replacement of geopolymer binders for rigid pavement application », Construction and Building Materials, vol. 305, p. 124787, 2021.

[56] J. Migunthanna, P. Rajeev, et J. Sanjayan, « Waste clay bricks as a geopolymer binder for pavement construction », Sustainability, vol. 14, no 11, p. 6456, 2022.

[57] D. Hardjito et B. V. Rangan, « Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete », 2005.

[58] C.-L. Hwang, M. D. Yehualaw, D.-H. Vo, et T.-P. Huynh, « Development of high strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders », Construction and Building Materials, vol. 218, p. 519-529, 2019.

[59] X. Zhao, H. Wang, X. Wang, et X. Zhao, « Sustainable application of waste eggshell as fillers in alkali-activated solid waste-based materials: Varying treated methods and particle sizes », Construction and Building Materials, vol. 425, p. 136040, 2024.

[60] M. Tonini de Araújo, S. T. Ferrazzo, G. J. Bruschi, G. J. B. Silva, et N. C. Consoli, « Strength, Mineralogy, Microstructure, and Statistical Analysis of Alkali-Activated Sugarcane Bagasse Ash–Eggshell Lime Pastes », Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 35, no 6, p. 04023107, 2023.

[61] A. M. Rashad, G. M. Essa, Y. A. Mosleh, et W. Morsi, « Valorization of Ceramic Waste Powder for Compressive Strength and Durability of Fly Ash Geopolymer Cement », Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 49, no 4, p. 5653-5665, 2024.

[62] F. Shi, S. Cheng, et L. Li, « Mesoscale Modeling for Predicting Effective Properties and Damage Behavior of Geopolymer Concrete », Materials, vol. 18, no 1, p. 88, 2024.

[63] A. A. Hilal, A. S. Nader, et B. M. Kurji, « Producing Sustainable Lightweight Geopolymer Concrete Using Waste Materials », Civil and Environmental Engineering, vol. 20, no 2, p. 1120-1128, déc. 2024, doi: 10.2478/cee-2024-0081.