



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريش

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

قسم الهندسة المدنية

Département de génie civil



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Intitulé :

L'utilisation du déchet de liège et de plastique pour la production des matériaux de construction léger

Présenté par :

HARCHAOU Imad

Soutenu le : 30 / 06 / 2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr : DEBOUCHA Sadek</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr : HAMLIA Wafa</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr : NOUI Amar</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr : DEGHEFEL Moussa</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr : BENMEROUL Farid</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



REMERCIEMENTS

Je rends d'abord grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir guidé et accordé la patience et la force nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante, **HAMLA Wafa**, pour son accompagnement bienveillant, sa disponibilité constante et la richesse de ses conseils qui ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.*

Mes remerciements les plus sincères vont également aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques constructives et enrichissantes.

Je remercie aussi l'ensemble du corps professoral de la faculté de science et de la technologie, et plus particulièrement pour la qualité de leur enseignement, leur engagement et leur dévouement tout au long de mon parcours universitaire.

Un immense merci à ma famille, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien inébranlable dans les moments de doute comme de réussite.

À mes amis et collègues, pour leur présence réconfortante, leurs encouragements constants et les souvenirs inoubliables partagés au fil des années.

Enfin, à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce travail, recevez l'expression de ma reconnaissance la plus profonde.



DÉDICACE

Louange à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la sagesse pour mener à bien ce parcours. Sans Sa miséricorde et Sa guidance, rien n'aurait été possible.

À la mémoire de ma chère mère,

qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et l'entoure de Sa lumière dans sa demeure éternelle. Ton amour, ta tendresse et tes sacrifices silencieux continuent de m'accompagner à chaque étape de ma vie.

Tu restes à jamais dans mon cœur — source d'inspiration, d'amour et de courage.

À mon cher père,

pour ta présence rassurante, tes sacrifices immenses et ton soutien indéfectible.

Merci de m'avoir appris la valeur de l'effort, de la dignité et de la persévérance.

À ma famille,

merci pour votre affection sincère, votre compréhension et votre soutien constant, surtout dans les moments les plus exigeants. Votre amour est ma force.

À mes amis fidèles,

pour vos mots réconfortants, votre écoute et vos encouragements précieux tout au long de ce parcours. Votre présence a fait toute la différence.

À mes camarades de promotion,

avec qui j'ai partagé les joies, les défis et les longues heures de travail. Merci pour les souvenirs inoubliables et l'esprit d'équipe qui nous a unis.

À mes professeurs et encadrants,

je vous adresse mes plus profonds remerciements pour votre accompagnement, votre rigueur académique et vos conseils éclairés. Vous avez semé en moi l'amour du savoir et le goût de l'excellence.

Résumé

Résumé

Dans un contexte où la durabilité des matériaux de construction et la réduction de l'empreinte carbone sont primordiales, le développement de bétons géopolymères légers représente une avancée significative. L'utilisation de matériaux alternatifs et recyclés comme le liège expansé, le plastique et la perlite s'inscrit parfaitement dans une démarche d'économie circulaire et de valorisation des déchets.

Ce mémoire de recherche se concentre sur le développement d'un béton géopolymère léger. L'approche adoptée consiste à substituer partiellement les agrégats traditionnels (sable) par des matériaux légers et alternatifs tels que le liège expansé, le plastique et la perlite. Une quantité de fumée de silice à être incorporer comme substituts partiels au laitier granulé de haut fourneau dans le but d'amélioré les caractéristiques rhéologiques et mécaniques de ce béton innovant.

Les objectifs principaux de cette étude sont optimisés la formulation des mélanges géopolymères et réaliser des tests physiques et mécaniques approfondis pour évaluer les propriétés finales des géopolymères développés. Les résultats indiquent que l'incorporation de déchets de plastique, de liège et de la perlite influence la maniabilité, la densité, la porosité et la résistance mécanique des géopolymères.

Mots Clés : Béton géopolymère léger, plastique, liège, perlite, résistance mécanique.

Abstract

In a context where the sustainability of construction materials and the reduction of carbon footprint are of paramount importance, the development of lightweight geopolymer concrete represents a significant advancement. The use of alternative and recycled materials such as expanded cork, plastic, and perlite aligns perfectly with a circular economy approach and waste valorization.

This research thesis focuses on the development of lightweight geopolymer concrete. The adopted approach involves the partial substitution of traditional aggregates (sand) with lightweight alternative materials such as expanded cork, plastic, and perlite. Additionally, a portion of silica fume is incorporated as a partial replacement for ground granulated blast furnace slag, with the aim of improving the rheological and mechanical properties of this innovative concrete.

The main objectives of this study are to optimize the formulation of geopolymer mixes and to conduct thorough physical and mechanical testing to evaluate the final properties of the developed geopolymers. The results indicate that the incorporation of plastic, cork, and perlite waste significantly influences the workability, density, porosity, and mechanical strength of the geopolymer concretes.

Keywords: Lightweight geopolymer concrete, plastic, cork, perlite, mechanical strength.

الملخص

في سياق تنزايد فيه أهمية استدامة مواد البناء وتقليل البصمة الكربونية، يُعدّ تطوير خرسانة الجيوبوليمر خفيفة الوزن تقدماً ملحوظاً في هذا المجال. إن استخدام مواد بديلة ومعاد تدويرها مثل الفلين الممدد، والبلاستيك، والبيرلايت ينسجم تماماً مع نهج الاقتصاد الدائري واستغلال النفايات.

يركز هذا البحث على تطوير خرسانة جيوبوليمر خفيفة الوزن. وتعتمد المنهجية المتبعة على الاستبدال الجزئي للركام التقليدي (الرمال) بمواد خفيفة بديلة مثل الفلين الممدد، والبلاستيك، والبيرلايت. كما يتم إدخال كمية من دخان السيليكا كبديل جزئي للخبث الحبيبي الناتج عن أفران الصهر العالية، بهدف تحسين الخصائص الريولوجية والميكانيكية لهذا النوع المبتكر من الخرسانة.

تهدف هذه الدراسة بشكل رئيسي إلى تحسين صياغة الخلطات الجيوبوليمرية وإجراء اختبارات فيزيائية وميكانيكية معمقة لتقييم الخصائص النهائية للجيوبوليمرات المطورة. وتشير النتائج إلى أن دمج نفايات البلاستيك والفلين والبيرلايت يؤثر بشكل ملحوظ على قابلية التشغيل والكثافة والمسامية والمقاومة الميكانيكية للخرسانة الجيوبوليمرية.

الكلمات المفتاحية: خرسانة جيوبوليمر خفيفة الوزن، البلاستيك، الفلين، البيرلايت، المقاومة الميكانيكية.

Liste des figures

Figure I.1: Constituant du béton géopolymère	9
Figure I.2 : Les principaux facteurs affectant la maniabilité des bétons géopolymères, et le degré de leur influence selon : (a) le rapport eau-liant ; (b) la concentration de NaOH.....	10
Figure I.3: Retrait de séchage du géopolymère, 30 % de cendres volantes et bétons à retrait réduit	12
Figure I.4: Développement de la résistance à la compression du béton géopolymère	14
Figure I.5: Représentation schématique le bétons de granulats légers	15
Figure I.6: Porosité du béton.....	20
Figure I.7: La résistance en compression en fonction de la masse volumique du béton léger à 7 et 28 jours	22
Figure I.8: Le modules élastiques de bétons légers à 7 et 28 jours	23
Figure II.1: Laitier de haut fourneau (Lafarge à Hammam Dalaa - M'sila).....	25
Figure II.2: La fumée de silice utilisée.....	26
Figure II.3: Préparation de la solution.....	27
Figure II.4: Silicates d'alcaline Na_2SiO_3	29
Figure II.5: Courbes granulométriques du sable.....	29
Figure II.6: Le sable utilisé.....	30
Figure II.7: Déchet de plastique utilisée.....	30
Figure II.8: Courbes granulométriques du déchet de plastique.....	31
Figure II.9: Déchet de liège utilisé.....	31
Figure II.10: Courbes granulométriques du déchet de liège.....	32
Figure II.11: La perlite utilisée.....	33
Figure II.12: Courbes granulométriques de la perlite.....	33
Figure II.13: Préparation des mélanges.....	34
Figure II.14: Echantillons préparé.....	35
Figure II.15: Les échantillons démoulés.....	36
Figure II.16: Essai d'étalement des géopolymères.....	36
Figure II.17: Essai d'absorption d'eau des géopolymères.....	37
Figure II.18: Essais de résistance à la compression.....	38
Figure II.19: Essais de résistance à la flexion.....	38
Figure II.20: Essai de l'ultrasonique.....	39
Figure II.21: Essais de Conductivité thermique.....	39
Figure II.22: Eprouvettes du béton géopolymère avant et après exposition à haute température..	40
Figure III.1: Résistance à la compression.....	45
Figure III.2: Résistance à la flexion.....	47
Figure III.3: La densité du géopolymère réalité	48
Figure III.4: Absorption d'eau.....	49
Figure III.5: Essai d'étalement.....	50
Figure III.6: Illustration visuelle de l'étalement.....	51
Figure III.7: Vitesse d'impulsion.....	52
Figure III.8: Conductivité thermique.....	53

Liste des figures

Figure III.9: Perds de résistance du béton géopolymère soumis à haute température.	55
Figure III.10: Présentation des éprouvettes fabriqué par plastique avant et après exposition au température élevée.....	56
Figure III.11: Présentation des éprouvettes fabriqué par perlite avant et après exposition au température élevée.....	57
Figure III.12: Présentation des éprouvettes fabriqué par liège après exposition au température élevée. ...	57
Figure III.13: Perds de poids du béton géopolymère soumis à haute température.....	58

Liste des tableaux

Tableau II.1: Caractéristiques de la soude caustique utilisée.....	27
Tableau II.2: Caractéristiques physico-chimiques du silicate de sodium utilisé.....	28
Tableau II.3: Propriétés physiques du sable utilisé.....	30
Tableau II.4: Caractéristiques physico-chimiques de la perlite expansée.....	32
Tableau II.5: Compositions des mélanges confectionnés.....	34

Table des matières

REMERCIEMENT

DEDICAS

LISTE DE FIGURE

LISTE DE TABLEAUX

RESUME

ABSTRAC

الملخص

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Béton géopolymère et béton léger

I.1. Introduction 6

I.2. Béton géopolymère 6

I. 2.3. Composition 8

I. 2.4. Formulation et propriété de mise en œuvre..... 9

I. 2.5. Caractérisation de béton géopolymère 10

I. 2.5.1. Les caractéristiques à l'état frais 10

I. 2.5.2. Les propriétés à l'état durci 13

I.3. Béton léger..... 15

I. 3.1. Définition 15

I. 3.2.Composition 16

I. 3.2.1. Les liants hydrauliques..... 16

I. 3.2.2. Les granulats légers 16

I. 3.2.3.Les Adjuvants 17

I. 3.3. Formulation et propriété de mise en œuvre..... 17

I.4. Caractérisation des bétons léger 18

I. 4.1.Caractéristiques physiques 18

I.4.1.1. Mise en œuvre 18

I.4.1.2. La masse volumique apparente 18

I.4.1.3. L'absorption..... 19

I.4.1.4. La porosité 19

Table des matières

I.4.1.5. Retrait	21
I.4.2.Caractéristiques mécaniques	21
I.4.2.1. Résistance à la compression.....	21
I.4.2.2. Résistance à la traction	22
I.4.2.2. Module élastique.....	22
I.5. Conclusion	23

Chapitre II : Matériaux et procédures Expérimentales

II.1. Introduction	25
II.2. Matériaux	25
II.2.1. Laitier de haut fourneau	25
II.2.2. fumée de silice	26
II.2.3. Activateurs	26
II.2.3.1 Soude caustique NaOH	26
II.2.3.2 Silicates de sodium Na_2SiO_3	28
II.2.4. Sable	29
II.2.5. Déchet de plastique.....	30
II.2.6. Déchet de liège.....	31
II.2.7. Perlite.....	32
II.3 Préparation des mélanges	33
II.4 Essai réaliser.....	36

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	45
III.2. Résistance à la compression	45
III.3. Résistance à la flexion.....	46
III.4. La densité	48
III.5. Absorption d'eau	49
III.6. Essai d'étalement.....	50
III.7. Vitesse d'impulsion.....	52
III.8. Conductivité thermique.....	53
III.9. Comportement du béton à haute température	55
III.9.1. Résistance mécanique à la compression	55
III.9.2. Pert de poids	58

Table des matières

III.10. Conclusion	60
Conclusion Générale	62
Références	66

Introduction Générale

Introduction Générale

En raison de la dégradation progressive de l'environnement et de l'urgence de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, le secteur de la construction se trouve confronté à un défi majeur : réaliser des constructions plus respectueuses de l'environnement et durables, tout en préservant la performance des matériaux employés. Le béton, bien qu'il soit fondamental pour nos infrastructures contemporaines, constitue également l'un des principaux facteurs de pollution, principalement en raison du ciment Portland, dont le processus de fabrication émet des quantités significatives de dioxyde de carbone (CO₂). Cette prise de conscience a incité les chercheurs et les ingénieurs à réévaluer les matériaux conventionnels et à explorer des alternatives écologiquement responsables.

C'est dans ce cadre que deux types de béton suscitent un intérêt de plus en plus marqué : le béton géopolymère et le béton léger. Le béton géopolymère, conçu par le biais d'une réaction chimique entre des matières contenant une forte proportion d'aluminosilicates (telles que les cendres volantes ou le laitier de haut fourneau) et une solution alcaline, se présente comme une alternative pertinente pour atténuer l'empreinte carbone associée à la construction, tout en garantissant d'excellentes propriétés mécaniques et une excellente durabilité [1, 2]. Parallèlement, le béton léger suscite également l'intérêt en raison de sa faible densité, résultant de l'utilisation de granulats spécifiques (tels que la perlite, le polystyrène ou le liège), ce qui permet d'alléger les structures tout en optimisant leurs performances thermiques et acoustiques [3].

Aujourd'hui, les investigations s'étendent au-delà des seules performances techniques. Elles se dirigent vers des formulations susceptibles de satisfaire des objectifs environnementaux ambitieux, tels que la valorisation des déchets industriels et l'intégration de matériaux recyclés ou naturels. L'objectif est de s'inscrire intégralement dans une démarche d'économie circulaire, dans laquelle chaque ressource est utilisée de manière responsable. De plus, l'association entre les propriétés du béton géopolymère et celles du béton léger ouvre la voie à des matériaux hybrides encore plus prometteurs, capables de répondre aux besoins des constructions modernes, tout en respectant les contraintes écologiques de notre époque.

La nouveauté de cette recherche réside dans l'approche combinée d'allègement du béton géopolymère avec des agrégats innovants et l'amélioration de ses propriétés grâce à la fumée de silice. Alors que les bétons géopolymères sont déjà un domaine de recherche actif, l'optimisation

Introduction Générale

simultanée de la légèreté, de la rhéologie et des performances mécaniques avec cette combinaison spécifique de matériaux est relativement inexplorée. Cette étude ouvre donc de nouvelles perspectives pour des applications plus légères, plus écologiques et potentiellement plus économiques dans la construction, contribuant ainsi de manière significative à l'innovation dans le génie civil.

Problématique

Le béton géopolymère, alternative prometteuse au ciment Portland traditionnel, offre une voie pour valoriser des sous-produits industriels comme liants. Cependant, l'intégration d'agrégats légers issus de déchets dans ces matrices géopolymères, bien que présentant un potentiel pour alléger les structures et améliorer l'isolation, soulève des questions fondamentales quant à l'impact multifactoriel sur leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques.

Dès lors, comment l'incorporation de déchets plastiques, de perlite et de liège, en substitution partielle du sable, influence-t-elle de manière différenciée les caractéristiques de maniabilité, de densité, de porosité, de performances mécaniques à température ambiante et à haute température, ainsi que les propriétés thermiques (conductivité et stabilité) des bétons géopolymères, et dans quelle mesure ces modifications peuvent-elles orienter leur application vers des usages spécifiques et plus durables dans le secteur de la construction ?

Objectifs de l'Étude

La présente étude vise à répondre à la problématique soulevée en se fixant les objectifs spécifiques suivants :

- Caractériser le comportement à l'état frais des bétons géopolymères incorporant différents déchets légers, notamment en évaluant leur maniabilité par l'essai d'étalement.
- Quantifier l'impact de la substitution du sable par le plastique, la perlite et le liège sur les propriétés physiques du béton géopolymère durci, incluant la densité, l'absorption d'eau et la vitesse d'impulsion ultrasonique.
- Évaluer l'influence de chaque type et dosage de déchet sur les propriétés mécaniques du béton géopolymère à température ambiante, en déterminant la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

Introduction Générale

- Déterminer le comportement thermique des bétons géopolymères formulés avec des déchets, en analysant l'évolution de leur résistance à la compression et de leur perte de masse après exposition à des températures élevées (200°C, 400°C, 600°C, 800°C), ainsi que leur conductivité thermique.
- Analyser et discuter les corrélations entre les propriétés physiques, mécaniques et thermiques observées pour chaque type de déchet et leur dosage, afin de comprendre les mécanismes d'interaction au sein de la matrice géopolymère.
- Identifier les opportunités d'application potentielles de ces bétons géopolymères à base de déchets, en fonction de leur profil de performance spécifique (par exemple, bétons légers structurels, matériaux isolants, applications résistantes au feu), contribuant ainsi à la valorisation des déchets et au développement de matériaux de construction plus durables.

Plan du mémoire

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres principaux, suivis d'une conclusion générale. Le premier chapitre est consacré à une revue de la littérature, visant à établir un cadre théorique autour des bétons géopolymères et des bétons légers, de leurs propriétés, et de l'utilisation d'agrégats issus de déchets dans le secteur de la construction. Cette synthèse permet de situer l'étude dans son contexte scientifique et technique, tout en identifiant les enjeux et les pistes de recherche existantes. Le deuxième chapitre présente les matériaux utilisés, ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée. Il détaille les caractéristiques des constituants, les procédures de formulation des mélanges, et les protocoles d'essais mis en œuvre pour évaluer les performances des bétons élaborés. Le troisième chapitre expose et analyse les résultats obtenus, en mettant en relation les effets des différents types d'agrégats de déchets sur les propriétés physiques, mécaniques et à haute température des bétons géopolymères. Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux enseignements de l'étude, tout en ouvrant sur des perspectives de recherche future.

CHAPTER I

Béton géopolymère et béton léger

I.1. Introduction

Le béton constitue actuellement le matériau le plus largement employé à l'échelle mondiale, surpassant tous les autres matériaux en raison de sa polyvalence, de sa résistance et de sa durabilité. Néanmoins, en raison de l'accroissement de la demande pour des matériaux de construction écologiques et durables, de nouvelles alternatives au béton traditionnel ont émergé, parmi lesquelles figurent le béton géopolymère et le béton léger. Ces deux catégories de béton constituent des avancées notables dans le secteur de la construction, présentant des bénéfices considérables en matière de performance et d'impact environnemental. Ce chapitre examine les principes généraux relatifs à la composition, aux formulations et aux propriétés de mise en œuvre, ainsi qu'à la caractérisation du béton géopolymère et du béton léger.

I.2. Béton géopolymère

I.2.1. L'histoire

Le béton géopolymère est le produit d'une réaction entre des matériaux riches en aluminosilicates et une solution alcaline concentrée, ce qui engendre la formation d'un liant polymère inorganique. Malgré le fait que son histoire remonte aux années 1940 et qu'elle ait fait l'objet de recherches universitaires significatives, le béton géopolymère n'a pas encore intégré le courant dominant de l'industrie de la construction en béton. À ce jour, la majorité des applications se rapportent à l'industrie du préfabriqué, recourant à un processus de durcissement accéléré. Néanmoins, son emploi dans les applications de béton prêt à l'emploi connaît une croissance significative, en raison des données actuellement accessibles et des avantages notables en matière de durabilité offerts par un système de liant constitué presque exclusivement de matériaux recyclés. Une vaste variété de systèmes de liants géopolymères divers est accessible et fait l'objet d'études dans la littérature.

Lloyd et Rangan [4] ont réalisé une étude portant sur le béton géopolymère élaboré à partir de cendres volantes. Ils ont employé des cendres volantes à faible teneur en calcium (ASTM Classe F) en tant que matériau de référence. Les observations concernent l'impact de l'interaction entre l'eau et les solides géopolymères. Ils ont établi que le géopolymère présente d'excellentes caractéristiques et se révèle particulièrement approprié pour la fabrication de

produits en béton préfabriqué indispensables à la réhabilitation et à la modernisation des infrastructures suite à un sinistre.

Hardjito et Rangan [5] ont réalisé une étude sur le béton géopolymère élaboré à partir de cendres volantes. Le matériau employé était constitué de cendres volantes sèches à faible teneur en calcium (ASTM Classe F) issues d'une centrale électrique. La concentration en calcium des cendres volantes était d'environ 2 % en masse. Ils ont analysé les données relatives à la résistance à la compression et ont établi que le béton géopolymère élaboré à partir de cendres volantes présente une résistance à la compression satisfaisante, le rendant approprié pour des applications structurelles. Le béton géopolymère élaboré à partir de cendres volantes démontre également une remarquable résistance aux agressions sulfatiques. Les caractéristiques élastiques du béton durci, ainsi que le comportement et la résistance des éléments structurels renforcés, présentent des similitudes avec ceux du béton de ciment Portland. Le béton géopolymère frais a pu être manipulé aisément pendant une durée de 120 minutes sans présenter le moindre signe de prise. L'incorporation d'un adjuvant réducteur d'eau à fort pouvoir hydrophile a permis d'optimiser la maniabilité du béton. Ils ont établi que l'augmentation de la concentration de la solution d'hydroxyde de sodium, ainsi qu'une température de durcissement oscillant entre 30 °C et 90 °C, contribuent à l'amélioration de la résistance à la compression du béton géopolymère. Une concentration molaire accrue de la solution d'hydroxyde de sodium contribue également à renforcer la résistance à la compression du béton géopolymère.

I. 2. 2. Définition

Le béton géopolymère constitue un composite polymère inorganique présentant un potentiel significatif pour la réalisation de constructions écologiques et durables, en substituant le béton conventionnel actuellement en usage [6]. Contrairement à ce dernier, qui recourt à du ciment comme liant, le béton géopolymère exploite les propriétés de liaison en utilisant des matériaux sources riches en silice et en alumine. La propriété liant est obtenue par la réaction entre les solutions alcalines et le matériau source de pouzzolane [7]. La réaction entre le matériau source et la solution alcaline engendre la formation d'un gel désigné sous le terme d'aluminosilicate. Le gel ainsi constitué unit les granulats et autres matériaux au sein du béton, permettant ainsi la formation de béton géopolymère [8].

I. 2. 3. Composition

Le béton géopolymère peut être élaboré en recourant à [9]:

- **Cendres volantes**

Il s'agit d'un sous-produit résultant de la combustion du charbon au sein des centrales thermiques, caractérisé par sa richesse en silice et en alumine. Lorsqu'il est incorporé dans le béton, il contribuera à atténuer les impacts environnementaux négatifs en tant qu'alternative au ciment.

- **Laitier de haut fourneau (GGBFS)**

L'acronyme désignant le laitier de haut fourneau granulé provient de l'industrie du fer et de l'acier et se présente sous la forme d'une poudre fine. Sur le plan physique, le GGBFS peut être caractérisé comme étant vitreux et granulaire, contenant des silicates ainsi que de l'alumine.

- **Agrégats**

Des granulats fins et grossiers de nature conventionnelle, conformes à des dimensions standard, sont employés dans la composition du béton géopolymère.

- **Solutions alcalines**

Les hydroxydes et silicates de sodium ainsi que de potassium sont employés. Ces solutions alcalines, par leur réaction avec la silice et l'alumine issues de matériaux sources tels que les cendres volantes et le GGBFS, engendreront un matériau liant qui confère une résistance accrue au béton.



Figure I.1: Constituant du béton géopolymère [10].

I. 2. 4. Formulation et propriété de mise en œuvre

La production de béton géopolymère s'effectue en recourant aux méthodes traditionnelles de la technologie du béton. La cendre volatilisée Le béton géopolymère élaboré à partir de cendres volantes se compose de 75 % à 80 % en masse d'agrégats, lesquels sont unis par une pâte géopolymère résultant de la réaction entre le silicium et l'aluminium présents dans les cendres volantes, ainsi qu'un liquide alcalin constitué d'hydroxyde de sodium et de silicate de sodium, auquel s'ajoute un superplastifiant [11].

Une caractéristique notablement distincte dans le processus de formation du béton géopolymère réside dans le fait que l'eau est évacuée durant les phases de durcissement et de séchage subséquent, contrairement au béton à ciment Portland, où l'eau est absorbée en raison de l'hydratation du silicate de calcium et de l'oxyde de calcium. Cette distinction exerce une influence significative sur les propriétés mécaniques et chimiques du béton géopolymère obtenu, ainsi que sur sa résistance à la chaleur, à l'infiltration d'eau, à la réactivité alcali-granulat et à d'autres formes d'agressions chimiques, comme le soulignent Kunal Kupwade et al., Brett Tempest et al., ainsi que Bondar et al [12-14]. Le matériau de départ est combiné avec une solution activatrice qui procure l'alcalinité requise (l'hydroxyde de sodium ou l'hydroxyde de potassium étant fréquemment employés) pour permettre la libération du silicium et de

l'aluminium, et éventuellement avec une source additionnelle de silice (le silicate de sodium étant le plus couramment utilisé).

I. 2. 5. Caractérisation de béton géopolymère

I. 2. 5.1. Les caractéristiques à l'état frais

Les caractéristiques du mélange frais englobent la maniabilité, le temps de prise, le retrait ainsi que les modifications structurelles survenant au cours du processus de prise. Il convient de souligner que le processus de polymérisation des compositions géopolymères est exothermique, ce qui fait que la température dégagée par le béton géopolymère au cours de l'hydratation constitue également un paramètre significatif.

- La maniabilité

La maniabilité des bétons géopolymères est tributaire de la concentration de l'activateur en relation avec les principaux éléments constitutifs de la formulation géopolymère. Il est également possible d'augmenter ce paramètre en augmentant la proportion d'eau par rapport au liant ou en incorporant des superplastifiants ainsi que des retardateurs de prise. La maniabilité des bétons géopolymères a également connu une dégradation en raison de l'augmentation de la concentration de NaOH [15, 16].

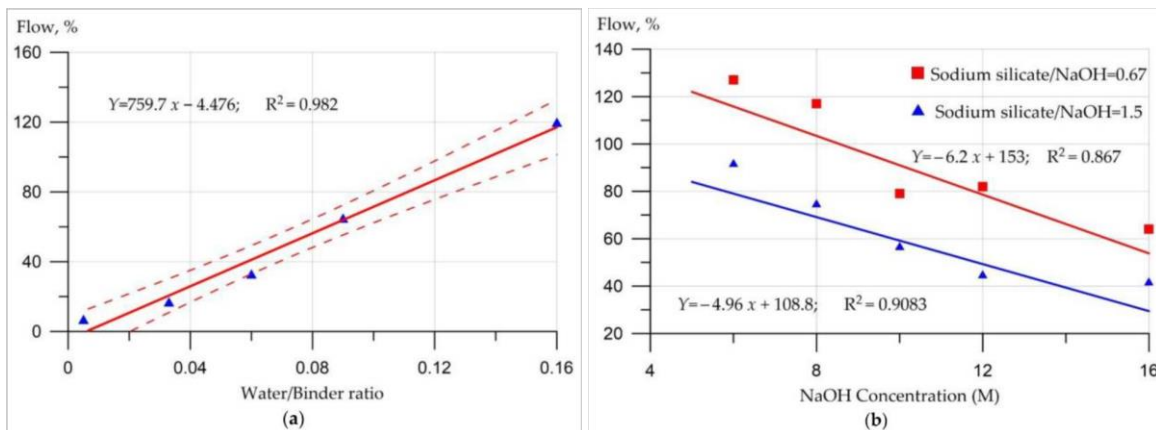


Figure I.2 : Les principaux facteurs affectant la maniabilité des bétons géopolymères, et le degré de leur influence selon [15]: (a) le rapport eau-liant ; (b) la concentration de NaOH.

- Le temps de durcissement

Le temps de durcissement des bétons géopolymères est influencé par la concentration de NaOH, le rapport entre silicates et hydroxydes, la composition du liant ainsi que la proportion de superplastifiants présents dans le mélange. L'accroissement de la concentration de NaOH diminue le temps de durcissement en favorisant l'accélération du processus de polymérisation des compositions géopolymères. Néanmoins, la brève durée de durcissement de la composition affecte de manière significative sa maniabilité [17, 18].

- Le retrait

Le retrait observé lors du durcissement du béton géopolymère influence de manière significative le processus de formation des fissures de retrait au sein de celui-ci. Les bétons géopolymères présentent une contraction plus importante que les bétons à base de Ciment Portland Ordinaire (CPO), en raison d'une quantité supérieure de méso pores par rapport à ceux-ci. Les bétons géopolymères présentent une contraction supérieure à celle des bétons à base de Ciment Portland Ordinaire (CPO), en raison de la contraction significativement plus élevée du liant activé par les alcalis par rapport à celle du CPO, ainsi que du nombre accru de méso pores en comparaison avec le CPO. Il est envisageable de diminuer le nombre de micropores et d'optimiser le retrait du béton géopolymère en choisissant judicieusement la quantité d'activateur, en ajustant la proportion de silicates par rapport aux hydroxydes et celle de l'activateur par rapport au liant, tout en maîtrisant les conditions de durcissement. Il convient également de souligner qu'une vaste diversité de matières premières et de types d'activateurs pour les bétons géopolymères est disponible, lesquels, sous diverses conditions de durcissement, manifestent des variations structurelles significatives au cours du processus de durcissement [19].

Le retrait de séchage de béton géopolymère est considérablement inférieur à celui du béton à base de ciment Portland, avec des valeurs typiques après 56 jours s'élevant à environ 300 micros trains ou moins. Le retrait de séchage sera, en règle générale, inférieur à celui observé pour un béton à base de ciment Portland, même en intégrant un adjuvant destiné à réduire le retrait (**Figure I.3**) [20].

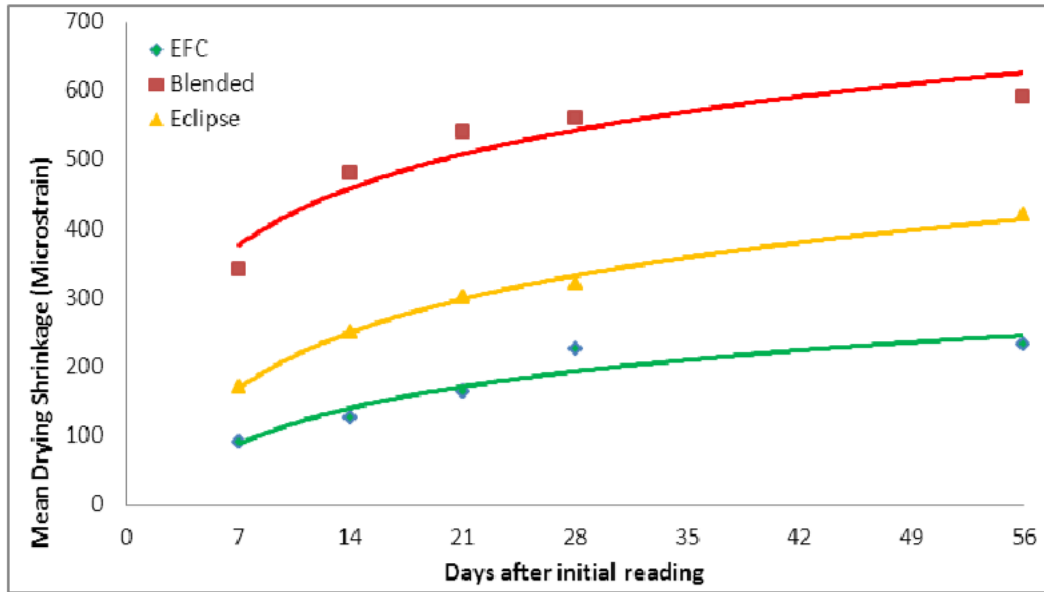


Figure I.3: Retrait de séchage du géopolymère, 30 % de cendres volantes et bétons à retrait réduit [20].

- polymérisation

Le processus de polymérisation des bétons géopolymères est exothermique et s'accompagne d'une libération substantielle de chaleur durant l'hydratation des éléments constitutifs du mélange. Le processus de polymérisation, qui s'opère lors de l'interaction des aluminosilicates avec des activateurs alcalins, se manifeste avec une intensité supérieure à celle du processus d'hydratation du CPO, entraînant ainsi une libération de chaleur plus significative par les compositions géopolymères durant la phase de durcissement. La chaleur émise par les bétons géopolymères au cours du processus de durcissement est largement influencée par la nature de l'activateur employé ainsi que par le type de matière première utilisée. Il a été démontré que les activateurs hydroxydes augmentent de manière significative la température dégagée au cours du processus de durcissement de la composition géopolymère [21]. La nature des aluminosilicates influence également la température générée au cours de la réaction de polymérisation des compositions géopolymères. Il a donc été établi que le béton géopolymère élaboré à partir d'un liant de métakaolin libère de manière active de la chaleur en corrélation directe avec l'augmentation de la résistance, tandis que le béton géopolymère fondé sur les cendres volantes commence à émettre de la chaleur uniquement après un délai de 25 heures suivant le début de la réaction, ce phénomène étant attribué aux divergences dans les mécanismes de polymérisation de ces compositions [22].

I. 2. 5.2. Les propriétés à l'état durci

- La résistance à la compression

La résistance à la compression de GeoPC, conformément à la norme ASTM C39, est influencée par divers facteurs tels que la durée de mélange humide, le temps de durcissement, la température de durcissement, la taille des particules [23], ainsi que l'incorporation d'additifs courants tels que Ca(OH)_2 , Al(OH)_3 , SF [24], nano- SiO_2 [25], vinyle [26] et des superplastifiants à base de copolymère et de copolymère polyacrylate [27]. Les GeoPCs constitués de FA présentent une diminution continue de leur résistance à la compression initiale lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées atteignant $400\text{ }^\circ\text{C}$, et ce, indépendamment de leurs molarités ainsi que des dimensions des granulats grossiers [28-30]. La résistance à la compression du GeoPC connaît également une diminution significative lorsque la quantité d'eau additionnelle excède 12 % de la masse de FA [31]. Parallèlement, la calcination entraîne une modification subtile de la composition minéralogique de ce béton, entraînant une diminution de sa résistance à la compression d'environ 30 % [32].

Étant donné que le liant géopolymère est intégralement constitué de cendres volantes et de GGBS, une opinion répandue a émergé selon laquelle le béton géopolymère développerait sa résistance de manière très progressive ou exigerait un durcissement thermique. Néanmoins, ce béton géopolymère spécifique acquiert sa résistance de manière relativement rapide, la résistance de conception étant habituellement atteinte après une période de 7 jours dans des conditions de laboratoire. Le développement de la résistance à un âge précoce (jusqu'à 3 jours) est influencé par la température ambiante, néanmoins, une résistance précoce satisfaisante serait anticipée si la température du béton excède approximativement 20°C (**Figure I.4**) [20].

Un grand nombre de chercheurs ont également étudié les propriétés mécaniques du GeoPC incorporant 50 % et 100 % de RCA, et ont conclu que la résistance à la compression de ce type de béton s'accroît d'environ 10 % entre 7 et 28 jours [33-36]. Cette résistance à la compression atteint son maximum lorsque l'on utilise un mélange de verre liquide et de NaOH en tant qu'activateur, toutefois, elle diminue lorsque la proportion de solution alcaline s'accroît de 35 % à 45 % du liant total [37]. Le gel de silicate d'alumine de sodium (N-A-S-H) utilisé avec 100 % de cendres volantes (FA) peut également contribuer à l'amélioration de la résistance à la compression du GeoPC [38].

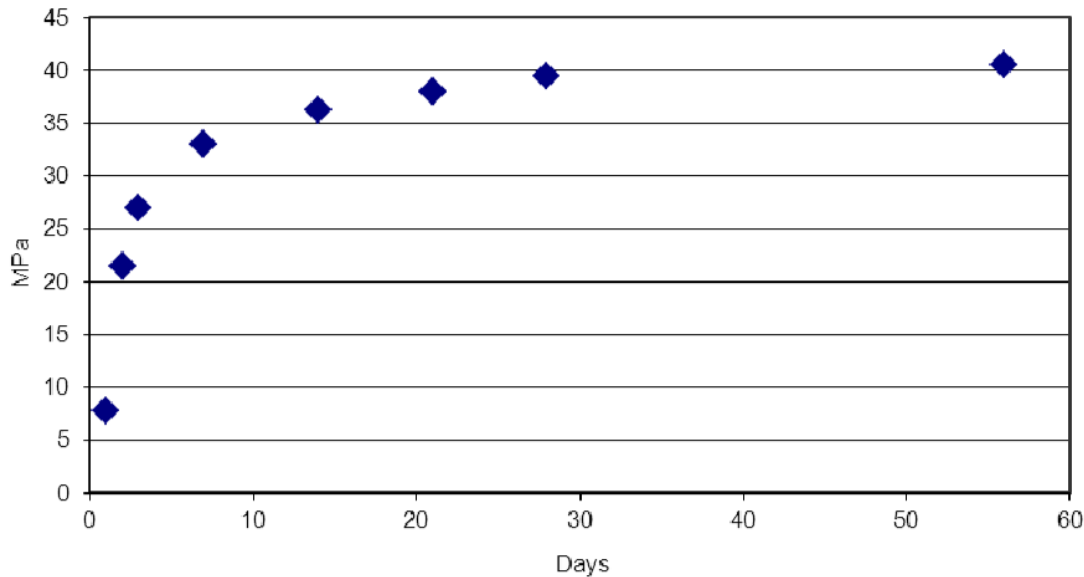


Figure I.4: Développement de la résistance à la compression du béton géopolymère [20].

- Le module d'élasticité

Le module d'élasticité des bétons géopolymères présentant une résistance équivalente est inférieur à celui des bétons élaborés à partir de Ciment Portland Ordinaire (CPO). Il est supposé que cela est en relation avec les processus intervenant lors de la polymérisation des bétons géopolymères, ainsi qu'avec leur base aluminosilicatée [5]. Le module d'élasticité des bétons géopolymères est considérablement affecté par la nature des granulats grossiers, le type de liant utilisé, ainsi que par la température et la durée de durcissement [39]. Par ailleurs, le module d'élasticité est fortement influencé par la concentration en hydroxyde de sodium au sein du béton géopolymère, une élévation de cette concentration entraînant également une augmentation de la valeur du module d'élasticité [40].

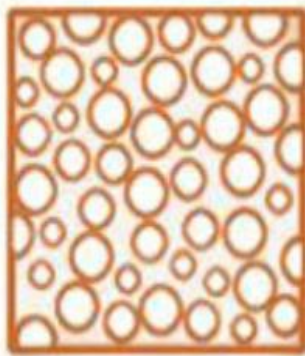
I.3. Béton léger

I.3.1. Définition

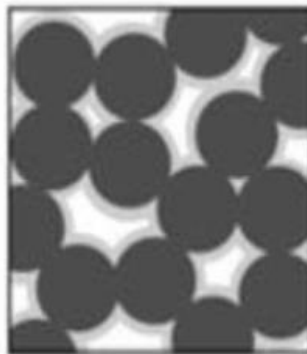
Il s'avère être particulièrement efficace pour l'ensemble des travaux de rénovation. Il présente une résistance aux chocs et s'acquitte de manière efficace de sa fonction d'isolant thermique. La masse d'un béton de densité normale se situe entre 2200 et 2600 kg/m³, tandis que celle du béton léger fluctue entre 300 et 1850 kg/m³ [41]. Le béton léger est particulièrement utilisé pour la construction de murs porteurs ainsi que pour la réalisation de dalles.

Pour développer un béton léger, il est impératif de prendre en compte les spécificités relatives à la formulation des bétons légers, ainsi que la provenance des constituants particuliers nécessaires à la fabrication de ces bétons, incluant les matériaux légers d'origine naturelle, artificielle et recyclée.

Lorsqu'il y a incorporation directe de l'air dans la matrice, on désigne cela sous le terme de béton cellulaire. En revanche, on évoque le terme de béton caverneux lorsque l'air se trouve intercalé entre les granulats de grande taille. Enfin, il est question de béton à granulats légers lorsque ceux-ci présentent une porosité élevée (**Figure I.5**) [42].



(a) Béton cellulaire



(b) Béton caverneux



(c) Béton de granulats légers

Figure I.5: Représentation schématique le bétons de granulats légers [42].

I. 3. 2. Composition

Le béton léger constitue une catégorie de béton qui emploie des granulats légers dans le but de diminuer sa densité. Le béton léger est composé de :

I. 3. 2.1. Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques constituent des poudres minérales possédant la capacité de réagir au contact de l'eau, entraînant ainsi la formation d'hydrates. Il y a déjà deux millénaires, les Romains avaient mis au jour le ciment en constatant que la chaux, issue de la décarbonatation des calcaires, lorsqu'elle était combinée avec de l'eau et des pouzzolanes (terres volcaniques composées de silice et d'alumine), produisait un mortier capable de durcir. Le ciment Portland continue d'être le liant hydraulique le plus couramment employé à l'échelle mondiale. Il est constitué de chaux (CaO), de fer (Fe_2O_3), de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) et de magnésie (MgO).

I. 3. 2.2. Les granulats légers

La production d'un béton léger repose principalement sur l'emploi de granulats légers. Étant donné l'importance de ces éléments, il est donc approprié de présenter les principales caractéristiques ainsi que les différents types de granulats employés dans la fabrication de bétons à granulats légers.

Ces granulats présentent des dimensions, des formes et des natures variées. Étant donné que les granulats constituent environ 70 % du volume total d'un béton, leur impact est considérable. En effet, le granulat constitue la structure fondamentale du béton. Les granulats employés doivent être constitués de particules exemptes d'impuretés, solides, robustes et pérennes. De surcroît, elles doivent être dépourvues de tout produit chimique nocif. La surface des particules doit être dépourvue d'argile ou de tout autre matériau fin susceptible de compromettre l'hydratation et l'adhérence de la pâte de ciment. Les granulats exercent une influence significative sur le dosage, le coût ainsi que sur les caractéristiques du béton tant à l'état frais qu'à l'état durci. La granulométrie, la morphologie, la texture, la densité, l'absorption, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la réactivité, les propriétés thermiques ainsi que la résistance au gel constituent des caractéristiques d'un granulat qui exercent une influence directe sur la formulation du béton [43].

I. 3. 2.3. Les Adjuvants

Dans le domaine du béton, les adjuvants se sont imposés comme des éléments essentiels pour obtenir les caractéristiques souhaitées. Ces adjuvants chimiques (comme les agents entraîneurs d'air, les agents moussants, les fibres, et les Super Plastifiants) sont notamment employés pour retarder ou accélérer le durcissement du ciment, ainsi que pour diminuer la quantité d'eau dans la pâte. Dans le but de favoriser la circulation ou de ventiler l'air. Leurs diverses applications découlent de leurs effets chimiques ou physiques sur les granulats de ciment ainsi que sur la pâte de ciment. En dépit de cette diversité, deux catégories d'adjuvants sont fréquemment employées dans la formulation de bétons légers. Il est question des plastifiants en raison de leur capacité à fluidifier le béton présentant un faible rapport eau/ciment, ainsi que des agents entraîneurs d'air destinés à atténuer les effets des cycles de gel et de dégel.

I. 3. 3. Formulation et propriété de mise en œuvre

En ce qui concerne la formulation des bétons légers, il est possible d'appliquer les méthodes traditionnelles. Uniquement les granulats naturels sont substitués par des granulats légers. Les composants demeurent identiques à ceux d'un béton traditionnel. Il est donc impératif de prendre en compte l'absorption d'eau de ces granulats afin d'ajuster de manière optimale la proportion d'eau à incorporer lors de la préparation des bétons. Dans le béton, les déplacements d'eau revêtent une importance significative. En raison de leurs structures poreuses, les granulats légers ont la capacité d'absorber l'eau libre, ce qui influence la maniabilité des bétons. Il est donc nécessaire de les pré-mouiller de manière adéquate avant le malaxage des différents constituants [44]. Selon Arnould et al. [45], L'emploi de granulats secs dans la préparation des bétons engendre une absorption significative de l'eau de gâchage, ce qui entraîne des difficultés lors de la mise en œuvre des bétons. Les granulats représentent la proportion la plus significative de la masse volumique du béton, oscillant entre 50 et 60 %. Les proportions de ciment et d'eau sont établies en fonction de la résistance en compression recherchée ainsi que de l'affaissement souhaité lors de l'analyse de formulation des bétons.

Les propriétés des bétons seront davantage orientées vers les éléments suivants :

- **la faible masse volumique**

La masse volumique des bétons est tributaire de la quantité d'eau initialement présente dans le béton, laquelle s'évapore au cours de son processus de fabrication [45]. Elle est tributaire de la masse volumique des granulats employés ainsi que de la composition des bétons.

- **Les performances du béton**

Les performances du béton peuvent être influencées par la qualité des granulats ainsi que par la présence d'impuretés. Ces impuretés influencent l'hydratation du ciment en la perturbant, ce qui engendre des problèmes d'adhérence entre la matrice et le granulat, affectant ainsi les propriétés du béton. La nécessité en eau de gâchage est tributaire de la configuration et de la porosité des granulats. La diminution de l'eau de gâchage contribue à obtenir une maniabilité réduite, ce qui permet d'améliorer les résistances mécaniques des bétons. Par ailleurs, l'hydratation des granulats légers avant le malaxage des différents constituants exerce une influence significative sur l'ouvrabilité des bétons [46]. La méthode d'hydratation des granulats exerce une influence considérable sur les caractéristiques des bétons tant à l'état frais qu'à l'état durci.

I.4. Caractérisation des bétons léger

I.4.1. Caractéristiques physiques

I.4.1.1. Mise en œuvre

Sa mise en œuvre est à la fois simple et rapide, permettant un accès sur le chantier entre 24 et 48 heures après le coulage, en fonction de l'épaisseur. Il se caractérise par une grande facilité de manipulation, ce qui permet son pompage sur de longues distances et à des hauteurs considérables. Il est également aisé à mettre en œuvre, même pour des épaisseurs considérables. Les coffrages employés sont d'une légèreté accrue. Les éléments en béton léger se caractérisent par une facilité de manipulation et de déplacement, en raison de leur légèreté relative.

I.4.1.2. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente constitue la caractéristique fondamentale du béton léger. En effet, celle-ci influence pratiquement l'ensemble des propriétés, qu'il s'agisse des propriétés

mécaniques, des propriétés thermiques ou de certaines variations dimensionnelles. Cette masse dépend de la structure (béton caverneux variant de 400 à 900 kg/m³, semi-caverneux de 1000 à 1200 kg/m³, ainsi que des matériaux isolants et porteurs de 1000 à 1400 kg/m³), de la masse volumique des granulats, du dosage en ciment, ainsi que de la quantité d'eau potentiellement absorbée par les granulats [47].

I.4.1.3. L'absorption

L'absorption constitue un phénomène physique par lequel un liquide se déplace de l'extérieur d'un milieu poreux vers son intérieur, en raison de la capillarité ascendante. L'absorption entraîne une élévation de la masse du matériau.

I.4.1.4. La porosité

Les granulats légers se distinguent par une porosité particulièrement élevée, oscillant entre 25 et 75 % du volume apparent. Le béton élaboré à partir de ces granulats se compose de diverses catégories de vides. En règle générale, ces vides se distribuent de manière aléatoire sous diverses formes et présentent des dimensions variées, contribuant ainsi à l'hétérogénéité de la matière. Leurs tailles peuvent varier de quelques angströms à plusieurs millimètres, en fonction de l'origine de ces pores. Un matériau est considéré comme poreux lorsque les espaces vides sont distribués de manière homogène dans le volume, avec un diamètre supérieur à 10 angströms. De plus, la pâte de ciment, le mortier ainsi que le béton constituent des matériaux présentant des caractéristiques de porosité. Ils possèdent des pores de capillarité dont le diamètre varie de 100 à 1000 de diamètre. La porosité d'un matériau peut être définie par divers facteurs [48].

Les granulats présentent une porosité intrinsèque désignée par $\emptyset g$, résultant de la présence d'air au sein des particules. Étant donné la taille caractéristique des capillaires, qui se situe autour de quelques micromètres, la porosité des granulats sera désignée comme étant de la porosité microscopique [49].

Lors de l'hydratation et du séchage du matériau, des vides d'air se forment au sein de la matrice du liant. Il est question de l'air intra-liant, qui permet de déterminer la porosité intrinsèque du liant, notée $\emptyset l$. La dimension caractéristique des pores situés entre les hydrates de Ca(OH)₂ ou de C-S-H oscille entre 0,01 µm et 5 µm, tandis que la taille des pores engendrés par un

entraîneur d'air se situe entre 5 μm et 1 mm [50], L'air intra-liant est qualifié d'air microscopique. Ces espaces peuvent être déterminés à l'aide de l'équation (I.1).

$$\Phi_l = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{liant}}} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

V_{vides} : Volume des vides contentes dans la matrice de liant (m^3).

V_{liant} : Volume total occupé par la pâte de liant (m^3).

De plus, des vides supplémentaires sont créés suite à l'arrangement des différents constituants entre eux dans le béton, c'est de la porosité mésoscopique.

$$\Phi_{\text{meso}} = \frac{V_{\text{vides}}}{V_t} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

V_{vides} : le volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra particule ;

V_t : le volume total occupé par le matériau.

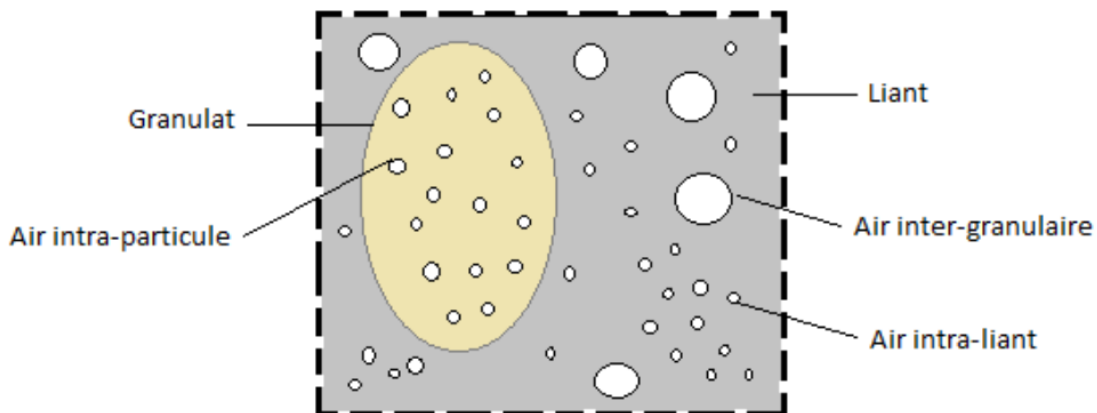


Figure I.6: Porosité du béton.

I.4.1.5. Retrait

Les bétons légers se caractérisent généralement par un retrait plus significatif que celui des bétons traditionnels, et ce, de manière plus tardive. En effet, l'eau absorbée par les granulats légers est progressivement restituée par la matrice, ce qui retarde la déshydratation du mortier, considérée comme la principale cause du retrait. Le retrait est estimé en valeur finale en fonction du dosage en ciment, en eau, ainsi que de la nature des granulats légers employés [51].

I. 4. 2. Caractéristiques mécaniques

I. 4. 2.1. Résistance à la compression

En utilisant des granulats légers et une formulation de béton adéquate, il est envisageable d'atteindre des résistances à la compression similaires à celles obtenues avec du béton conventionnel.

L'évolution des connaissances et des technologies relatives au béton a, au fil des années, permis d'améliorer les caractéristiques des bétons, y compris celles des bétons légers. Par exemple, l'emploi d'additifs minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et les laitiers, ainsi que l'utilisation d'adjuvants tels que les agents entraîneurs d'air (AEA), les superplastifiants (SP), les agents réducteurs d'eau (WR) et les accélérateurs de prise, a permis notamment de réduire le rapport E/L tout en préservant une bonne maniabilité. Des résistances à la compression de 100 MPa .

La résistance à la compression des bétons légers s'accroît en fonction de la qualité de la matrice, de la densité des granulats légers employés et de la masse volumique du béton. Il convient toutefois de souligner une diminution de la résistance observée entre 7 et 28 jours. Dans un premier temps, il est observé que la dispersion des résultats tend à diminuer en fonction du degré d'hydratation de la pâte de ciment. Par ailleurs, il apparaît que la résistance à 28 jours du béton en fonction de la masse volumique semble adopter une tendance bilinéaire [50].

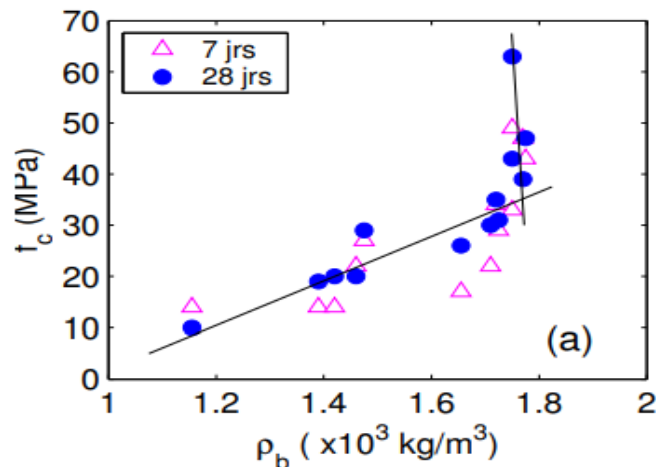


Figure I.7: la résistance en compression en fonction de la masse volumique du béton léger à 7 et 28 jours [50].

I. 4. 2.2. Résistance à la traction

Comme le béton ordinaire, le béton léger présente une résistance à la traction relativement faible. Cette affirmation est particulièrement pertinente en ce qui concerne le béton léger, étant donné que la propagation des fissures peut se manifester à travers les granulats. Des valeurs de résistance à la traction par fendage comprises entre 3,3 et 4,2 MPa ont été observées pour des bétons présentant une masse volumique de 1940 kg/m³, tandis que des résistances allant de 3,5 à 5,6 MPa ont été enregistrées pour des bétons dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m³ [52].

I. 4. 2.2. Module élastique

Pour un rapport E/L équivalent, il convient de noter que le module élastique d'un béton léger est inférieur à celui d'un béton conventionnel. La cause principale se trouve dans le module élastique des granulats légers, qui varie de 10 à 20 GPa, et qui est considérablement inférieur à celui des granulats de masse volumique standard, tels que le granite, dont le module se situe entre 10 et 70 GPa, et le calcaire, dont la valeur oscille entre 10 et 55 GPa.

Le module élastique des bétons légers s'accroît en fonction de la densité des granulats légers employés ainsi que de la masse volumique du béton. La corrélation entre le module élastique et la masse volumique peut être qualifiée de linéaire, bien qu'une certaine dispersion des résultats soit observée aux âges de 7 et 28 jours [50].

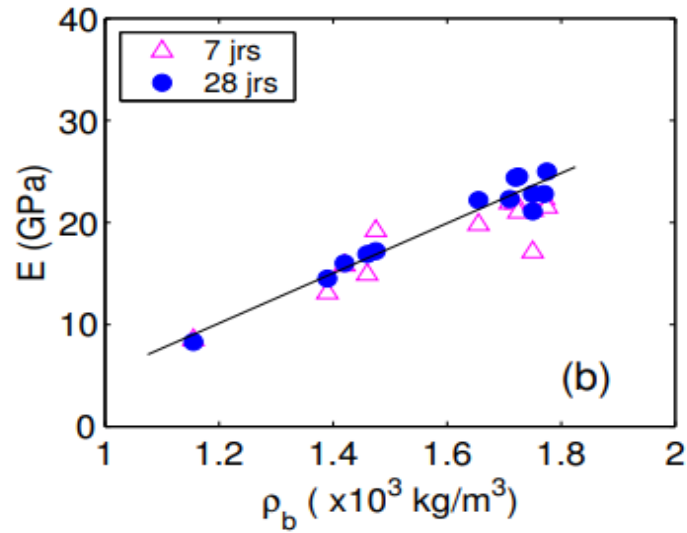


Figure I.8: Le modules élastiques de bétons légers à 7 et 28 jours [50].

I.5. Conclusion

Bien que ces deux catégories de béton présentent des avantages notables en termes de durabilité et de performance, la sélection de l'un ou l'autre sera déterminée par les particularités du projet de construction. Le béton géopolymère sera favorisé dans des applications requérant une résistance supérieure et une empreinte carbone réduite, tandis que le béton léger sera davantage approprié pour des projets où la diminution du poids et les exigences en matière d'isolation thermique constituent des priorités. Chaque matériau offre donc des solutions appropriées à des enjeux techniques et environnementaux spécifiques, participant ainsi à la définition de l'avenir de La construction durable.

CHAPTER II

Matériaux et procédures

Expérimentales

II.1. Introduction

Ce chapitre offre une vue d'ensemble détaillée des matériaux employés et des différentes étapes expérimentales mises en place dans le cadre de cette étude. L'objectif ici est de décrire avec précision les caractéristiques des éléments qui entrent dans la formulation des bétons géopolymères, en mettant l'accent sur les liants comme le laitier de haut fourneau et la fumée de silice, les activateurs alcalins tels que l'hydroxyde de sodium et le silicate de sodium, ainsi que les agrégats naturels comme le sable de dunes, sans oublier les ajouts alternatifs comme les déchets plastiques, le liège et la perlite.

De plus, les méthodes expérimentales utilisées pour l'élaboration des mélanges, la préparation des éprouvettes et la réalisation des différents essais à l'état frais et durci sont également présentées. L'ensemble de ces démarches permettre une évaluation fiable des performances mécaniques, thermiques et physiques des bétons géopolymères développés.

II.2. Matériaux

II.2.1. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est reconnu comme un coproduit de l'industrie métallurgique. Il est généré pendant le processus de fabrication de la fonte et renferme les composants non ferreux de la matière première. Sa composition chimique est principalement dominée par des silicates de calcium et des oxydes d'aluminium, et de la magnésie. Cette richesse en silice et en alumine en fait un excellent précurseur pour la synthèse de géopolymères, ces éléments étant essentiels à la réaction de géopolymérisation en présence d'un activateur alcalin. Dans ce travail ont été utilisés Le laitier issu de l'usine d'El Hadjar à Annaba, concassé dans l'usine Lafarge à Hammam Dalaa (M'sila).



Figure II.1: Laitier de haut fourneau (Lafarge à Hammam Dalaa - M'sila).

II.2.2. fumée de silice

La fumée de silice utilisée est composée à 93–98 % de particules sphériques amorphes de SiO_2 , dont la taille est de l'ordre de quelques dixièmes de micron. Cette finesse lui confère une surface spécifique élevée, avoisinant les 220 000 cm^2/g (mesurée selon la méthode Blaine). Dans les bétons géopolymères, elle joue un rôle crucial en améliorant la compacité de la matrice, grâce au comblement des interstices entre les particules de laitier. Par ailleurs, en tant que source supplémentaire de silice réactive, elle participe activement à la réaction de géopolymérisation. Son incorporation permet ainsi d'optimiser la microstructure du matériau, renforçant ses propriétés mécaniques et sa durabilité.



Figure II.2: La fumée de silice utilisée.

II.2.3. Activateurs

II.2.3.1 Soude caustique NaOH

La soude caustique utilisée dans cette étude est de l'hydroxyde de sodium (NaOH) sous forme de perles, avec une masse molaire de 40 g/mol . Elle est fournie par l'entreprise Silicates Alcalines, également spécialisée dans les silicates de sodium (Na_2SiO_3) et de potassium (K_2SiO_3). Les spécifications détaillées de sa composition sont présentées dans le tableau 1.

Tableau II.1: Caractéristiques de la soude caustique utilisée.

Propriété	Valeur	Unité / Remarques
Forme	Perles	-
Pureté (NaOH)	$\geq 98 \%$	-
Masse molaire	40	g/mol
Couleur	Blanche	-
Densité	$\sim 2,13$	g/cm ³ (à 20 °C)
Température de fusion	318	°C
Solubilité dans l'eau	Très élevée	Exothermique à température ambiante

La préparation en laboratoire de 1000 mL d'une solution de NaOH à 10 M a nécessité une procédure rigoureuse. Dans un premier temps, 404,04 g de soude caustique (NaOH) sous forme de perles ont été précisément pesés, cette masse correspondant à la concentration visée (10 mol/L) et calculée à partir de la masse molaire du NaOH (40 g/mol). En raison de la forte exothermicité de la réaction, le NaOH a été introduit lentement dans un volume déterminé d'eau déionisée, avec la plus grande prudence.

Le mélange a été agité doucement à l'aide d'un agitateur magnétique jusqu'à dissolution complète, en travaillant sous hotte ventilée afin de limiter l'exposition à la chaleur dégagée et aux vapeurs irritantes. Une fois homogénéisée, la solution de NaOH 10 M a été transférée dans un récipient adapté, puis laissée en repos pendant 3 heures avant son utilisation.



Figure II.3 : Préparation de la solution.

II.2.3.2 silicates de sodium Na_2SiO_3

Le silicate de sodium (Na_2SiO_3), également connu sous le nom de verre soluble, a été introduit sous forme solide (grains) en tant que composant clé de l'activateur alcalin dans le procédé de géopolymérisation. Lors de son contact avec l'eau de gâchage et, le cas échéant, avec la solution d'hydroxyde de sodium, le silicate se dissout progressivement, libérant des ions hydroxydes (OH^-) et des monomères de silicate (SiO_2 solubilisé). Ces espèces dissoutes jouent un rôle essentiel dans l'initiation et le maintien de la dissolution des précurseurs riches en silice et en alumine, tels que le laitier de haut fourneau et la fumée de silice.

Le silicate de sodium soluble intervient de manière cruciale dans les réactions de polymérisation et de condensation des aluminosilicates, conduisant à la formation du réseau géopolymérique. Son utilisation sous forme granulaire permet un contrôle précis de la concentration en silicates et de l'alcalinité du milieu réactionnel, influençant ainsi la cinétique de prise ainsi que les propriétés mécaniques et durables du géopolymère durci. Les caractéristiques physico-chimiques du silicate de sodium utilisé sont présentées dans le **tableau II.2**.

Tableau II.2: Caractéristiques physico-chimiques du silicate de sodium utilisé.

Propriété	Valeur	Unité / Remarques
Forme	Grains (solide)	-
Aspect	Blanc ou translucide	-
Masse molaire	~122	g/mol (Na_2SiO_3)
Rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2,0 – 3,3	Variable selon le fournisseur
Teneur en SiO_2	~60 – 65 %	% en masse
Teneur en Na_2O	~30 – 35 %	% en masse
Solubilité dans l'eau	Très bonne	Libération de silicates et OH^-
pH en solution	> 12	Fortement basique



Figure II.4: Silicates d'alcaline Na_2SiO_3 .

II.2.4. Sable

Le sable utilisé dans cette étude expérimentale est un sable de dunes de classe granulométrique 0/5 mm, prélevé dans la région d'Oued Souf. La distribution granulométrique de ce sable a été déterminée par tamisage conformément à la norme NFP 18-560, et est présentée à la (**figure II.5**). Le tableau ci-dessous (**Tableau II.3**) récapitule les principales propriétés physiques du sable employé.

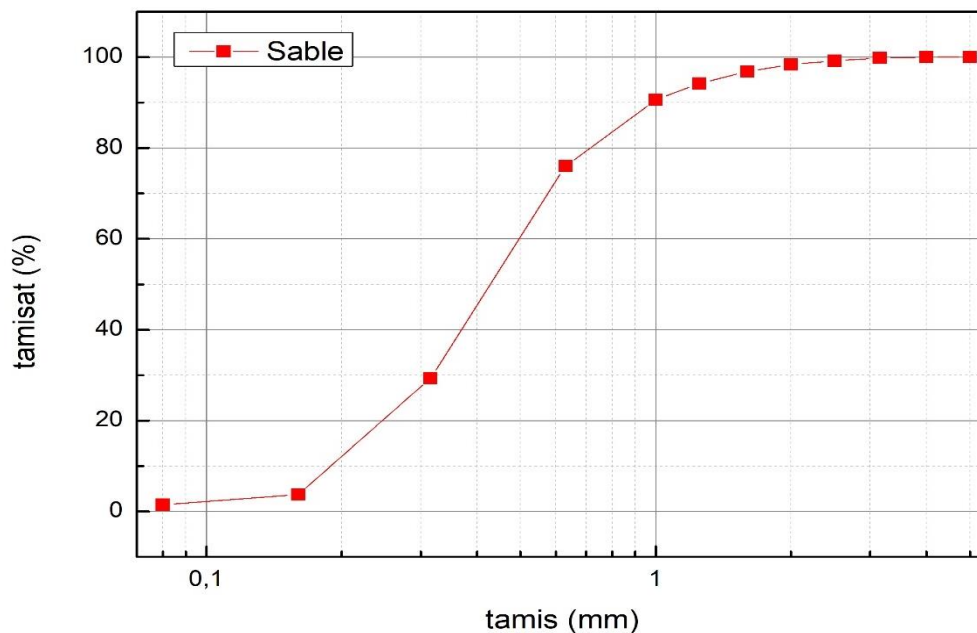


Figure II.5: Courbes granulométriques du sable.

Tableau II.3: Propriétés physiques du sable utilisé.

Teneur en eau	Apparence kg/m ³	Masse volumique kg/m ³	Compacité	Bleu de méthylène	Equivalent de sable	Module de finesse
2,04	1,62	2,6	0,62	0,25	92,63	2,012



Figure II.6: Le sable utilisé.

II.2.5. Déchet de plastique

Leur utilisation permet non seulement de recycler ces déchets non biodégradables, mais également de modifier certaines propriétés du béton, telles que la masse volumique, la maniabilité, l'isolation thermique et la capacité d'absorption d'eau. En raison de leur nature hydrophobe et de leur faible densité, les plastiques présentent un intérêt particulier dans ces applications. **(La figure II.8)** ci-après illustre la distribution granulométrique de ce matériau.



Figure II.7: déchet de plastique utilisée.

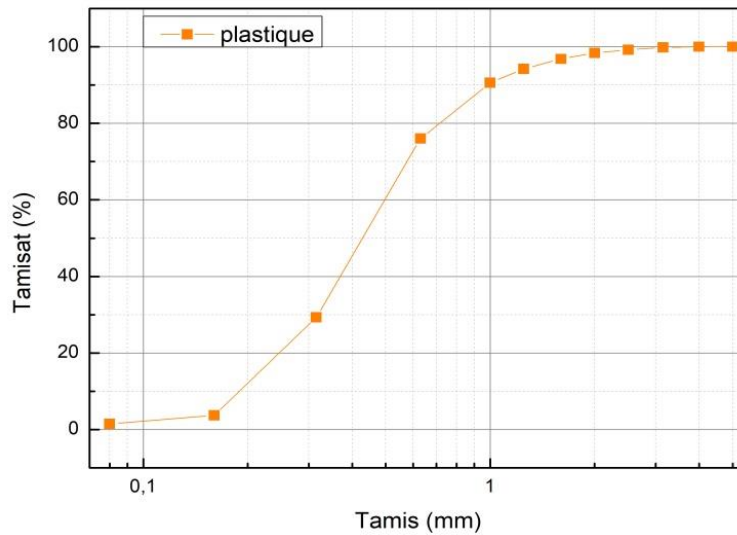


Figure II.8: Courbes granulométriques du déchet de plastique.

II.2.6. Déchet de liège

Le liège, matériau naturel, léger et renouvelable, est reconnu pour ses excellentes propriétés d'isolation thermique et phonique, ainsi que pour sa faible densité et sa résistance à l'humidité. Dans le cadre de ce travail de fin d'études, une approche innovante a été explorée : l'intégration de granulés de liège dans le béton géopolymère. Cette démarche vise à améliorer les performances thermiques et la durabilité du matériau tout en réduisant sa masse volumique, ouvrant ainsi la voie à des applications dans les constructions éco-efficaces et allégées. La figure 8 représente le liège utilisé récupéré auprès d'une usine de transformation localisée à Béjaïa et (**la figure II.10**) montre leur distribution granulométrique.



Figure II.9: déchet de liège utilisé.

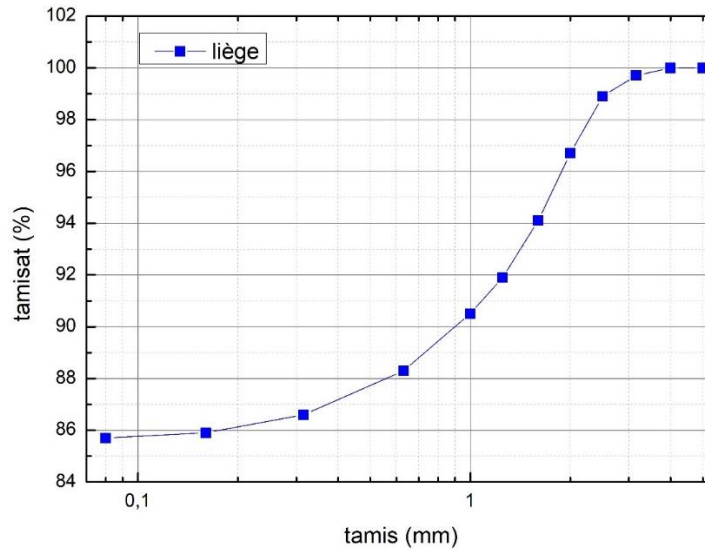


Figure II.10: Courbes granulométriques du déchet de liège.

II.2.7. Perlite

La perlite est une roche volcanique expansée, légère et poreuse, largement utilisée dans les domaines de l'isolation thermique et de la construction. Grâce à sa faible densité, sa stabilité chimique et sa capacité d'isolation, elle constitue un matériau d'intérêt pour les bétons à faible poids et à haute performance thermique. Dans le cadre de notre travail de fin d'études, l'intégration de la perlite dans le béton géopolymère a été étudiée comme solution innovante visant à améliorer les propriétés d'isolation et à alléger la structure, tout en valorisant un matériau naturel et abondant.

Tableau II.4: Caractéristiques physico-chimiques de la perlite expansée

Propriété	Valeur typique	Unité / Remarques
Origine	Roche volcanique amorphe	-
Densité apparente	90 – 150	kg/m ³ (expansée)
Masse volumique réelle	~2 200 – 2 300	kg/m ³
Porosité	Très élevée	> 70 %
Conductivité thermique	0,04 – 0,06	W/m·K (bonne isolation thermique)
pH	6,5 – 7,5	Légèrement neutre à basique
Stabilité thermique	Jusqu'à 900	°C (bonne tenue au feu)
Composition chimique principale	SiO ₂ (~70–75 %), Al ₂ O ₃ (~12–15 %)	Contient aussi Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, Na ₂ O, CaO, MgO
Inertie chimique	Élevée	Compatible avec milieux alcalins
Aspect	Granulés blancs à gris clair	Légers, poreux



Figure II.11: La perlite utilisée.

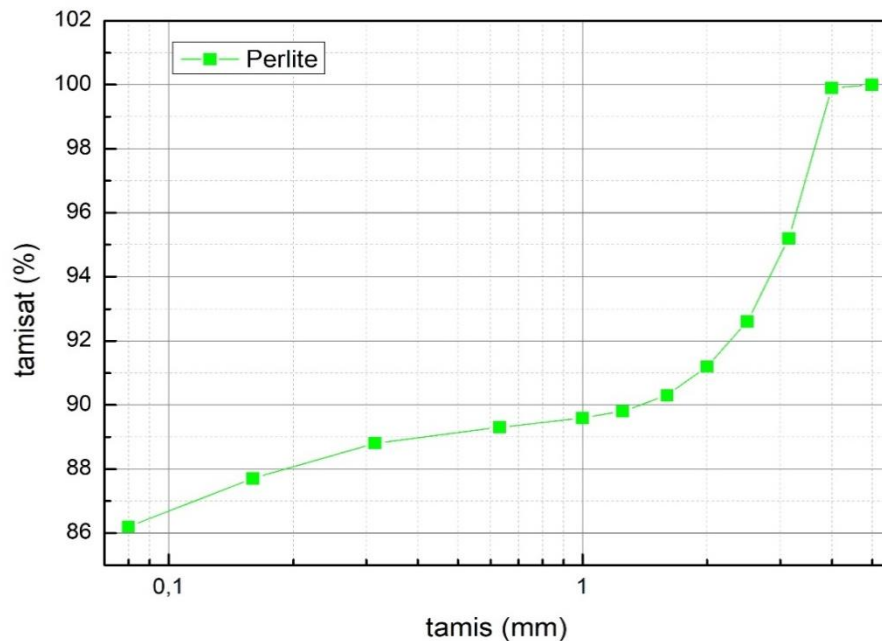


Figure II.12: Courbes granulométriques de la perlite.

II.3 Préparation des mélanges

Les différentes compositions des mélanges de béton géopolymère élaborés dans le cadre de cette étude sont présentées dans le tableau ci-dessous (**tableau II.5**). Elles ont été définies en fonction des proportions relatives des constituants principaux (liant, activateur, sable, ajouts tels que plastiques, liège ou perlite), dans le but d'évaluer l'influence de ces paramètres sur les propriétés du matériau à l'état frais et durci.

Tableau II.4: Compositions des mélanges confectionnés.

Mélanges	Laitier (Kg)	FS (Kg)	Sable (Kg)	Plastique (Kg)	Perlite (Kg)	Liège (Kg)
M0	663	191	1130	0	-	-
M1	663	191	1017	113	-	-
M2	663	191	960,5	169,5	-	-
M3	663	191	904	226	-	-
M4	663	191	847,4	282,6	-	-
M5	663	191	1017	-	113	-
M6	663	191	960,5	-	169,5	-
M7	663	191	904	-	226	-
M8	663	191	847,4	-	282,6	-
M9	663	191	1017	-	-	113
M10	663	191	960,5	-	-	169,5
M11	663	191	904	-	-	226
M12	663	191	847,4	-	-	282,6

Sous température ambiante contrôlée en laboratoire, la préparation des mélanges de béton géopolymère a débuté par l'introduction des constituants pulvérulents, à savoir : le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et les silicates alcalins sous forme granulaire. Ces matériaux ont été préalablement homogénéisés dans un mélangeur à vitesse lente pendant deux minutes, afin d'assurer une répartition uniforme des composants solides.



Figure II.13: Préparation des mélanges.

Chapitre II : Matériaux et procédures Expérimentales

Par la suite, l'agrégat fin (sable) a été ajouté au mélange, suivi d'un malaxage à vitesse lente pendant deux minutes supplémentaires afin d'assurer une dispersion homogène. Les déchets plastiques, le liège ou la perlite (préalablement préparés selon le cas) ont ensuite été incorporés au mélange. Le malaxage a été poursuivi à vitesse lente durant deux minutes supplémentaires afin de garantir une intégration uniforme de ces matériaux dans la matrice.

La solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), préalablement préparée, a été incorporée progressivement dans le mélangeur, tout en maintenant une vitesse de malaxage lente pendant deux minutes, jusqu'à l'obtention d'une pâte présentant une cohésion satisfaisante. Une quantité d'eau, estimée nécessaire, a ensuite été ajoutée graduellement, et le malaxage a été poursuivi à la même vitesse pendant deux minutes supplémentaires, jusqu'à l'obtention d'une consistance semi-liquide. Enfin, un malaxage final à vitesse rapide a été réalisé pendant trente secondes afin d'assurer une homogénéité complète et une dispersion uniforme de l'ensemble des constituants du béton géopolymère.

Immédiatement après le malaxage, la pâte de béton géopolymère fraîchement préparée a été soumise à un essai d'étalement afin d'évaluer sa maniabilité. Cette étape a précédé le moulage des éprouvettes. La pâte a ensuite été soigneusement coulée et compactée dans des moules cubiques de dimensions $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, ainsi que dans des moules prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, en vue de la réalisation des essais de caractérisation à l'état durci.



Figure II.14: Echantillons préparé.

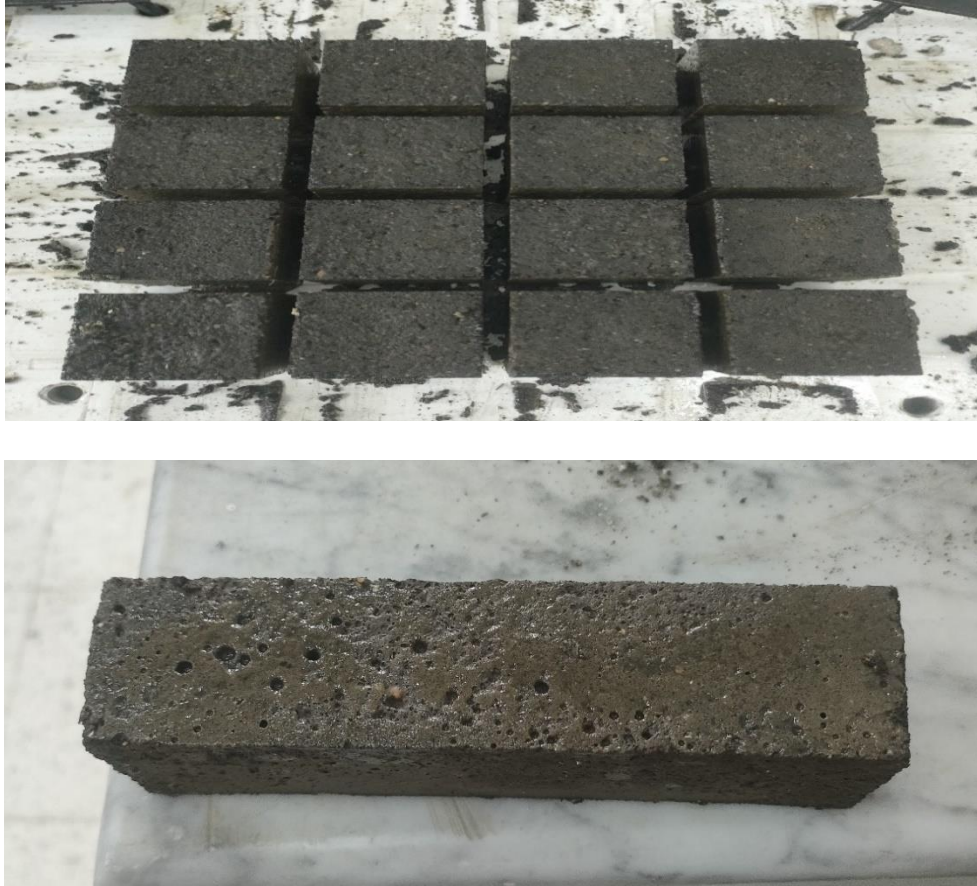


Figure II.15: Les échantillons démoulés.

II.4 Essai réaliser

II.4.1. Essai d'étalement Absorption d'eau

Afin d'évaluer la maniabilité des mélanges de béton géopolymère à l'état frais, un essai d'étalement a été réalisé conformément à la norme ASTM C1437 (voir **Figure II.16**). Cet essai permet de quantifier la consistance et la fluidité de la pâte géopolymère immédiatement après le malaxage, avant sa mise en moule.



Figure II.16: Essai d'étalement des géopolymères.

II.4.2. Absorption d'eau

Afin d'évaluer la durabilité des bétons géopolymères exposés à des conditions environnementales spécifiques, ainsi que d'analyser l'effet de l'ajout de déchets utilisé, les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant 24 heures. À l'issue de cette immersion, la teneur en eau a été déterminée selon la formule suivante :

$$Ab = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{seche}}}{M_{\text{seche}}} \times 100$$

Où:

- M_{humide} est la masse de l'échantillon après immersion,
- M_{sec} est la masse de l'échantillon à l'état sec,
- Ab représente le pourcentage d'absorption d'eau.



Figure II.17: Essai d'absorption d'eau des géopolymères.

II.4.3. Résistances à la compression

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés à 28 jours de durcissement, conformément aux prescriptions de la norme ASTM C109 (voir **Figure II.18**).



Figure II.18: essais de résistance à la compression.

II.4.4. Résistances à la flexion

La résistance à la flexion des bétons géopolymères durcis a été évaluée au moyen d'un essai de flexion sur éprouvettes prismatiques (voir **Figure II.19**), conformément à la norme ASTM C293. Cet essai, basé sur un dispositif de chargement en trois points, permet de mesurer la capacité du matériau à résister aux contraintes de traction indirectes avant la rupture.



Figure II.19: essais de résistance à la flexion

II.4.5. Essai de transmission d'ondes ultrasonores

La vitesse d'impulsion ultrasonore a été mesurée à l'aide d'un analyseur ultrasonique Pulse Analyzer de marque CONTROLS, conformément à la norme ASTM C597. Cet essai permet d'évaluer la qualité et l'homogénéité de la structure interne des bétons géopolymères, ainsi que de mettre en relation ces caractéristiques avec leurs propriétés mécaniques.

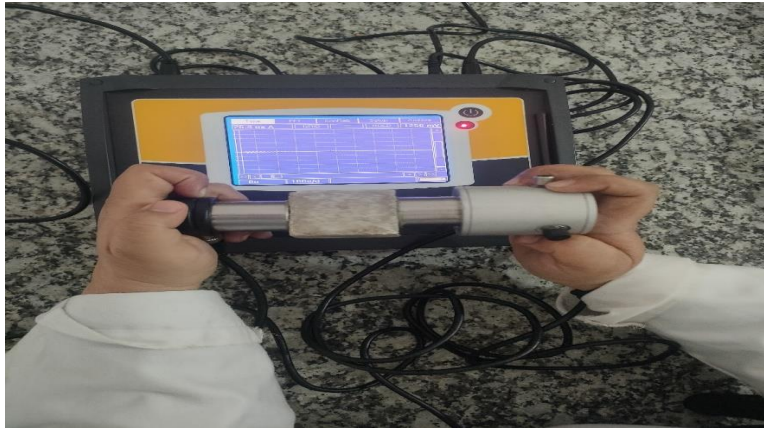


Figure II.20: essai de l'ultrasonique.

II.4.6. Conductivité thermique

L'essai de conductivité thermique a été réalisé afin d'évaluer la performance isolante des bétons géopolymères modifiés par l'ajout de déchets tels que le plastique, la perlite et le liège. Cette mesure est essentielle pour vérifier l'efficacité de ces matériaux légers et poreux à améliorer le comportement thermique du béton. En effet, une conductivité thermique réduite indique une meilleure capacité d'isolation, ce qui rend ces bétons particulièrement adaptés aux applications dans les constructions écoénergétiques et à haute performance thermique.



Figure II.21: essais de Conductivité thermique.

II.4.7. Exposition des Échantillons à Haute Température

Afin d'évaluer le comportement thermique des bétons géopolymères, des éprouvettes durcies ont été soumises à des cycles de chauffage contrôlés dans un four électrique (voir **Figure II.22**). Les échantillons ont été exposés à quatre températures cibles : 200 °C, 400 °C, 600 °C et 800 °C. À chaque palier, les éprouvettes ont été maintenues pendant une heure, puis laissées à refroidir naturellement jusqu'à atteindre la température ambiante du laboratoire. Ce protocole a permis de mesurer la résistance résiduelle à la compression ainsi que la perte de masse après exposition, fournissant des indications essentielles sur la stabilité structurelle des mélanges face aux sollicitations thermiques.



Figure II.22 : éprouvettes du béton géopolymère avant et après exposition à haute température.

II.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée les matériaux choisis ainsi que les protocoles expérimentaux rigoureux utilisés pour préparer et caractériser les bétons géopolymères. La description minutieuse des propriétés physico-chimiques des composants, couplée à un suivi méthodique des étapes de formulation, garantit la fiabilité et la reproductibilité des résultats. De plus, l'intégration d'additifs innovants comme les déchets plastiques, le liège et la perlite a été soigneusement considérée dans le cadre des procédures.

Chapitre II : Matériaux et procédures Expérimentales

Les différentes méthodes d'essai, qu'il s'agisse de la maniabilité à l'état frais, de la résistance mécanique, de la durabilité ou du comportement thermique, offrent un cadre complet pour évaluer les performances des matériaux développés. Ces bases expérimentales solides sont essentielles pour une analyse approfondie des résultats et pour interpréter les effets des divers paramètres sur le comportement global des bétons géopolymères.

CHAPTER III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la caractérisation approfondie des propriétés physiques, mécaniques et thermiques de bétons géopolymères innovants, dans lesquels une partie du sable a été substituée par différents types de déchets légers : le plastique, la perlite et le liège. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de ces substitutions sur un éventail de performances critiques du matériau, afin de déterminer leur potentiel d'application dans le bâtiment.

Les essais réalisés, dont les résultats seront présentés et interprétés en détail, incluent : La maniabilité (essai d'étalement), La densité (qui caractérise la légèreté du matériau), L'absorption d'eau, La vitesse d'impulsion ultrasonique, La résistance à la compression et la résistance à la flexion, et finalement Le comportement à haute température.

III.2. Résistance à la compression

Le graphique ci-dessous illustre l'effet des différents matériaux allégeants (plastique, perlite, liège) sur la résistance à la compression des mélanges géopolymères.

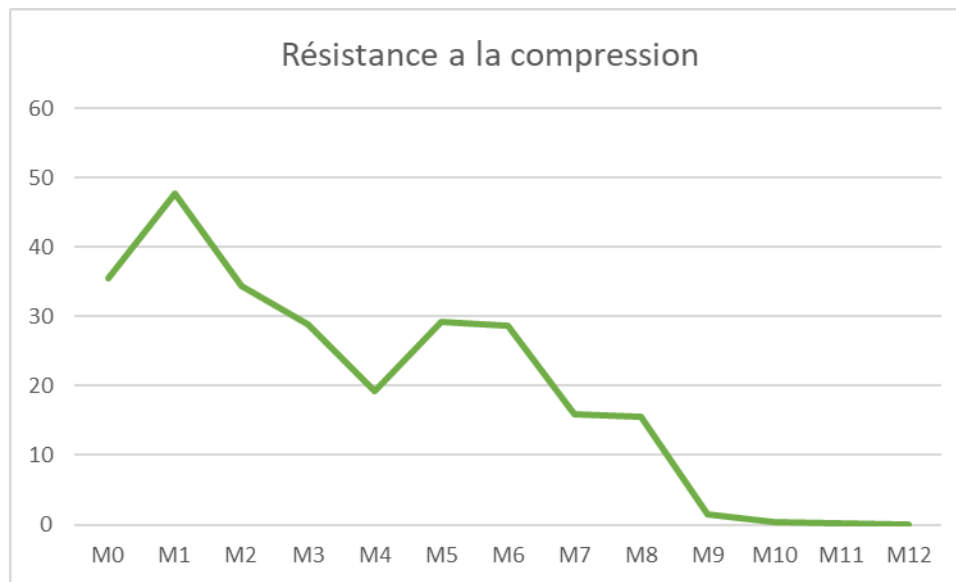


Figure 9: Résistance à la compression.

Les résultats obtenus sur les différents mélanges de géopolymères légers montrent une influence significative des matériaux allégeant (plastique, perlite, liège) sur la résistance à la compression. Le mélange de référence (M0), qui ne contient aucun ajout, affiche une résistance de 35,49 MPa. C'est une performance tout à fait respectable pour un béton géopolymère, soulignant l'efficacité du mélange de base en ce qui concerne le liant (laitier et FS) et les agrégats (sable). Cette valeur

sert de référence pour évaluer l'influence des différents ajouts. Elle est cohérente avec les résultats rapportés par Feiyu Shi [53].

L'introduction de plastique dans les mélanges M1 à M4 entraîne une évolution non linéaire. Avec une faible dose de 10% (M1), la résistance atteint 47,74 MPa, ce qui représente une augmentation de 34,5 % par rapport au mélange de référence. Cela indique un effet initialement positif du plastique. Le plastique, bien que léger, peut agir comme un agrégat interne, améliorant potentiellement la compacité ou la distribution des contraintes à faible pourcentage. Il pourrait également influencer sur la morphologie de la matrice géopolymérique, menant à une structure plus dense ou moins fissurée. Cependant, lorsque la quantité de plastique augmente (jusqu'à M4), la résistance chute à 19,33 MPa, soit une réduction de 45,5 % par rapport à M0. La principale raison de cette baisse est la faible adhérence entre les particules de plastique et la matrice géopolymérique.

Les mélanges M5 à M8, qui contiennent de la perlite, montrent une tendance similaire, mais leur résistance est généralement plus faible que celle du plastique à dose équivalente. On observe une chute de la résistance, passant de 29,25 MPa (M5) à 15,63 MPa (M8), ce qui représente une diminution de 46,5 % au sein du groupe, et jusqu'à 56 % par rapport à M0. La perlite a la capacité d'absorber une partie de l'eau ou de la solution d'activateur, ce qui pourrait influencer le rapport eau/liant effectif et l'hydratation géopolymérisation. Plus important encore, cela peut réduire la quantité de liant disponible pour créer une matrice solide.

Enfin, les mélanges M9 à M12, qui contiennent du liège, montrent des résistances très faibles (1,556 MPa), ce qui représente une chute presque totale (95,6 %) par rapport à la référence. Cela met en évidence une incompatibilité claire entre le liège et la matrice géopolymère, probablement en raison de ses propriétés hydrophobes et de sa faible adhérence. Le liège, étant un matériau cellulaire, est très léger et compressible, mais il n'offre pratiquement aucune résistance aux charges de compression.

III.3. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est une propriété mécanique essentielle qui reflète la capacité d'un matériau à résister à la déformation sous une charge de flexion avant la rupture. L'incorporation de différents types de déchets en remplacement du sable a eu un impact significatif et varié sur

cette propriété du béton géopolymère. (La figure III.2) représente les valeurs de la résistance à la flexion.

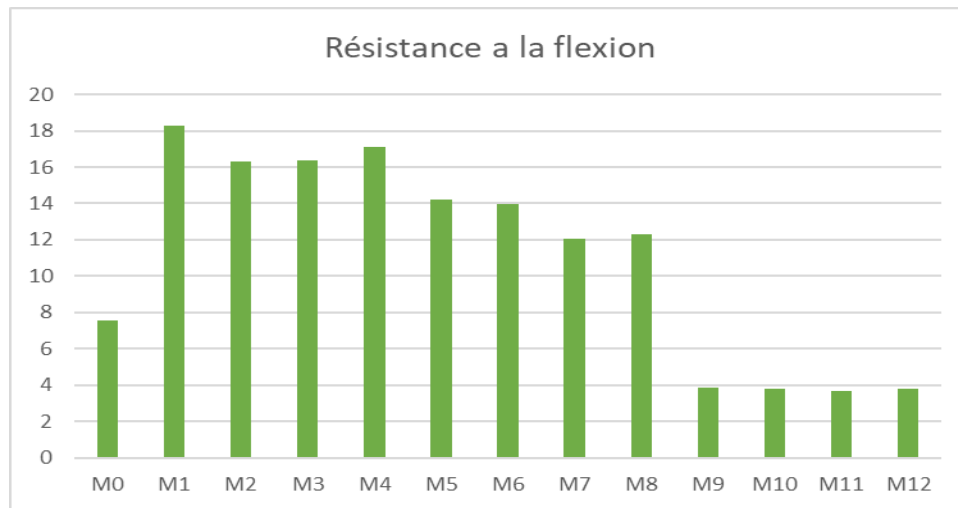


Figure III.2: Résistance à la flexion.

Les résultats de résistance à la flexion montrent un effet marqué des différents types de déchets incorporés dans les mélanges géopolymères. Le mélange de référence (M0), sans ajout, affiche une résistance relativement faible de 7,54 MPa. une valeur relativement élevée en comparaison aux travaux rapportés par A.A. Hilal et al.[54].

L'introduction de plastique dans les mélanges M1 à M4 améliore considérablement cette résistance, atteignant un maximum de 18,27 MPa (M1), soit une augmentation de plus de 142 % par rapport à M0. Même à doses plus élevées (M4), la résistance reste supérieure à 17 MPa, indiquant une très bonne interaction du plastique avec la matrice géopolymère. Cette tendance suggère que les particules de plastique, de par leur nature ductile et potentiellement leur capacité à absorber et redistribuer les contraintes, peuvent agir comme des fibres ou des agrégats flexibles qui empêchent la propagation rapide des microfissures sous contrainte de flexion.

En comparaison, les mélanges M5 à M8 contenant de la perlite présentent une résistance modérément élevée, variant de 14,21 MPa (M5) à 12,28 MPa (M8). Bien qu'inférieure à celle obtenue avec le plastique, cette performance reste nettement supérieure à celle du mélange de base, démontrant que la perlite conserve une certaine efficacité mécanique.

En revanche, les mélanges M9 à M12 incorporant du liège affichent les plus faibles résistances à la flexion, avec des valeurs très basses comprises entre 3,65 MPa et 3,83 MPa. Dans l'ensemble,

le liège semble nettement moins compatible, probablement à cause de sa faible densité, de sa structure cellulaire et de sa faible adhérence à la matrice.

III.4. La densité

La densité est une propriété physique fondamentale du béton qui est directement influencée par la masse volumique des matériaux constitutifs et leur arrangement au sein de la matrice. L'objectif de cette série d'essais était d'évaluer comment la substitution du sable par des déchets plastiques, de la perlite ou du liège impacte la densité des bétons géopolymères produits.

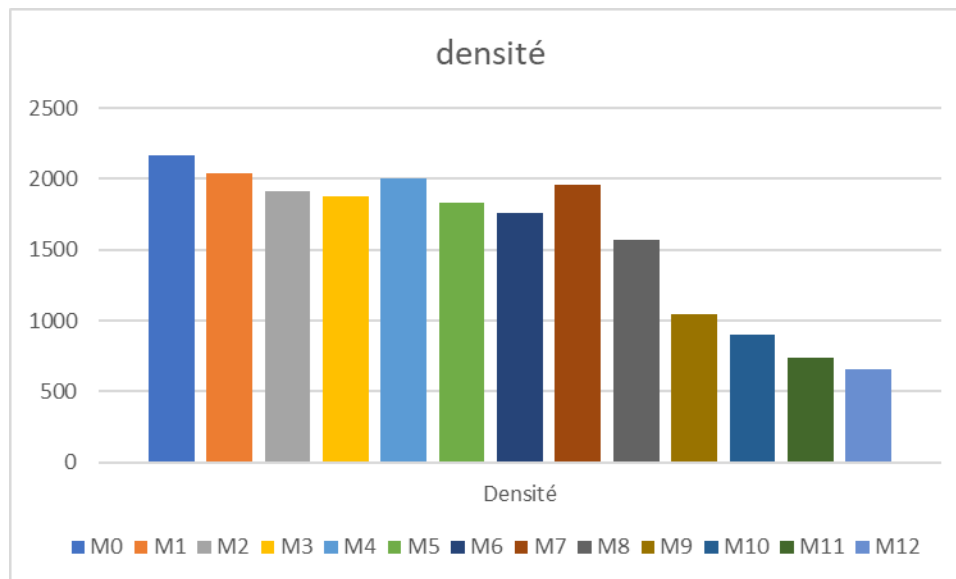


Figure III.3: La densité du géopolymère réalité.

Les valeurs de densité varient de 2164,06 kg/m³ (M0) à 653,86 kg/m³ (M12), ce qui couvre un large spectre de bétons, du plus dense au plus léger. Un béton léger est défini par une masse volumique sèche comprise entre 800 et 2000 kg/m³, alors qu'un béton ordinaire est généralement compris entre 2200 et 2600 kg/m³. L'incorporation de déchets plastiques (M1 à M4) a globalement conduit à une diminution de la densité par rapport au mélange de référence (les mélanges entre 1873,75 et 2040,62 kg/m³)

La substitution par la perlite M5 à M8 a systématiquement entraîné une réduction significative de la densité (entre 1566,4 et 1828,9 kg/m³). La perlite, connue comme un agrégat ultra-léger et poreux, remplace un sable plus dense, ce qui explique naturellement cette réduction de la densité. Ces mélanges sont bien dans la gamme des bétons légers, adaptés à des applications structurelles

limitées ou des éléments nécessitant une réduction de poids (Rénovation, remplissage, isolation modérée).

Enfin, l'incorporation de liège (M9 à M12) conduisant à la production de bétons ultralégers affichent les plus faibles densités entre 653,86 et 1049,21 kg/m³, adaptés principalement à des fonctions d'isolation thermique ou acoustique, ou à des éléments non porteurs.

III.5. Absorption d'eau

L'absorption d'eau est une propriété essentielle des bétons, directement liée à leur porosité et à l'interconnexion de leurs pores, ce qui influence fortement leur durabilité face à des environnements agressifs. Le mélange de référence, M0, présente une absorption d'eau de 9.86% (voir **figure III.4**).

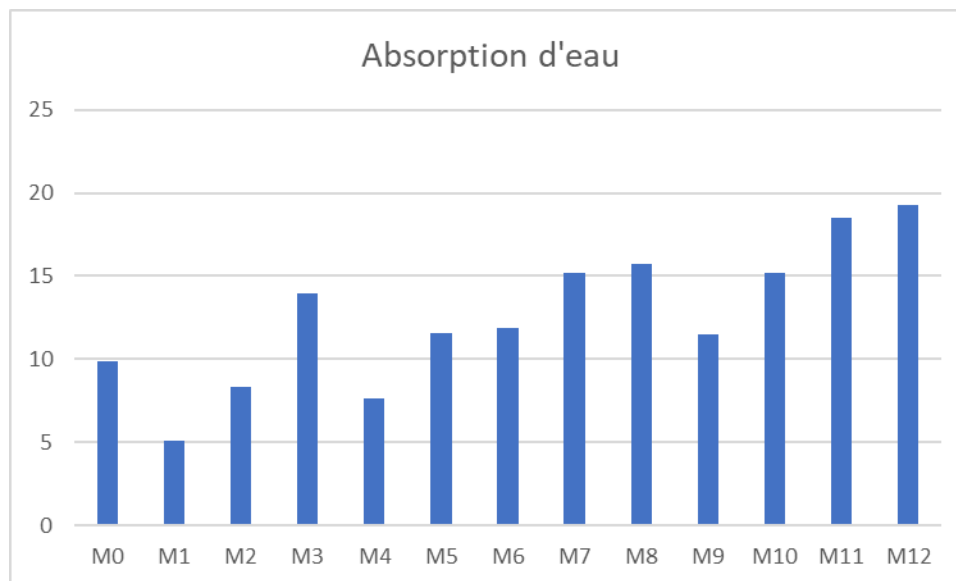


Figure 10: Absorption d'eau.

Les mélanges M1, M2 et M4 présentent une absorption d'eau inférieure à M0, avec notamment M1 qui affiche une baisse très marquée de 48,3 %. Cela suggère que la composition de ces mélanges (probablement une proportion plus élevée de plastique) améliore la compacité ou la résistance à la pénétration de l'eau. La substitution par la perlite (M5 à M8) a systématiquement conduit à une augmentation de l'absorption d'eau par rapport à M0, ce qui est attendu compte tenu de la nature très poreuse de la perlite.

Chapitre III : Résultats et discussions

La plupart des mélanges montrent une absorption supérieure à M0, avec des augmentations notables : M7 (+54,1 %), M8 (+59,6 %), M11 (+87,5 %) et M12 (+95,4 %). Cette hausse est particulièrement marquée pour les mélanges les plus légers (M11, M12), ce qui est cohérent avec l'utilisation accrue de granulats très poreux comme la perlite ou le liège, qui favorisent l'absorption d'eau.

Les mélanges M5, M6, M9 et M10 présentent des augmentations modérées d'absorption d'eau (entre +16,6 % et +54,4 %), correspondant à des formulations où la porosité reste significative sans atteindre les extrêmes.

III.6. Essai d'étalement

L'essai d'étalement, qui mesure la maniabilité du béton frais. Cette information est cruciale pour évaluer l'aptitude à la mise en œuvre de chaque mélange. Les valeurs d'étalement obtenues sont présentées dans le graphique ci-dessous, et une illustration visuelle de l'étalement de chaque mélange est également présentée par la **figure III.6**.



Figure 11: Essai d'étalement.

La valeur d'étalement du mélange de référence est de 13.6 cm, L'incorporation de déchets plastiques (M1 à M4) montre une tendance générale à la diminution de la maniabilité, M1 présente un étalement de 12.3 cm, soit une réduction d'environ 9.6% par rapport à M0. Cette baisse se poursuit pour M2 (11.9 cm, soit -12.5%) et M4 (11.8 cm, soit -13.2%). Curieusement, le M3 affiche un étalement de 15.8 cm, soit une augmentation d'environ 16.2% par rapport à M0.

Chapitre III : Résultats et discussions

Cette variabilité pourrait être liée à la forme, la taille ou la surface des particules de plastique qui, à certains dosages. La tendance dominante reste cependant une légère perte de maniabilité pour la majorité des mélanges de plastique.

La substitution par la perlite (M5 à M8) a des effets moins linéaires sur la maniabilité. Le M5 soit une légère augmentation d'environ 3.7% par rapport à M0, ce qui pourrait s'expliquer par sa faible densité réduisant le poids global du mélange. Cependant, le M6 (-2.9%) montre une légère diminution. Aux dosages plus élevés, M7 (+6.6%) et M8 (+12.5%), indiquent une tendance générale à l'augmentation de l'étalement avec plus de perlite. La nature poreuse et absorbante de la perlite pourrait influencer l'eau disponible pour la maniabilité, mais sa forme et sa texture peuvent aussi réduire les frottements internes par rapport au sable, améliorant la fluidité à certains dosages.



Figure III.6: illustration visuelle de l'étalement.

L'incorporation de liège en substitution partielle du sable (mélanges M9 à M12) exerce un effet nuancé sur la maniabilité du béton géopolymère frais, mesurée par l'essai d'étalement. Par rapport au mélange témoin M0 (13,6 cm), les faibles dosages de liège, comme M9 (10 %), entraînent une légère diminution de la maniabilité, avec un étalement de 12,3 cm, soit une réduction d'environ 9,6 %. Cette tendance à une baisse modérée ou à une stabilité relative se poursuit pour les mélanges intermédiaires, tels que M10 (-8,1 %) et M11 (-8,8 %). Ce comportement pourrait s'expliquer par l'absorption partielle de la solution alcaline par les particules de liège, modifiant ainsi le rapport eau/liant du mélange. De manière intéressante, le mélange M12, avec 25 % de liège, présente une légère augmentation de l'étalement à 14,2 cm, soit une hausse d'environ 4,4 % par rapport à M0.

III.7. Vitesse d'impulsion

La vitesse d'impulsion ultrasonique est un excellent indicateur non destructif de la qualité et de l'homogénéité du béton, souvent corrélée à sa compacité, sa résistance et son module d'élasticité. Généralement, une vitesse d'impulsion plus élevée indique un matériau plus dense, moins poreux et de meilleure qualité.

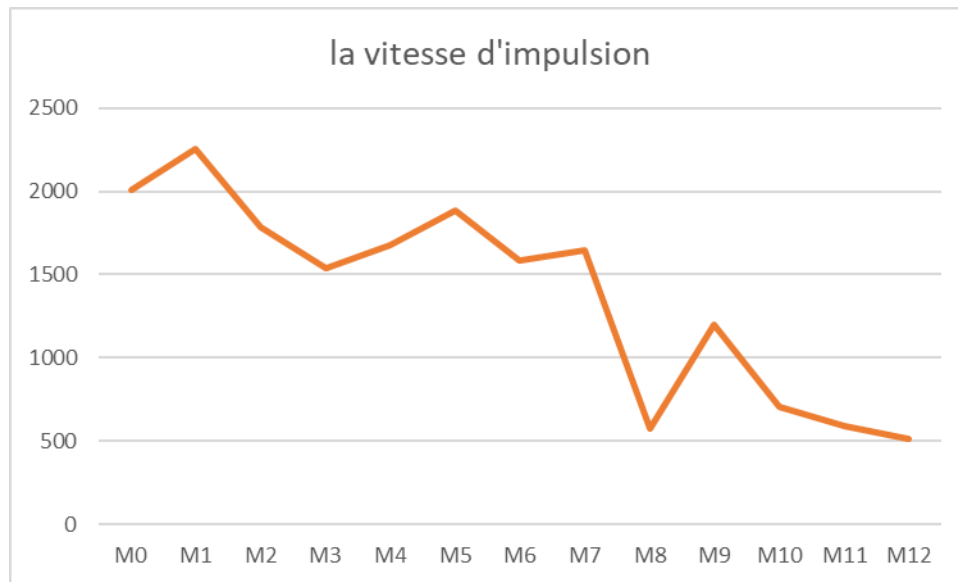


Figure 12: Vitesse d'impulsion.

M0, présente une vitesse d'impulsion ultrasonique de 2010 m/s, Le mélange M1 affiche 2252 m/s, soit une augmentation d'environ 12% par rapport à M0. Cette amélioration notable, la plus élevée de toutes les séries, est cohérente avec la hausse de la résistance à la compression et la diminution de l'absorption d'eau observées pour M1, suggérant une densification et une meilleure qualité de la matrice géopolymérique à ce dosage optimal.

Cependant, plus le dosage du plastique augmente, la vitesse d'impulsion ultrasonique diminue progressivement : M2 (1783 m/s, soit -11.3%), M3 (1540 m/s, soit -23.4%), et M4 (1678 m/s, soit -16.6%). Cette baisse significative aux dosages élevés indique une dégradation de la compacité et une augmentation des discontinuités ou hétérogénéités, probablement dues à la faible adhérence et à la nature non réactive des particules de plastique.

La substitution progressive par la perlite dans les mélanges M5 à M8 engendre une diminution systématique et significative de la vitesse d'impulsion ultrasonique, traduisant une altération de la qualité structurale du matériau. Pour un taux de remplacement de 10 % (M5), la vitesse mesurée

est de 1884 m/s, soit une baisse de 6,4 % par rapport au mélange témoin (M0). Cette tendance se renforce avec l'augmentation de la teneur en perlite : le mélange M6 enregistre une vitesse de 1584 m/s (-21,2 %), M7 atteint 1649 m/s (-18,0 %), tandis que M8 affiche une valeur extrêmement basse de 572 m/s, correspondant à une réduction de 71,5 % par rapport à M0. Ces résultats s'expliquent par la nature intrinsèquement poreuse et légère de la perlite, qui introduit des vides importants et complique la trajectoire des ondes ultrasonores. Il en résulte une augmentation de la porosité globale et une diminution de la densité, affectant négativement les propriétés acoustiques et mécaniques du matériau.

L'incorporation de liège dans les mélanges M9 à M12 entraîne la diminution la plus prononcée de la vitesse d'impulsion ultrasonique, révélant une structure particulièrement poreuse et peu résistante. Dès 10 % de substitution (M9), la vitesse chute à 1199 m/s, soit une réduction de 40,4 % par rapport au mélange de référence (M0). Cette tendance s'aggrave nettement avec l'augmentation du taux de liège : M10 atteint 707 m/s (-64,8 %), M11 descend à 588 m/s (-70,8 %), et M12 enregistre une valeur minimale de 512 m/s, correspondant à une baisse de 74,5 %. Ces vitesses extrêmement faibles sont cohérentes avec les très faibles densités et résistances mécaniques mesurées, confirmant que le liège, du fait de sa forte compressibilité et de sa faible adhésion à la matrice cimentaire, induit une structure très hétérogène et fortement poreuse

III.8. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une propriété cruciale qui détermine la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur, faisant d'elle un indicateur clé pour les applications d'isolation. Une faible conductivité thermique est recherchée pour les matériaux isolants.

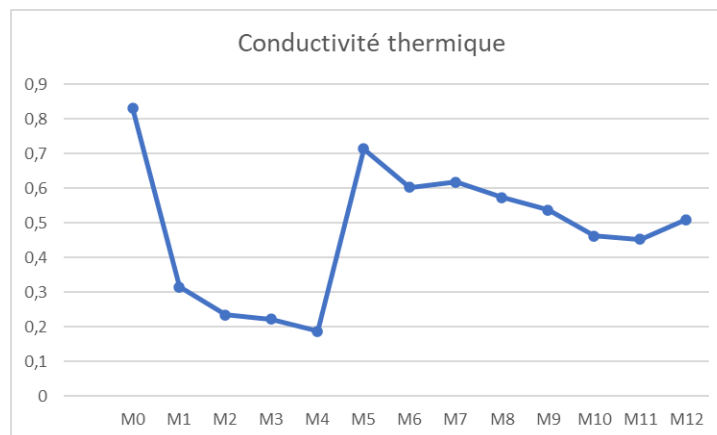


Figure 13: conductivité thermique.

Chapitre III : Résultats et discussions

Le mélange de référence, M0, présente une conductivité thermique de 0.832 W/(m.K). L'incorporation de déchets plastiques (M1 à M4) a entraîné une réduction très significative de la conductivité thermique, indiquant une amélioration des propriétés isolantes. Dès le premier dosage, le M1 voit sa conductivité chuter à 0.316 W/(m.K), soit une diminution spectaculaire d'environ 62% par rapport à M0. Cette tendance se poursuit avec l'augmentation du plastique, atteignant des valeurs encore plus faibles : M2 (0.235 W/(m.K)), M3 (0.222 W/(m.K)), et le minimum à M4 (0.188 W/(m.K)) soit une diminution spectaculaire d'environ 77.4%. Cette performance est directement liée à la nature intrinsèquement isolante du plastique et à sa faible densité, qui, en remplaçant le sable plus dense et conducteur, introduit des poches d'air, améliorant ainsi l'isolation thermique du composite. Ces résultats sont très prometteurs pour des applications où la légèreté et l'isolation sont prioritaires, tout en maintenant une résistance à la flexion intéressante.

La substitution par la perlite (M5 à M8) a également conduit à une réduction notable de la conductivité thermique, bien que moins prononcée qu'avec le plastique. Le M5 affiche une conductivité de 0.714 W/(m.K), soit une baisse d'environ 14.2% par rapport à M0. Cette diminution se poursuit avec l'augmentation du dosage : M6 (0.602 W/(m.K), soit -27.6%), M7 (0.618 W/(m.K), soit -25.7%), et M8 (0.573 W/(m.K), soit -31.1%). La perlite, étant un agrégat léger et hautement poreux, contribue à la formation de bétons plus légers et plus isolants en augmentant le volume d'air emprisonné dans la matrice, l'air étant un excellent isolant thermique.

L'incorporation de liège (M9 à M12) a également démontré une amélioration significative des propriétés isolantes. Le M9 présente une conductivité thermique de 0.538 W/(m.K), soit une diminution d'environ 35.3% par rapport à M0. Les mélanges suivants montrent des réductions progressives : M10 (0.463 W/(m.K), soit -44.4%), M11 (0.453 W/(m.K), soit -45.6%), et M12 (0.51 W/(m.K), soit -38.6%). Le liège, avec sa structure cellulaire remplie d'air, est un isolant thermique naturel et très efficace. Sa capacité à créer des bétons ultralégers (comme observé avec la densité) est directement liée à cette propriété isolante. Il est intéressant de noter que le liège, bien qu'entraînant une perte quasi-totale de résistance mécanique, offre une conductivité thermique comparable ou légèrement inférieure à celle des mélanges de perlite aux dosages les plus élevés, mais moins performante que le plastique pour la plupart des dosages.

III.9. Comportement du béton à haute température

III.9.1. Résistance mécanique à la compression

Le comportement du béton à haute température est un critère essentiel pour évaluer sa performance en cas d'incendie, où le maintien des propriétés mécaniques est vital pour l'intégrité structurelle. Les bétons géopolymères sont généralement réputés pour leur excellente résistance au feu par rapport aux bétons de ciment Portland. Dans cette étude, la résistance à la compression a été évaluée après exposition à 200°C, 400°C, 600°C et 800°C. Le mélange de référence, M0, présente une résistance initiale de 35.49 MPa, et ses performances à haute température serviront de base de comparaison.

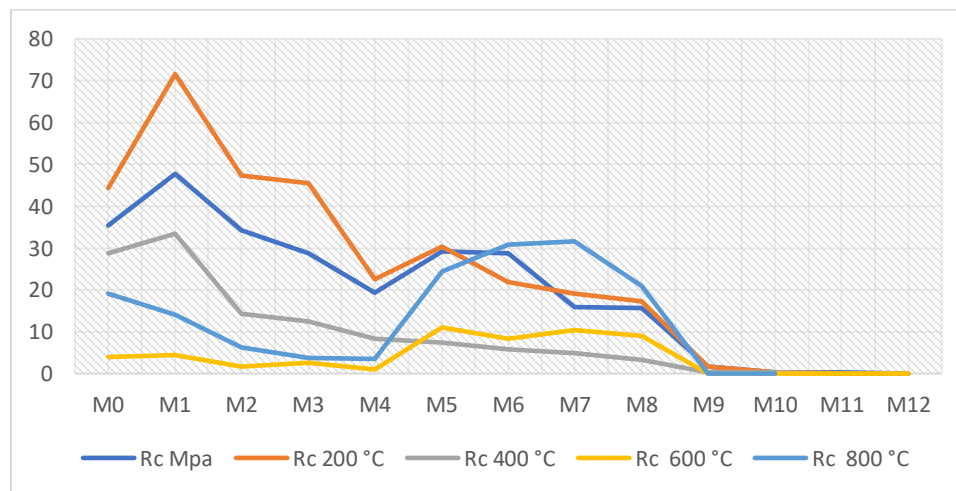


Figure 14: Perds de résistance du béton géopolymère soumis à haute température.

- **Effet de plastique**

L'incorporation de déchets plastiques (M1 à M4) modifie significativement la résistance à la compression à haute température, avec des tendances contrastées. À 200°C, tous les mélanges plastiques (M1 à M4) surpassent M0, avec M1 atteignant 71.602 MPa (soit +61.8% par rapport à M0), montrant une amélioration notable de la résistance. Cependant, à mesure que la température augmente et que la teneur en plastique s'accroît, la résistance tend à chuter drastiquement.

À 400°C, les performances des mélanges plastiques diminuent considérablement, bien que M1 (33.442 MPa) se maintienne encore au-dessus de M0 (28.655 MPa). Au-delà de cette température, les mélanges plastiques voient leur résistance s'effondrer. À 600°C, tous les mélanges plastiques montrent des résistances très faibles (de 4.440 MPa pour M1 à 0.908 MPa

pour M4), avec des diminutions massives allant jusqu'à -77% pour M1 et -84% pour M4 par rapport à M0 à la même température. Cette dégradation est exacerbée à 800°C, où les résistances sont encore plus faibles (de 14.121 MPa pour M1 à 3.540 MPa pour M4), bien que certaines valeurs soient un peu plus élevées qu'à 600°C pour M0 et M1, suggérant potentiellement une recristallisation ou un changement de phase bénéfique pour la matrice géopolymère à très haute température pour ces cas spécifiques.

La principale raison de cette forte dégradation est la décomposition et la combustion du plastique à des températures élevées, créant des vides importants et des pertes d'intégrité structurelle, ce qui neutralise son effet bénéfique initial.



Figure III.10: Présentation des éprouvettes fabriquées par plastique avant et après exposition à la température élevée.

- **Effet de perlite**

La substitution par la perlite (M5 à M8) révèle un comportement particulièrement intéressant et globalement supérieur à M0 à très haute température. À 200°C, la perlite a un impact variable, avec M5 (30.254 MPa) et M6 (21.785 MPa) étant respectivement inférieurs à M0. Cependant, à partir de 400°C, M5 (7.492 MPa) est inférieur à M0. C'est aux températures élevées de 600°C et surtout 800°C que la perlite montre sa robustesse. À 600°C, les résistances des mélanges de perlite (de 11.033 MPa pour M5 à 9.092 MPa pour M8) sont toutes nettement supérieures à celle de M0 (3.945 MPa), représentant des augmentations impressionnantes allant de +133% à +185%. Cette tendance se confirme et s'amplifie à 800°C, où M5 (24.360 MPa), M6 (30.807 MPa), M7 (31.612 MPa) et M8 (20.880 MPa) affichent des résistances considérablement plus élevées que M0 (19.100 MPa), avec des gains allant de +9.3% à +61.3%. Ce comportement s'explique par la nature réfractaire et stable de la perlite, qui peut, à haute température, subir une vitrification ou une fusion partielle qui comble les pores et densifie la matrice, ou du moins

n'apporte pas de dégradation structurelle majeure comme le plastique. Les bétons à base de perlite montrent ainsi une meilleure rétention de résistance à des températures extrêmes, ce qui en fait des candidats prometteurs pour des applications de protection incendie.

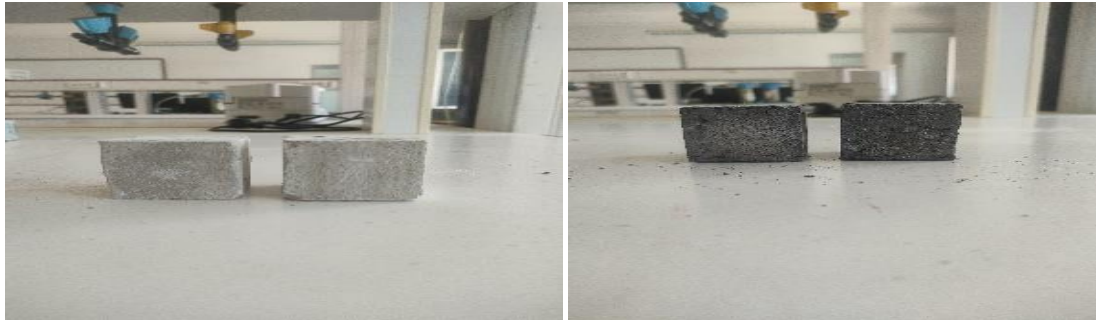


Figure 15: Présentation des éprouvettes fabriquées par perlite avant et après exposition à la température élevée.

- **Effet de liège**

L'incorporation de liège dans les mélanges M9 à M12 conduit à une chute drastique de la résistance à la compression après exposition à haute température, confirmant son inaptitude pour toute application nécessitant une résistance au feu. Les mélanges de liège, déjà très faibles en résistance initiale, voient leurs performances s'anéantir dès les premières montées en température. À 200°C, M9 conserve sa résistance minimale (1.690 MPa). Cependant, à 400°C et au-delà (600°C, 800°C), tous les mélanges de liège affichent une résistance presque nulle. Cela est dû à la combustion complète et à la carbonisation du liège à ces températures, transformant les agrégats en vides et détruisant toute intégrité structurelle. Les bétons de liège ne peuvent donc absolument pas être considérés pour des applications exposées à des températures élevées.



Figure 16: Présentation des éprouvettes fabriquées par liège après exposition à la température élevée.

III.9.2. Pert de poids

La perte de masse est un indicateur de la décomposition des constituants du béton (comme les agrégats organiques, l'eau liée, etc.) et de la formation de vides ou de l'effondrement structurel à haute température. (la figure III.13) représente la variation de masse des éprouvettes soumis à haute température.

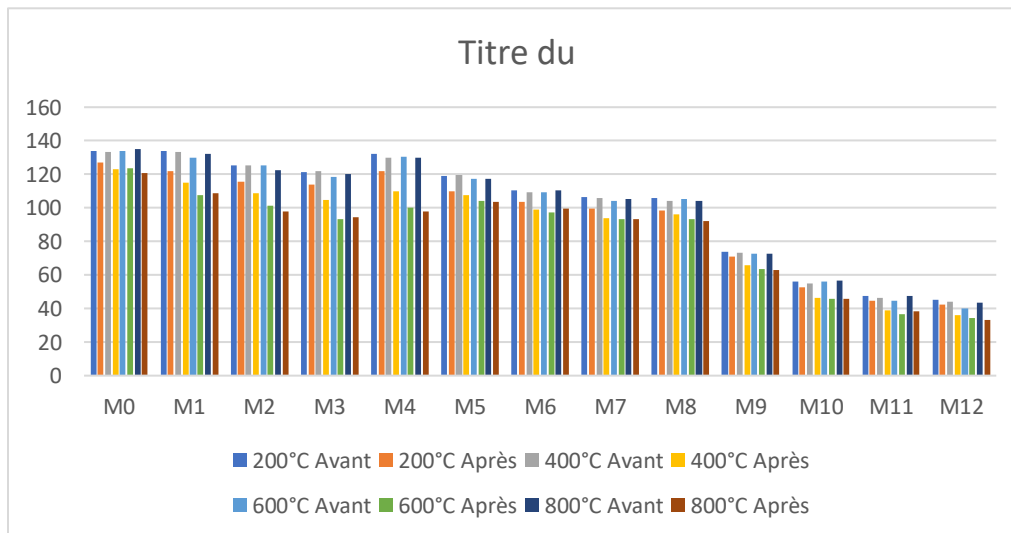


Figure 17: Perds de poids du béton géopolymère soumis à haute température.

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{\text{Masse avant} - \text{Masse après}}{\text{Masse avant}} \times 100$$

La perte de masse après exposition à des températures élevées est un indicateur de la stabilité thermique des constituants du béton et de l'intégrité de sa matrice. Une perte de masse significative révèle la décomposition ou la combustion de certains agrégats, l'évaporation de l'eau résiduelle ou la transformation de la matrice, ce qui peut entraîner une dégradation structurelle. Pour le mélange de référence M0, les pertes de masse sont relativement faibles et progressives, atteignant environ 5.8% à 200°C, 8.8% à 400°C, 9.2% à 600°C et 10.4% à 800°C, traduisant une bonne stabilité de la matrice géopolymère elle-même.

- **Effet de plastique**

L'incorporation de déchets plastiques (M1 à M4) entraîne une augmentation notable des pertes de masse à mesure que la température et le dosage en plastique augmentent. À 200°C, les pertes de masse pour les mélanges plastiques sont déjà supérieures à M0 (par exemple, M1 à 9.0% et M4 à

8.0%), indiquant une dégradation précoce du plastique. Cette tendance s'accroît drastiquement à 400°C et surtout à 600°C et 800°C, où les pertes de masse atteignent des sommets, en particulier pour les dosages élevés. Par exemple, à 600°C, le M4 enregistre une perte de masse d'environ 23.0% (contre 9.2% pour M0), et à 800°C, elle monte à 24.6% (contre 10.4% pour M0). Cette augmentation significative est directement attribuable à la décomposition thermique et à la combustion des polymères plastiques, créant des vides au sein de la matrice et contribuant à la perte de résistance observée à ces températures.

- **Effet de perlite**

La substitution par la perlite (M5 à M8) révèle des pertes de masse également supérieures à M0, mais généralement plus modérées et progressives que celles des bétons de plastique. À 200°C, les pertes varient d'environ 7.5% pour M5 à 7.1% pour M8. Ces pertes augmentent avec la température, atteignant, par exemple, pour le M8, environ 10.1% à 400°C, 11.6% à 600°C et 18.1% à 800°C. Bien que la perlite soit un matériau inorganique et stable à haute température, sa nature poreuse et potentiellement la perte d'eau adsorbée dans ses pores, ou des transformations internes, contribuent à cette perte de masse. Cependant, la matrice reste globalement plus stable que celle des bétons plastiques, ce qui est cohérent avec la meilleure rétention de résistance observée pour ces mélanges à haute température.

- **Effet de liège**

L'incorporation de liège (M9 à M12) se traduit par des pertes de masse extrêmement élevées dès les premières montées en température, témoignant d'une instabilité thermique majeure. À 200°C, les pertes de masse sont déjà très importantes, allant de 10.5% pour M9 à 9.5% pour M12. Ces valeurs augmentent de manière vertigineuse à mesure que la température progresse. À 400°C, les pertes pour les bétons de liège varient d'environ 9.5% pour M9 à 18.7% pour M12. Au-delà, à 600°C et 800°C, les pertes de masse sont extrêmes, atteignant près de 30% pour M9 et 28.4% pour M12 à 800°. Cette dégradation massive est directement due à la combustion et à la volatilisation complète du liège, qui est un matériau organique. Les pertes de masse très élevées pour le liège expliquent directement l'effondrement total de leur résistance à la compression à haute température, les transformant en structures non cohésives.

III.10. Conclusion

Ce chapitre a évalué l'impact de l'incorporation de déchets (plastique, perlite, liège) sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du béton géopolymère. L'ajout de ces agrégats légers a systématiquement réduit la densité et, en général, augmenté la porosité. Sur le plan mécanique, la résistance à la compression a majoritairement diminué, sauf pour le plastique à faible dosage qui a montré une amélioration. En revanche, la résistance à la flexion a été significativement améliorée par le plastique et la perlite. Le liège a fortement dégradé toutes les résistances. La maniabilité est restée globalement acceptable.

Concernant le comportement thermique, tous les déchets ont amélioré les propriétés d'isolation, cependant, la résistance à haute température a été très variable : le plastique et le liège ont montré un effondrement dû à leur décomposition, tandis que la perlite a permis une excellente rétention de résistance, surpassant le mélange de référence.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude a exploré le potentiel de valorisation de trois types de déchets légers le plastique, la perlite et le liège comme substituts partiels du sable dans la formulation de bétons géopolymères légers. L'objectif était d'évaluer l'impact de ces incorporations sur un spectre large de propriétés, incluant la maniabilité, la densité, l'absorption d'eau, la vitesse d'impulsion ultrasonique, les résistances mécanique (compression et flexion) à température ambiante et à haute température, ainsi que la conductivité thermique et la perte de masse. Les résultats ont mis en lumière des profils de performance distincts pour chaque type de déchet, soulignant les opportunités et les défis associés à leur utilisation.

L'incorporation de ces agrégats légers a systématiquement permis de réduire la densité du béton géopolymère, ouvrant ainsi la voie à la production de bétons légers, voire ultralégers avec le liège. Cette légèreté s'est souvent accompagnée d'une porosité accrue et d'une diminution de la vitesse d'impulsion ultrasonique, reflétant une moindre compacité de la matrice, sauf pour le plastique à faible dosage qui a montré des signes d'amélioration de ces propriétés. La maniabilité est restée globalement dans des plages acceptables pour la mise en œuvre, offrant une flexibilité dans le processus de fabrication.

Sur le plan des performances mécaniques à température ambiante, le plastique s'est distingué en améliorant de manière inattendue la résistance à la compression à faible dosage et la résistance à la flexion sur toute la plage étudiée. La perlite a amélioré la résistance à la flexion mais a réduit la résistance à la compression, tandis que le liège a eu un effet fortement délétère sur toutes les résistances mécaniques, le rendant inadapté aux applications structurelles.

Le comportement à haute température a révélé des différences cruciales. Si le plastique a conduit à une dégradation significative de la résistance et à une perte de masse importante due à sa décomposition, la perlite a démontré une résistance à la compression post-incendie remarquable, surpassant nettement le mélange de référence à des températures très élevées. Le liège, en revanche, a provoqué un effondrement complet de la résistance et une perte de masse massive, le rendant impropre aux applications exposées au feu. Parallèlement, tous les déchets ont conféré au béton des propriétés isolantes améliorées, avec une réduction notable de la conductivité thermique, le plastique s'imposant comme le meilleur isolant de cette étude.

Conclusion Générale

Cette recherche confirme le vaste potentiel des bétons géopolymères pour l'intégration de déchets. Chaque type de déchet offre des caractéristiques uniques :

- Les déchets plastiques peuvent servir à produire des bétons légers et isolants, avec un potentiel d'amélioration de la résistance mécanique à faible dosage, mais sont limités en présence de températures élevées.
- La perlite est une solution prometteuse pour les bétons légers, dotés de bonnes propriétés isolantes et d'une excellente tenue au feu, compensant une résistance compressive plus modeste.
- Le liège est idéal pour des applications non-structurelles où la légèreté extrême et l'isolation thermique sont primordiales, malgré une perte quasi-totale des propriétés mécaniques et une instabilité thermique.

Perspectives :

Cette étude contribue à l'avancement des connaissances sur la valorisation des déchets dans les matériaux de construction durables. Pour l'avenir, des recherches complémentaires pourraient porter sur l'optimisation des dosages pour un équilibre optimal des propriétés, l'étude à long terme de la durabilité, l'analyse microstructurale détaillée des interfaces agrégat-matrice, et l'évaluation du cycle de vie de ces nouveaux matériaux pour confirmer leur impact environnemental positif à grande échelle. Le développement de ces bétons géopolymères innovants représente une étape significative vers une industrie de la construction plus résiliente et respectueuse de l'environnement.

Le plastique (à faible dosage) a montré un potentiel inattendu d'augmentation de la résistance, mais un effet fortement négatif à des dosages plus élevés. Il est crucial de creuser ce point pour M1. La perlite réduit systématiquement la résistance, de manière proportionnelle à son incorporation, ce qui est cohérent avec sa nature poreuse et légère. Le liège est le matériau le moins adapté à la substitution d'agrégats pour la résistance à la compression, conduisant à un matériau quasiment sans résistance.

L'incorporation de déchets plastiques (M1 à M4) a entraîné une amélioration remarquable de la résistance à la flexion par rapport au mélange de référence. Contrairement à la résistance à la compression où l'augmentation n'était significative qu'à faible dosage (M1). La perlite a

Conclusion Générale

également amélioré la résistance à la flexion, mais à un degré moindre que le plastique et avec une légère tendance à la baisse pour les dosages élevés. Par contre le liège a majoritairement dégradé la résistance à la flexion.

Les résultats montrent que la formulation du béton géopolymère léger permet d'obtenir une large gamme de densités, adaptée à différents usages, depuis des structures porteuses allégées (M1-M8) jusqu'à des applications d'isolation (M9-M12). Le choix de la formulation dépendra de l'équilibre recherché entre la légèreté, la résistance mécanique et les performances isolantes du matériau.

L'absorption d'eau est un indicateur clé de la porosité et de la durabilité des bétons géopolymères légers. Les formulations les plus allégées (M8-M12) sont aussi les plus absorbantes, ce qui impose de bien choisir le type de granulat léger en fonction de l'usage visé et des contraintes d'exposition à l'eau. Le plastique peut potentiellement réduire l'absorption d'eau à faible dosage, améliorant la durabilité, mais des dosages plus élevés peuvent compromettre cette propriété. La perlite augmente l'absorption d'eau de manière prévisible en raison de sa nature poreuse, rendant ces bétons potentiellement moins durables dans certains environnements.

Le plastique tend généralement à réduire légèrement la maniabilité, En revanche, la perlite et le liège présentent des comportements plus fluctuants, restant globalement proches, voire parfois supérieurs, au niveau de référence M0 à certains dosages élevés.

Tous les déchets légers étudiés ont permis de réduire la conductivité thermique du béton géopolymère, le transformant en un matériau potentiellement plus isolant. Le plastique se distingue comme le meilleur isolant thermique de cette étude, offrant la réduction la plus significative de la conductivité. La perlite et le liège améliorent également les performances thermiques.

Les tests à haute température mettent en lumière des différences fondamentales entre les agrégats de déchets : les déchets plastiques peuvent initialement améliorer la résistance à basse température, mais sont très sensibles à la chaleur et s'effondrent à des températures modérées. La perlite se révèle être un excellent additif pour la résistance à la compression à des températures très élevées (600-800°C), surpassant significativement le mélange de référence. Le liège est quant à lui totalement inadapté à ces conditions, perdant toute résistance. Ces résultats sont

Conclusion Générale

cruciaux pour orienter le choix de ces matériaux en fonction des exigences de performance au feu.

L'analyse de la perte de masse confirme que la stabilité thermique des bétons géopolymères est fortement dépendante de la nature de l'agrégat léger incorporé. Le plastique entraîne des pertes de masse significatives dues à sa décomposition, tandis que la perlite montre une meilleure stabilité, mais avec des pertes supérieures à M0. Le liège est clairement le moins stable thermiquement, se consumant à haute température et conduisant à une perte d'intégrité structurelle complète. Ces résultats sont en parfaite corrélation avec les observations sur la résistance à la compression à haute température, soulignant l'importance du choix de l'agrégat pour les applications soumises au feu.

Références

Références

1. Davidovits, J., *Geopolymer chemistry and applications*2008: Geopolymer Institute.
2. Provis, J.L. and J.S.J. Van Deventer, *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*2009: Elsevier.
3. Chandra, S. and L. Berntsson, *Lightweight aggregate concrete*2002: Elsevier.
4. Lloyd, N. and V. Rangan, *Geopolymer concrete-sustainable cementless concrete*. Special Publication, 2009. **261**: p. 33-54.
5. Hardjito, D. and B.V. Rangan, *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. 2005.
6. Chithambaram, S.J., et al., *Effect of parameters on the compressive strength of fly ash based geopolymer concrete*. Structural Concrete, 2018. **19**(4): p. 1202-1209.
7. B. Jindal, *Geopolymer Concrete – A review*,. April 2015.
8. Al Bakri, M.M., et al., *Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement*. Journal of engineering and technology research, 2011. **3**(1): p. 1-4.
9. Kulkarni, S., *Study on geopolymer concrete*. International Research Journal of Engineering and Technology, 2018. **5**(12): p. 1.
10. Jeyasehar, C.A., M. Salahuddin, and S. Thirugnanasambandam, *Development of fly ash based geopolymer concrete precast elements*. Ministry of Environment and Forests of India and Annamalai University, 2013: p. 1-77.
11. Vora, P.R. and U.V. Dave, *Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete*. Procedia Engineering, 2013. **51**: p. 210-219.
12. Kupwade-Patil, K. and E. Allouche, *Effect of alkali silica reaction (ASR) in geopolymer concrete*. 2011.
13. Bondar(a) D., C.J.L.b., N. B. Milestone(c), N. Hassani(d), and A. A. Ramezaniapour -*Engineering Properties of Alkali Activated Natural Pozzolan Concrete – Second International Conference, University of Wisconsin*, . June2010.
14. Brett Tempest, O.S., Janos Gergely, Vincent Ogunro, David Wegge, *Optimization of FlyAsh based Geopolymer Concrete by measurement of Free Hydroxyl Ions-World Coal Ash Conference(May4-7, 2009)Lexington, Kentucky, USA*. . 2009.
15. Mehta, A. and R. Siddique, *Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash*. Construction and building materials, 2017. **150**: p. 792-807.
16. Sathonsaowaphak, A., P. Chindapasirt, and K. Pimraksa, *Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar*. Journal of hazardous materials, 2009. **168**(1): p. 44-50.
17. Karakoç, M.B., et al., *Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar*. Construction and building materials, 2014. **72**: p. 283-292.
18. Elyamany, H.E., M. Abd Elmoaty, and A.M. Elshaboury, *Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders*. Construction and building materials, 2018. **187**: p. 974-983.
19. Matalkah, F., et al., *Drying shrinkage of alkali activated binders cured at room temperature*. Construction and building materials, 2019. **201**: p. 563-570.
20. Aldred, J. and J. Day. *Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete*. in *Proceedings of the 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore*. 2012.
21. Singh, B., et al., *Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete*. Construction and building materials, 2016. **118**: p. 171-179.

22. Shekhovtsova, J., E. Kearsley, and M. Kovtun, *Effect of activator dosage, water-to-binder-solids ratio, temperature and duration of elevated temperature curing on the compressive strength of alkali-activated fly ash cement pastes*. Journal of the South African Institution of Civil Engineering= Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese, 2014. **56**(3): p. 44-52.
23. Chang, H.-L. and W.-H. Shih, *Synthesis of zeolites A and X from fly ashes and their ion-exchange behavior with cobalt ions*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000. **39**(11): p. 4185-4191.
24. Ye, N., et al., *Synthesis and strength optimization of one-part geopolymer based on red mud*. Construction and building materials, 2016. **111**: p. 317-325.
25. Boonserm, K., et al., *Improved geopolymerization of bottom ash by incorporating fly ash and using waste gypsum as additive*. Cement and Concrete Composites, 2012. **34**(7): p. 819-824.
26. Nematollahi, B. and J. Sanjayan, *Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer*. Materials & Design, 2014. **57**: p. 667-672.
27. Puertas, F., et al., *Effect of superplasticisers on the behaviour and properties of alkaline cements*. Advances in cement research, 2003. **15**(1): p. 23-28.
28. Chu, H.-y., et al., *Mechanical and physicochemical properties of ferro-siliceous concrete subjected to elevated temperatures*. Construction and building materials, 2016. **122**: p. 743-752.
29. Görhan, G. and G. Kürklü, *The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures*. Composites Part B: Engineering, 2014. **58**: p. 371-377.
30. Kong, D.L. and J.G. Sanjayan, *Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete*. Cement and concrete research, 2010. **40**(2): p. 334-339.
31. Memon, F.A., et al., *Effect of superplasticizer and extra water on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012. **4**(5): p. 407-414.
32. Temuujin, J., et al., *Characterisation of class F fly ash geopolymer pastes immersed in acid and alkaline solutions*. Cement and Concrete Composites, 2011. **33**(10): p. 1086-1091.
33. Brake, N.A., H. Allahdadi, and F. Adam, *Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete*. Construction and building materials, 2016. **113**: p. 536-543.
34. Nuaklong, P., V. Sata, and P. Chindaprasirt, *Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties*. Journal of cleaner production, 2016. **112**: p. 2300-2307.
35. Shi, X.S., et al., *Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate*. Advanced Materials Research, 2012. **450**: p. 1577-1583.
36. Talakokula, V. and S. Bhalla, *Non-destructive strength evaluation of fly ash based geopolymer concrete using piezo sensors*. Procedia Engineering, 2016. **145**: p. 1029-1035.
37. Nath, P. and P.K. Sarker, *Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature*. Cement and Concrete Composites, 2015. **55**: p. 205-214.
38. Soutsos, M., et al., *Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers*. Construction and building materials, 2016. **110**: p. 355-368.
39. Farooq, F., et al., *A comparative study on performance evaluation of hybrid GNPs/CNTs in conventional and self-compacting mortar*. Alexandria Engineering Journal, 2020. **59**(1): p. 369-379.
40. Tran, V.H., D.T. Nguyen, and V.D. Dao, *Experimental study on section curvature and ductility of reinforced geopolymer concrete beams*. Science Journal of Transportation, 2017(8): p. 3-11.
41. Neville, A., *Propriétés des bétons» Editions Eyrolles, 2000, Paris.*

Références

42. Al-Mohamadawi, A., *Contribution à l'étude de l'impact de l'environnement vis-à-vis d'éco-matériaux lignocellulosiques*, 2016, Université de Picardie Jules Verne.
43. Contant, M., *Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux*. Projet d'application présenté à l'Ecole de Technologie Supérieure, 2001.
44. Zhu, C., et al., *Effect of aggregate saturation degree on the freeze–thaw resistance of high performance polypropylene fiber lightweight aggregate concrete*. *Construction and building materials*, 2017. **145**: p. 367-375.
45. Virlogeux, M., *Généralités sur les caractères des bétons légers*, M. Arnould and M. Virlogeux, editors, *Granulats et bétons légers*, 1986: p. 111-246.
46. Kabay, N. and F. Aköz, *Effect of prewetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate*. *Cement and Concrete Composites*, 2012. **34**(4): p. 503-507.
47. R., G., *Durabilité et réparation du béton*. *Cours Maîtrise de Génie civile Sherbrooke, Université de Sherbrooke, Canada*, 34 pp. 2004.
48. Gagne, R., *Durabilité et réparation du béton*. *Cours maîtrise de génie civil, université de Sherbrooke, Canada*, 2004.
49. BENZINA, A. and N. HACHEM, *ETUDE DE L'INFLUENCE DES GRANULATS POUZZOLANIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUE DES BETONS LEGERS*. 2018.
50. Shink, M., *Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers*, 2003, Université Laval.
51. Mohellebi, S., *Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites*, 2015, Université Mouloud Mammeri.
52. Calais, T., *Propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger*, 2013, Québec.
53. Shi, F., S. Cheng, and L. Li, *Mesoscale Modeling for Predicting Effective Properties and Damage Behavior of Geopolymer Concrete*. *Materials*, 2024. **18**(1): p. 88.
54. Hilal, A.A., A.S. Nader, and B.M. Kurji, *Producing Sustainable Lightweight Geopolymer Concrete Using Waste Materials*. *Civil and Environmental Engineering*, 2024. **20**(2): p. 1120-1128.