



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الابراهيمى 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 :

Développement d'un nouveau matériau écologique géopolymère léger à faible impact environnemental pour des applications dans le domaine de la construction

Présenté par :

- Rayane BOUKHETALA
- Chahrazed MAADADI

Soutenu le : _20_/_06_/_2024

	Nom & Prénom	Affiliation/Institution
Encadrant :	Dr. Ahmed Abderraouf BELKADI	Université B.B.A
Co-encadrant :	Amirouche BERKOUCHE	Université B.B.A

Année Universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, **maman** que j'adore.*

*A l'homme de ma vie, mon soutien moral, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi **mon père**.*

*À mes **frères** et **sœurs** qui m'ont supporté, et ont toujours répondu présent pour moi.*

*Au nom de l'amitié qui nous réunit, et au nom de nos souvenirs. À ma chère amie avant d'être binôme **RAYANE***

Vous avez partagé avec moi les meilleurs moments de ma vie, aux moments les plus difficiles de ma vie, vous étiez toujours à mes côtés, je vous remercie de ne m'avoir jamais déçu. Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude, mon amour et mon respect. Je remercie mon dieu qui a croisé nos chemins

Mes amis

*Impossible de citer tous les noms sur papier, il n'y a de la place que dans le cœur.
Merci beaucoup.*

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, le tout puissant et miséricordieux, de nous avoir donné la force pour continuer, ainsi que le courage pour dépasser toutes les difficultés.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Monsieur BELKADI Ahmed Abderraouf**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire*

*Nos remerciements les plus sincères s'adressent à **Monsieur BERKOUCHE Amirouche**, pour son soutien moral ainsi que pour ses judicieux conseils et sa participation pour la réalisation de ce travail.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et l'enrichir par leurs propositions.

Résumé

Le présent mémoire se concentre sur l'étude des propriétés du béton mousse géopolymère renforcé de fibres de lin (FL) et de sable concassé (SC). L'objectif principal était d'évaluer l'impact des variations de contenu en SC et en FL sur les propriétés mécaniques, thermiques et structurales du matériau. Dans ce travail, nous avons utilisé des méthodes expérimentales et statistiques pour caractériser les matériaux et optimiser leurs formulations. Les différentes propriétés examinées comprenaient la masse volumique, la porosité, la résistance à la compression et la conductivité thermique.

Les résultats ont montré que l'augmentation de la teneur en SC était corrélée à une augmentation de la masse volumique et de la résistance à la compression du matériau, mais également à une diminution de la porosité. Cependant, une densification excessive a conduit à une augmentation de la conductivité thermique, soulignant l'importance d'un équilibre délicat entre les propriétés mécaniques et thermiques. Par ailleurs, l'incorporation de fibres de lin a présenté des effets complexes sur les performances du matériau, avec un renforcement observé à des niveaux de contenu plus faibles mais une diminution à des niveaux plus élevés.

En utilisant des plans expérimentaux composites centrés (CCD) et des modèles mathématiques, nous avons pu optimiser les formulations pour atteindre des performances équilibrées en termes de densité, de résistance à la compression et de conductivité thermique. Ces résultats constituent une avancée significative vers le développement de matériaux de construction durables et performants pour diverses applications dans le domaine de la construction et du génie civil.

ملخص

تتمركز هذه الأطروحة على دراسة خصائص الخرسانة الجيوبوليمرية المتخثرة المدعمة بألياف الكتان (FL) والرمل المسحوق (SC). كان الهدف الرئيسي هو تقييم تأثير التغيرات في محتوى SC و FL على الخصائص الميكانيكية والحرارية والهيكلية للمواد. تم استخدام الأساليب التجريبية والإحصائية لتوصيف المواد وتحسين صياغاتها. تضمنت الخصائص التي تم فحصها الكثافة والمسامية وقوة الضغط والتوصيل الحراري.

أظهرت النتائج أن زيادة محتوى SC كانت مترابطة بزيادة كثافة المواد وقوة الضغط، مع تقليل المسامية. ومع ذلك، أدت التكتيف المفرط إلى زيادة التوصيل الحراري، مما يبرز أهمية التوازن الدقيق بين الخصائص الميكانيكية والحرارية. علاوة على ذلك، أظهرت إضافة ألياف الكتان تأثيرات معقدة على أداء المواد، مع ملاحظة تقوية عند مستويات محتوى أقل، ولكن تقليل عند مستويات أعلى.

من خلال استخدام تصميم المركبات المركزة (CCD) والنماذج الرياضية، تمكنا من تحسين الصياغات لتحقيق أداء متوازن من حيث الكثافة وقوة الضغط والتوصيل الحراري. تمثل هذه النتائج تقدماً كبيراً نحو تطوير مواد البناء المتينة وعالية الأداء لمختلف التطبيقات في مجال البناء والهندسة المدنية.

Abstract

This research focuses on studying the properties of foamed geopolymer concrete reinforced with flax fibers (FL) and crushed sand (SC). The main objective was to assess the impact of variations in SC and FL content on the mechanical, thermal, and structural properties of the material. Experimental and statistical methods were employed to characterize the materials and optimize their formulations. The properties examined included density, porosity, compressive strength, and thermal conductivity.

The results demonstrated that increasing SC content was correlated with higher material density and compressive strength, along with reduced porosity. However, excessive densification led to increased thermal conductivity, highlighting the importance of a delicate balance between mechanical and thermal properties. Additionally, the incorporation of flax fibers exhibited complex effects on material performance, with reinforcement observed at lower content levels but a reduction at higher levels.

Using centered composite design (CCD) experiments and mathematical models, we optimized formulations to achieve balanced performance in terms of density, compressive strength, and thermal conductivity. These findings represent a significant advancement towards developing durable and high-performance construction materials for various applications in the construction and civil engineering field.

Liste des figures

Figure 1 Monde entier : Consommation d'énergie (millions de tonnes équivalent pétrole) et émissions de CO ₂ [9].....	21
Figure 2 Résumé montrant le nombre de publications ces dernières années sur les géopolymères (à gauche) et les géopolymères expansés (à droite) (basé sur une revue récente [29]	22
Figure 3 Réponses des répondants concernant les obstacles à la mise en œuvre des géopolymères [31].	23
Figure 4 Classification des matériaux d'isolation des bâtiments.....	28
Figure 5 Bâtiment de l'Institut du changement global et aéroport de Brisbane [54].....	31
Figure 6 Types de fibres végétales	34
Figure 7 Forme d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice.....	36
Figure 8 Le processus général de traitement de surface des fibres végétales	36
Figure 9 Courbes granulométriques des précurseurs.....	41
Figure 10 Préparation de la solution NaOH.....	43
Figure 11 Silicates de sodium.....	44
Figure 12 Courbe granulométrique de la poudre d'aluminium	45
Figure 13 Morphologies des sables utilisés	45
Figure 14 Granulométries des sables utilisés.....	46
Figure 15 Fibres de lin.....	46
Figure 16 Traitement alcalin des fibres de lin	47
Figure 17 Schéma méthodologique pour l'optimisation des géopolymères cellulaires à l'aide de l'approche de conception plans composites centrés	49
Figure 18 Remplissage des moules.....	50
Figure 19 Les échantillons démoulés	51
Figure 20 Dispositif de la technique de corrélation d'image numérique.....	52

Liste des tableaux

Tableau 1 Composition chimique des précurseurs	40
Tableau 2 Propriétés physiques des précurseurs	41
Tableau 3 Composition chimique de la soude caustique	41
Tableau 4 Caractéristiques des silicates de sodium utilisées	44
Tableau 5 Propriétés physiques des sables utilisés	46
Tableau 6 Essais réalisés à l'aide de l'approche PCC	48
Tableau 7 Compositions des mélanges confectionnés.....	49

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	14
CHAPITRE I	16
<i>1.1 Introduction</i>	17
<i>1.2 Contexte de l'isolation dans le secteur du bâtiment</i>	17
1.2.1. Contexte mondial	17
1.2.2. Tendances et enjeux	18
<i>1.3. Importance de l'isolation pour l'efficacité énergétique</i>	19
1.3.1. Rôle crucial	19
1.3.2. Impacts environnementaux	21
<i>1.4. Objectifs spécifiques de la recherche</i>	22
1.4.1. Développement de géopolymères cellulaires fibrés	22
1.4.2. Approche éco-responsable	24
<i>1.5. Conclusion</i>	25
CHAPITRE II	26
<i>2.1. Introduction</i>	27
<i>2.2. Limitations des matériaux d'isolation traditionnels</i>	27
2.2.1. Analyse critique	27
<i>2.3. Géopolymères cellulaires : Propriétés et applications</i>	29
2.3.1. Propriétés distinctives	29
2.3.1.1. Résistance mécanique	29
2.3.1.2. Résistance thermique	30
2.3.1.3. Densité	30
2.3.1.4. Porosité	30
<i>2.4. Applications potentielles</i>	30
<i>2.5. Utilisation de agents moussants et des fibres végétales dans la géopolymérisation</i>	32
2.5.1.. Les agents moussants	32
2.5.2.. Fibres végétales	33
<i>2.6. Les sables dans la géopolymérisation</i>	37
2.6.1.. Classification des sables en fonction de leur origine	37
2.6.2.. Les différents types de sables	37
<i>2.7. Conclusion</i>	38

CHAPITRE III	39
3.1. Introduction	40
3.2. Matériaux et caractérisation	40
3.2.1. Précurseurs	40
3.2.2. Activateurs	41
3.2.2.1. Soude caustique	41
3.2.2.2. Silicates de sodium	43
3.2.3. Agent moussant	44
3.2.4. Sables	45
3.2.5. Fibres de lin	46
3.3. Méthodologie	47
3.3.1. Les plans composites centrés	47
3.3.2. Préparation des mélanges	49
3.3.3. Essais expérimentaux	51
3.4. Conclusion	52
CHAPITRE IV	53
Résultats et discussions	53
4.1 Introduction	54
4.2. Facteur de moussage	54
4.3. Analyse statistique des modèles	55
4.3.1. Résumés d'ajustement	55
4.3.2. Analyse des variances	56
4.3.3. Modèles mathématiques	58
4.4. Validation et discussions	59
4.4.1. Masse volumique et porosité	59
4.4.2. Conductivité thermique	61
4.4.3. Résistance à la compression	63
4.5. Optimisation	65
4.6. Conclusion	68
Conclusion générale	69
Références bibliographiques	73

Liste des abréviations

Al : Poudre d'aluminium

BEMS : Les systèmes de gestion de l'énergie des bâtiments

CVC : Système de chauffage, de ventilation et de climatisation

FL : Fibres de lin

FRs : Fines des bétons recyclés

FV : Fibre végétale

PCC : Plan Composite Centrée

ITE : Isolation thermique par l'extérieur

LHF : Laitier de haut fourneau

PV : Poudre de verre

SC : Sable concassé

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'industrie de la construction est confrontée à des défis sans précédent en matière de durabilité, de performance et d'efficacité énergétique. Dans ce contexte, l'utilisation de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies devient essentielle pour répondre aux exigences croissantes en matière de construction écologique et durable. Ce mémoire se concentre sur l'étude et le développement de bétons légers renforcés par des fibres naturelles, en particulier le mortier géopolymère cellulaire incorporant des fibres de lin (FL) et du sable concassé (SC).

- **Contexte et Problématique**

La construction traditionnelle à base de ciment Portland est souvent associée à une empreinte carbone élevée et à des performances mécaniques limitées, notamment en termes de résistance à la compression et d'isolation thermique. Les matériaux de construction modernes doivent concilier ces aspects pour répondre aux normes de durabilité actuelles. Dans cette optique, les bétons légers à base de géopolymères offrent des solutions prometteuses grâce à leur faible densité, leur haute résistance et leur faible impact environnemental.

L'intégration de fibres naturelles comme le lin dans les bétons légers présente plusieurs avantages. Ces fibres renforcent la structure du matériau, améliorant sa résistance mécanique et sa ductilité tout en réduisant le poids spécifique. De plus, l'utilisation de sable concassé (SC) comme alternative durable au sable naturel (sable de dune) contribue à préserver les ressources naturelles et à réduire l'empreinte écologique de la construction.

- **Objectifs de l'Étude**

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et d'optimiser les propriétés mécaniques, thermiques et structurales des bétons légers à base de géopolymères renforcés par des fibres de lin et de sable concassé. Plus spécifiquement, les objectifs sont les suivants :

1. Analyser l'impact du contenu en fibres de lin sur la résistance à la compression et la ductilité du géopolymère cellulaire.
2. Étudier l'influence du sable concassé sur la densité, la porosité et la conductivité thermique du matériau.

3. Optimiser la formulation du géopolymère cellulaire en fonction des propriétés recherchées, notamment la résistance mécanique et l'isolation thermique.

- **Méthodologie**

Cette étude repose sur une méthodologie expérimentale combinant des tests de laboratoire et des analyses approfondies. Des échantillons de géopolymère cellulaire seront préparés en variant les proportions de fibres de lin et de sable concassé. Les propriétés mécaniques seront évaluées à l'aide de tests de compression, tandis que les propriétés thermiques seront mesurées à l'aide de tests de conductivité thermique.

- **Contributions Attendues**

Les résultats de cette étude permettront de mieux comprendre les interactions entre les différents composants du géopolymère cellulaire renforcé par des fibres naturelles. En identifiant les meilleures formulations pour optimiser les propriétés mécaniques et thermiques, cette recherche contribuera à l'avancement des matériaux de construction durables et écologiques.

- **Plan du Mémoire**

Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres, chacun se concentrant sur un aspect spécifique de l'étude. Les deux chapitres suivants présentent une revue de la littérature sur les matériaux de construction écologiques et les bétons légers. Ensuite, les chapitres suivants détailleront la méthodologie expérimentale, les résultats obtenus, l'analyse statistique des données, et enfin les conclusions et recommandations.

En résumé, ce mémoire vise à explorer les possibilités offertes par les bétons légers à base de géopolymères renforcés par des fibres naturelles, en mettant en lumière leur potentiel pour répondre aux défis de performance auxquels est confrontée l'industrie de la construction.

CHAPITRE I
Introduction à la géopolymérisation pour l'isolation

1.1 Introduction

La recherche sur la géopolymérisation pour l'isolation est en constante évolution. L'optimisation des formulations et des techniques de production permettra de réduire les coûts et d'améliorer encore les performances des géopolymères. Ces matériaux innovants ont le potentiel de devenir une solution clé pour une isolation durable et performante des bâtiments, contribuant ainsi à un avenir plus respectueux de l'environnement. Ce chapitre se propose d'explorer en profondeur le potentiel des géopolymères pour l'isolation. Nous nous pencherons sur les principes fondamentaux de la chimie des géopolymères, analyserons leurs propriétés isolantes clés et les techniques de fabrication courantes. De plus, nous examinerons les applications prometteuses des géopolymères dans l'isolation des bâtiments et discuterons des défis et des perspectives de recherche en la matière.

1.2 Contexte de l'isolation dans le secteur du bâtiment

1.2.1. Contexte mondial

L'importance croissante de l'efficacité énergétique dans le domaine du bâtiment à l'échelle mondiale est un sujet clé dans le contexte actuel, Cette augmentation de la consommation d'énergie se justifie par l'augmentation de la population mondiale mais aussi par le fait que davantage de personnes ont accès à l'énergie (électricité, gaz etc.).

Au cours de la dernière décennie, il y a eu un intérêt accru de la part des propriétaires, des gestionnaires d'immeubles et des occupants pour l'établissement de stratégies économes en énergie visant à réduire la consommation et le coût global de l'énergie Cette tendance s'explique par les progrès technologiques dans le secteur du bâtiment, qui ont conduit à une sophistication accrue des solutions de contrôle et de surveillance dédiées. Les systèmes de gestion de l'énergie des bâtiments (BEMS) jouent un rôle crucial dans cette évolution, en permettant une gestion efficace de la production et de la consommation d'énergie. L'intégration de sources d'énergie renouvelables sur site a également contribué à la complexité croissante de la gestion énergétique des bâtiments, incitant à une approche plus proactive et durable en matière d'énergie [1].

Cette prise de conscience mondiale de l'importance de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment est essentielle pour répondre aux défis environnementaux et économiques actuels. Les BEMS offrent des solutions technologiques avancées pour optimiser la performance énergétique des bâtiments, réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la durabilité des infrastructures [1].

L'efficacité énergétique des bâtiments passe par une bonne conception architecturale, un traitement adapté de l'enveloppe et du renouvellement d'air, mais aussi par une bonne gestion du bâtiment (ouverture - fermeture des stores, température de consigne adaptée [2]).

La rationalisation des fonds énergétiques peut concerner effectuée avec divergentes stratégies, consacrées de menstres bonne à des conceptions algorithmiques sophistiquées. Les normaux de l'arrangement des actifs énergétiques pourraient comme onduler. Par modèle, l'neutre, le mieux, galopant du dirigisme des argents énergétiques est de réduire l'allègre calorique de la construction dosé par des tarifs énergétiques dynamiques [3]. Un BEMS représente le contenant planétaire qui peut à dépendre éployer au niveau du bâtiment chez conserver et contrôler les besoins énergétiques d'une construction [4]. L'alpha traité d'un gratte-ciel dépend de l'activité des occupants du maison, des caractéristiques physiques de l'immeuble, des modalités climatiques et varie dans lequel le règne. Généralement, l'expérience de vie et les préférences des occupants influencent la saison d'activité et le verglas calorique des appareils et équipements de l'immeuble. Par règle, la contraint d'régularité d'une méthode CVC dépend en longue antienne du comportement de vie de l'occupant et des exigences de niveau thermique cultivant, des caractéristiques thermiques et optiques de l'trousse du gratte-ciel et des atout climatiques (P. Ex. Instant de l'air hébergement et halo solaire). Il est cavalant que le pressentiment de la marchandise électrique d'un immeuble s'appuie sur des analyses des particularité historiques de nolis électrique de la maison, et ceci est souvent intégral à l'pique de méthodes basées sur l'autocritique probabiliste [5] [6].

1.2.2. Tendances et enjeux

Un bâtiment est conçu pour protéger les usagers des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie. Les bâtiments sont responsables d'environ 40 % de la consommation mondiale d'énergie [7] [8]. Le secteur du bâtiment réputé grand consommateur d'énergie (presque la moitié de la consommation globale). La réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des bâtisseurs qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale. L'atteinte de ces objectifs conduit {l'apparition de solutions passives, qui ont été développées en augmentant fortement l'isolation des différentes composantes de l'enveloppe pour empêcher le maximum les déperditions de chaleur vers l'extérieur. Ceci explique l'évolution des techniques de construction et le développement de nouveaux matériaux servant l'isolation thermique et qui peuvent réduire le coût de la construction, d'une part et baisser la facture énergétique, d'autre

part. L'isolation thermique par l'extérieur (ITE) est le meilleur procédé d'isolation pour répondre une diminution performante des besoins d'énergie d'un logement [9].

La mise en œuvre de stratégies d'efficacité énergétique implique de réduire la consommation énergétique et les coûts tout en garantissant le confort des occupants [11]. La consommation d'énergie dans le lieu de la construction est présente à chacune des étapes de développement d'un bâtiment, c'est-à-dire l'énergie dépensée pour l'extraction et la production des matières premières, la construction du bâtiment et les coûts d'entretien des bâtiments pendant leur durée de vie. Ainsi, il existe déjà la notion de précarité énergétique, qui est liée au fait que les familles n'ont pas de conditions ou dépensent plus de 10 % de leur budget mensuel pour assurer des conditions de confort à l'intérieur de leurs bâtiments [13].

1.3. Importance de l'isolation pour l'efficacité énergétique

1.3.1. Rôle crucial

L'isolation de l'enveloppe du bâtiment est importante pour l'efficacité énergétique et le confort de l'environnement, car l'extérieur représente 50 à 60 % de la production totale de chaleur [1]. Des matériaux d'isolation sont utilisés dans les bâtiments pour réduire le transfert de chaleur et la demande de chauffage/refroidissement et améliorer le confort thermique intérieur. Les matériaux d'isolation pourraient également atténuer les bruits indésirables et minimiser les risques d'incendie s'ils sont sélectionnés de manière appropriée [2]. De plus, l'énergie grise des matériaux isolants est également un facteur critique. Dans les bâtiments isolés, si la réduction de l'énergie de fonctionnement est supérieure à l'énergie utilisée pour fabriquer les matériaux isolants, elle se traduit par un bilan énergétique net positif et diminue les émissions de gaz à effet de serre [3]. À mesure que l'énergie devient de plus en plus précieuse, l'utilisation de matériaux d'isolation thermique est de plus en plus imposée dans les bâtiments. L'isolation thermique est un matériau ou une combinaison de matériaux qui retardent le taux de flux de chaleur par conduction, convection et rayonnement lorsqu'il est correctement appliqué [4].

L'utilisation de produits d'isolation thermique contribue à réduire la dépendance aux systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) pour faire fonctionner les bâtiments confortablement. Cela permet d'économiser de l'énergie et de réduire l'utilisation des ressources naturelles. Ses avantages sont les bénéfices, l'allongement des périodes de confort thermique intérieur, la réduction du niveau sonore et la protection incendie [5].

L'isolation thermique un rôle majeur en limitant les transferts de chaleur entre Deux environnements de températures différentes et en réduisant la consommation D'énergie. En effet, l'efficacité énergétique des bâtiments et l'isolation thermique des enveloppes des bâtiments constituent un domaine de recherche très importante qui a connu un développement considérable développements ces dernières années [6].

Une utilisation appropriée de l'isolation thermique dans les bâtiments contribue non seulement à limiter la taille requise du système de construction, mais contribue également à rationner l'apport annuel en nutriments. De plus, cela permet d'allonger les périodes de sécurité thermique sans affecter la structure dynamique, notamment en hors saison. Le maintien de l'économie d'une continuité continue pour faire face à l'exil thermique varie selon l'échelle du gratte-ciel, et les conditions climatiques de l'avidité du bâtiment sont déterminées par l'immatérialité de l'équipement d'isolation utilisé [5].

Les éléments qui reçoivent et transmettent la chaleur ou le froid dans le bâtiment sont les murs et l'abri et dépendent de l'équipement utilisé ou de l'isolation. De plus, les surfaces semblent être exposées à la lumière du soleil et la persistance thermique peut être résolue ou réfléchié par un rayonnement thermique à ondes longues [7]. En été, l'enseulement est à son maximum et il y a un flux thermique négatif vers la surface. En hiver, le transfert de chaleur vers la surface est généralement positif et important [8]. La construction de maisons et de bureaux en Algérie ne prend pas en compte l'isolation thermique de l'enveloppe comme solution pour réduire la consommation excessive d'énergie (électricité/gaz) utilisée pour assurer un certain confort thermique au sein de ces institutions. Les déperditions d'énergie proviennent principalement de la chaleur qui traverse l'enveloppe du bâtiment (énergie consommée pour le chauffage/climatisation). Les déperditions d'énergie se produisent à plusieurs endroits du bâtiment : mur, plafond, sol, fenêtre, etc [9].

Le graphique ci-dessous représente l'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire répartie entre les différentes énergies, et en superposition la courbe des émissions énergétiques de CO₂, avec une échelle adaptée. Les unités sont le million de tonne équivalent pétrole (Mtep) et le million de tonnes (Mt) de CO₂

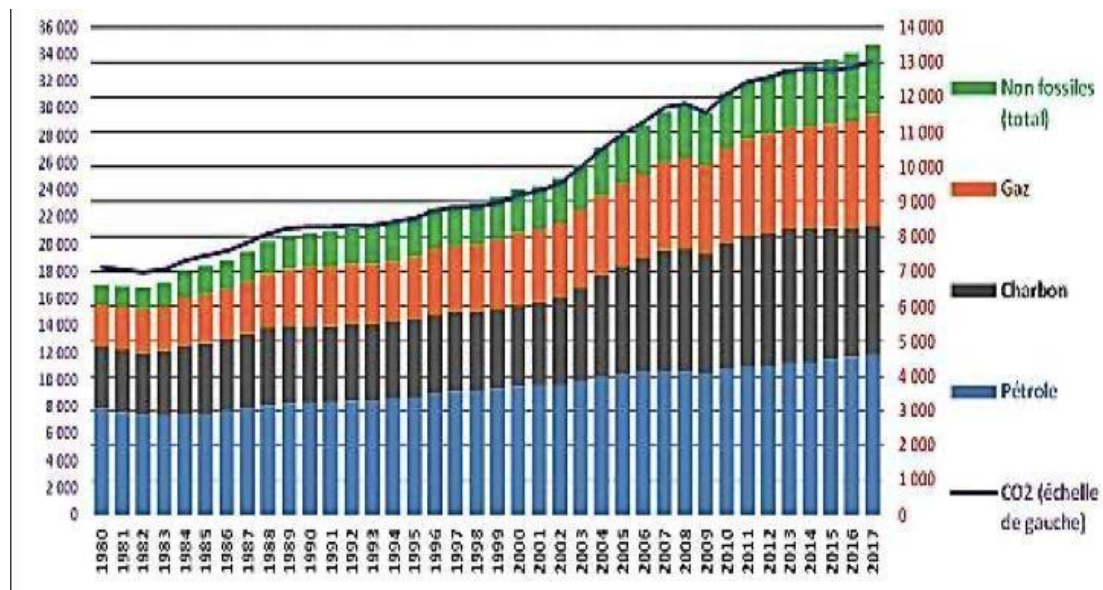


Figure 1 Monde entier : Consommation d'énergie (millions de tonnes équivalent pétrole) et émissions de CO₂ [9].

1.3.2. Impacts environnementaux

L'isolation est une propriété des matériaux de construction qui doit limiter considérablement les déperditions thermiques. Son objectif est de protéger le bâtiment et ses occupants des changements de température, des conditions atmosphériques et de l'humidité. L'isolation permet de réduire les déperditions à travers les murs. Cela permet également de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. L'isolation est donc intéressante en termes de protection de l'environnement, de confort et d'économie [6].

L'isolation des bâtiments est un facteur clé dans la réduction de l'impact environnemental du secteur du bâtiment en réduisant les besoins énergétiques pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Alors que le besoin de durabilité ne cesse de croître, le choix des matériaux d'isolation devient encore plus important [10]. L'amélioration de l'isolation des bâtiments constitue donc un moyen important de réduire l'impact environnemental du secteur de la construction et de faciliter la transition vers des bâtiments plus durables et plus respectueux de l'environnement [11].

Les effets associés aux pertes de chaleur doivent être pris en compte lors de la conception et de la construction. Ceci est dû à une augmentation de l'inconfort thermique et acoustique provoqué par un flux d'air consommant trop d'énergie pour chauffer ou refroidir l'intérieur. La pollution de l'air intérieur est causée par l'isolation, la moisissure ou la poussière, notamment avec une ventilation simple flux. Le vieillissement des bâtiments est causé par la condensation [12].

1.4. Objectifs spécifiques de la recherche

1.4.1. Développement de géopolymères cellulaires fibrés

Les matériaux géopolymères, traditionnellement produits à partir de déchets, et à eux applications suscitent un intérêt progressif ces dernières années. Les possibilités d'usage des géopolymères semblent illimitées et ils sont utilisés dans lequel couvrent tous les domaines technologiques [13]. La production de déchets solides est un point de départ courant pour estimer les émissions provenant de l'élimination des déchets solides, de l'incinération et de la combustion des déchets à l'air libre [14]. Les géopolymères ont été utilisés dans différentes applications, la plupart étant destinées à la construction et aux matériaux cimentaires [15]. Les matériaux géopolymères présentent un avantage majeur car ils peuvent être fabriqués à partir de déchets provenant de divers processus industriels. Cependant, cela restreint également l'utilisation étendue de ces matériaux, car il est compliqué d'organiser le processus de production à grande échelle en raison de la variabilité des matières premières. Les résultats de recherche obtenus dans différents laboratoires à travers le monde ne sont en réalité utiles que pour un certain type de déchets et ne peuvent être étendus que si un système technologique approprié est appliqué [13].

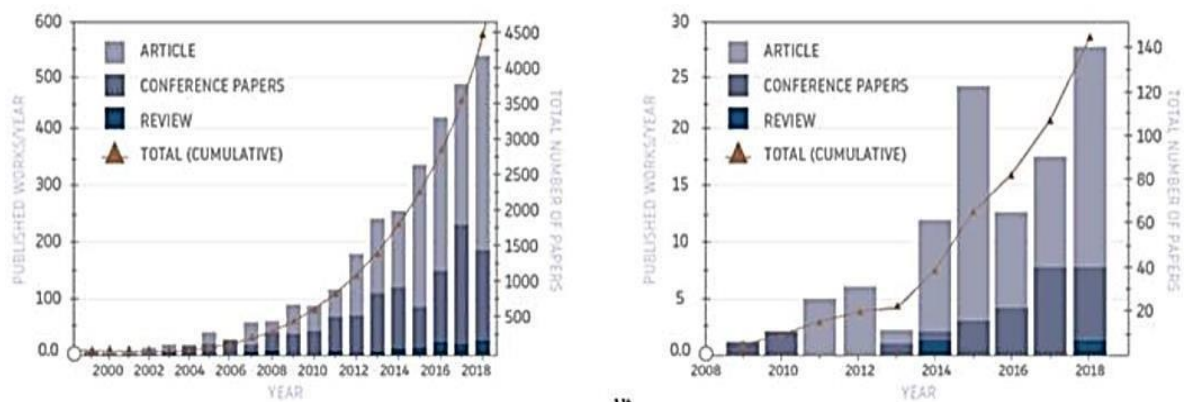


Figure 2 Résumé montrant le nombre de publications ces dernières années sur les géopolymères (à gauche) et les géopolymères expansés (à droite) (basé sur une revue récente [29]).

Les mesures visant à augmenter les chances de mise en œuvre à grande échelle des technologies géopolymères dépendent de l'emplacement et des conditions locales. Ce qui est certain, c'est que les conditions adéquates doivent être créées partout dans le monde pour les entreprises intéressées par la mise en œuvre de La technologie des géopolymères est révolutionnaire. Il existe de nombreuses motivations pour mettre en œuvre cette technologie à grande échelle et utiliser des géopolymères comme mousse isolante. Un article basé sur une enquête [16] a montré

que la principale motivation pour trouver des liens alternatifs tels que les géopolymères est que la production de ciment Portland consomme beaucoup d'énergie et affecte notre environnement. Les répondants à l'enquête ont déclaré que le ciment géopolymère est plus respectueux de l'environnement que le ciment Portland et offre de bonnes performances. Ils affirment également que les géopolymères pourraient être considérés comme une alternative viable à d'autres adhésifs, mais qu'ils sont coûteux. Cependant, l'étude a révélé que la plupart des personnes interrogées manquaient de connaissances sur les géopolymères et qu'il fallait embaucher des experts et organiser des formations et des ateliers pour accroître la sensibilisation à ces matériaux. Une revue de la littérature et une enquête industrielle [16] indiquent des problèmes qui doivent être résolus pour des applications généralisées des géopolymères. Les auteurs de l'article estiment qu'il est important d'élaborer des spécifications standard et de nouvelles normes pour le béton géopolymère afin d'intégrer les exigences de performance, de garantir l'utilisation des codes nationaux et locaux et de « mener des tests plus indépendants des performances techniques et de la durabilité à long terme ». /résistance. À court terme, les géopolymères seront probablement plus largement utilisés dans les applications préfabriquées et non structurelles et dans les chaussées, ainsi que dans les matériaux résistants au feu et aux produits chimiques, ont-ils déclaré.

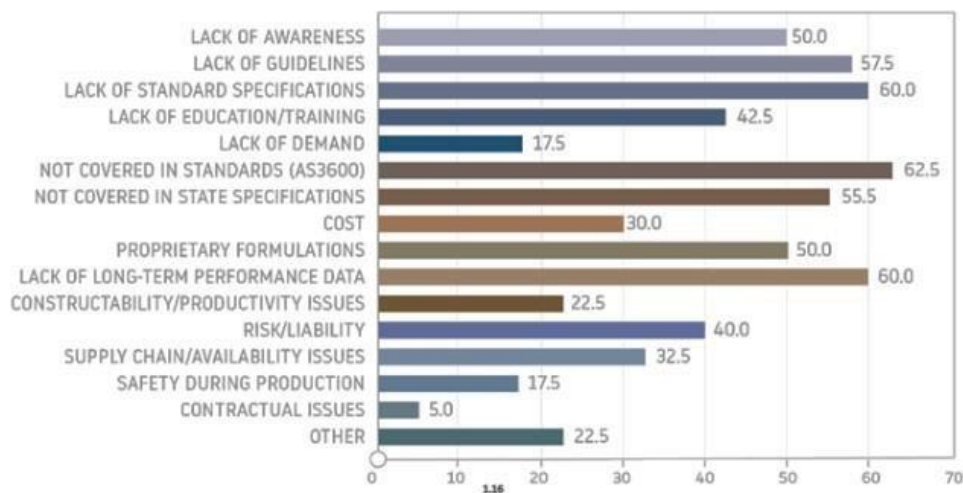


Figure 3 Réponses des répondants concernant les obstacles à la mise en œuvre des géopolymères [31].

Les géopolymères représentent une nouvelle catégorie de matériaux de grande qualité qui peuvent être utilisés en lieu et place du ciment traditionnel de Portland en raison de leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, de leur résistance initiale élevée et de leur longévité. En général, les géopolymères sont fabriqués à partir de déchets industriels tels que les cendres de

mouche et le kaolin de méthane, qui sont riches en silicium et en aluminium. De cette manière, les géopolymères constituent une solution économiquement avantageuse pour réduire l'impact environnemental en stockant le carbone. Malgré leur grande résistance, il est possible d'améliorer leurs propriétés mécaniques en ajoutant des agents de renforcement. De nombreuses propriétés sont améliorées par les fibres, notamment la résistance à l'étirement et la dureté. De plus, elles permettent de réguler le mécanisme de fissure et la dureté. Chaque matériau de renforcement a un impact positif sur les caractéristiques mécaniques du composite géopolymère, ce qui lui permet d'être utilisé dans de nombreuses applications, notamment dans le domaine de la construction civile. Le but de cette étude était donc d'analyser l'impact de l'incorporation de diverses fibres sur les caractéristiques mécaniques des composites à matrice géopolymère [17].

1.4.2. Approche éco-responsable

Les ressources cimentaires sont largement utilisées dans la construction pour développer les infrastructures du pays. Cependant, le béton cimentaire a un impact significatif sur l'effet de serre. En effet, la production de béton est responsable de 30 % des émissions de dioxyde de carbone dans le monde [18]. Le processus de fabrication du ciment, qui requiert des granulométries fines, est essentiel pour assurer une adhérence solide dans les travaux de construction. Malheureusement, cette production de ciment entraîne également d'importantes émissions de dioxyde de carbone (CO₂) à grande échelle [19]. Les émissions de CO₂ ont un impact persistant sur l'environnement et sont principalement causées par le broyage des minéraux et la combustion de combustibles fossiles et de matières premières dans les fours de production [19]. Dans l'ensemble, l'industrie du ciment est responsable de fortes émissions de CO₂ [20].

La production du ciment implique la combustion de grandes quantités de combustible et des émissions de CO₂ importantes à partir de la décomposition du calcaire, ce qui a entraîné un impact environnemental considérable d'une tonne de CO₂ par tonne de ciment. La géopolymérisation représente une technique efficace pour transformer les déchets (alumine et silice) en produits bénéfiques. Il est possible de diminuer de manière significative les émissions de CO₂ de l'industrie du ciment. En général, les matériaux sources utilisés pour le processus de géopolymérisation sont de l'alumine/silicate, ainsi que des liquides alcalins. Les études récentes et les défis dans ce domaine mettent l'accent sur la résistance à la compression de la kaolinite et du Metakaolin, des scories, des boues rouges, des déchets de silice, des déchets de métaux lourds et autres matériaux. Le temps de prise et l'ouvrabilité du produit final sont principalement

influencés par le type et les proportions des précurseurs, le type et la force de l'activateur, ainsi que les conditions de mélange et de durcissement. Les caractéristiques de structure d'un géopolymère sont comparables à celles du ciment Portland classique. Ainsi, le géopolymère est capable de substituer le ciment, ce qui permet de diminuer la consommation d'énergie, de réduire les coûts des matériaux de construction et de réduire les impacts environnementaux de l'industrie du ciment [21].

1.5. Conclusion

La géopolymérisation offre une alternative prometteuse pour l'isolation des bâtiments. En combinant des propriétés d'isolation remarquables avec un profil environnemental attractif, les géopolymères ont le potentiel de contribuer à un avenir plus durable et énergétiquement efficient.

CHAPITRE II
Revue de la Littérature sur les géopolymères cellulaires et les
matériaux d'isolation

2.1. Introduction

L'efficacité énergétique et la durabilité sont des enjeux majeurs dans le contexte actuel de changement climatique et de raréfaction des ressources naturelles. Les matériaux d'isolation traditionnels, tels que la laine de verre et le polystyrène expansé, présentent des limites en termes de performance énergétique et d'impact environnemental.

Les géopolymères cellulaires constituent une alternative prometteuse aux matériaux d'isolation classiques. Ils sont fabriqués à partir de matières premières renouvelables et offrent des propriétés intéressantes en termes de résistance mécanique, de résistance thermique, de densité et de porosité. Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les géopolymères cellulaires et les matériaux d'isolation. Il analyse les limitations des matériaux d'isolation traditionnels, explore les propriétés et les applications des géopolymères cellulaires, et discute de l'utilisation d'agents moussants et de fibres végétales dans la géopolymérisation.

2.2. Limitations des matériaux d'isolation traditionnels

2.2.1. Analyse critique

L'isolation de l'enveloppe du bâtiment joue un rôle important dans l'efficacité énergétique des bâtiments commerciaux [22]. L'efficacité énergétique des bâtiments revêt une grande importance, car elle est liée à une grande partie de la consommation totale d'énergie dans le monde [22].

Leur utilisation dans les bâtiments dépend principalement de : L'enveloppe du bâtiment, l'équipement mécanique et la conception de l'éclairage. Étant donné que la plupart des besoins énergétiques proviennent du chauffage et du refroidissement, les structures des bâtiments doivent être conçues pour minimiser la conductivité thermique. En outre, des concepts tels que la maison passive et les bâtiments zéro émission sont désormais mis en œuvre et appliqués. Cependant, l'utilisation de matériaux isolants performants peut réduire considérablement les pertes de chaleur dans l'ensemble d'un bâtiment et améliorer l'efficacité énergétique. En utilisant une isolation efficace et appropriée, les besoins énergétiques nécessaires pour refroidir et chauffer votre espace en été comme en hiver peuvent être réduits. L'adoption de stratégies d'économie d'énergie limite également l'utilisation des ressources naturelles, ce qui conduit à une réduction de la quantité de gaz à effet de serre [23] [24]. Les matériaux d'isolation des bâtiments peuvent être divisés en trois catégories principales en fonction de leur origine, de leur

composition chimique et de leur disponibilité : traditionnels, avancés et durables, comme le montre la figure 4.

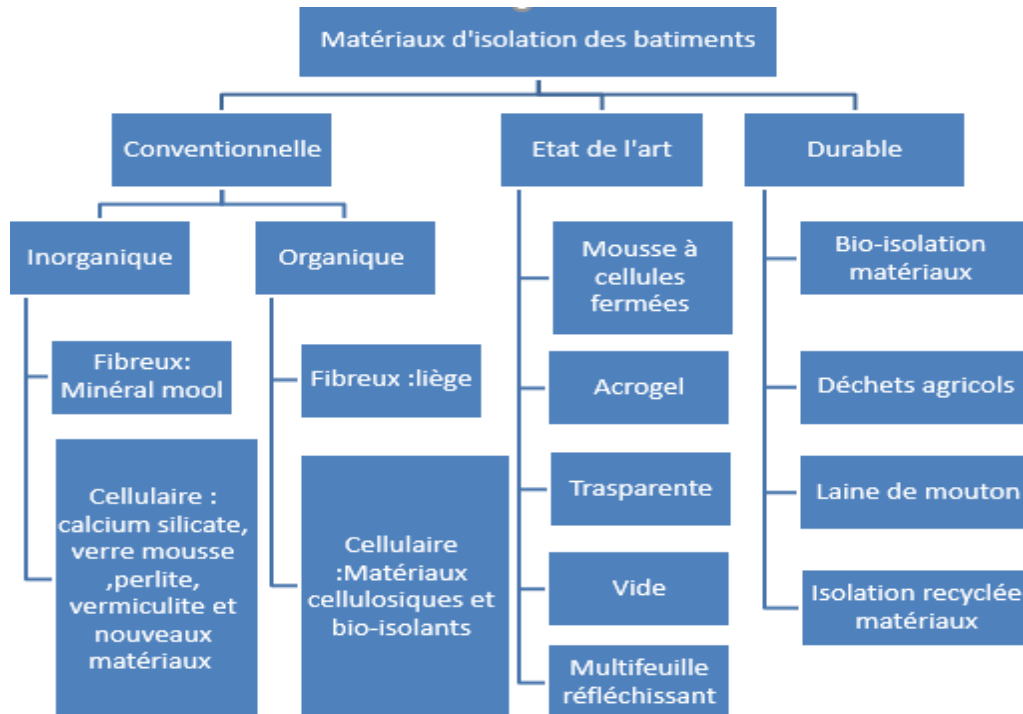


Figure 4 Classification des matériaux d'isolation des bâtiments.

Les matériaux d'isolation traditionnels présentent des propriétés et des limites spécifiques en termes d'efficacité énergétique et d'impact environnemental. La laine minérale et les mousses synthétiques, bien que largement utilisées, présentent des inconvénients dont il faut tenir compte. En termes d'efficacité énergétique, ces isolants traditionnels peuvent être performants, mais leur fabrication nécessite souvent beaucoup d'énergie, ce qui peut compenser les économies d'énergie réalisées lors de leur utilisation. De plus, ces matériaux ont un impact important sur l'environnement en raison de leur empreinte carbone élevée due à leurs processus de production énergivores. Par exemple, la production de polystyrène expansé consomme 10 fois plus d'énergie que la production de matériaux isolants naturels, ce qui met en évidence les principales limites de ces matériaux en termes de durabilité et de respect de l'environnement. De plus, l'isolation traditionnelle peut poser des problèmes de santé et d'environnement, comme la libération de composés organiques volatils (COV) nocifs pour la qualité de l'air intérieur. Ces substances peuvent avoir des effets néfastes sur la santé des occupants et contribuer à la pollution intérieure. Par conséquent, bien que l'isolation traditionnelle soit

largement utilisée en raison de son efficacité, il est nécessaire de considérer ses limites en termes d'efficacité énergétique, d'impact environnemental et de santé pour promouvoir des choix plus durables et respectueux de l'environnement dans le domaine de l'isolation des bâtiments [25] [26].

2.3. Géopolymères cellulaires : Propriétés et applications

2.3.1. Propriétés distinctives

Les géopolymères, qui sont fabriqués en activant alcalinement les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, le Metakaolin et la boue rouge, offrent des alternatives durables et peu coûteuses aux ciments. De plus en plus utilisés dans la production de matériaux de construction [27], les géopolymères cellulaires sont particulièrement prometteurs en raison de leur faible consommation intrinsèque d'énergie et de leur durabilité améliorée. Ils présentent également les avantages d'un matériau cellulaire [29] [30]. Les géopolymères sont une nouvelle classe de matériaux inorganiques qui présentent un grand potentiel d'application pratique en raison des propriétés des matières premières utilisées et des particularités de la structure matricielle cimentaire formée lors du processus de géopolymérisation. Cette étude a produit des spécimens de géopolymère cellulaire en utilisant des cendres volantes de classe F, qui sont caractérisées par une faible réactivité lors de la géopolymérisation. Plusieurs méthodes standards ainsi que des études microstructurales ont été employées pour évaluer l'effet des facteurs suivants sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermo physiques des géopolymères cellulaires : l'utilisation de divers composants modificateurs minéraux pour la synthèse de systèmes géopolymères, le traitement à haute température et la méthode d'introduction de l'activateur alcalin [32].

Les géopolymères cellulaires sont des matériaux innovants largement étudiés pour leurs remarquables propriétés dans le domaine de l'isolation. Ils allient les avantages des géopolymères, des polymères inorganiques composés de matériaux riches en silicates tels que les cendres volantes ou le kaolin, grâce à un processus d'activation alcaline. Leur structure cellulaire poreuse leur confère des propriétés uniques. Voici une exploration des propriétés spécifiques qui font des géopolymères cellulaires des candidats prometteurs pour l'isolation.

2.3.1.1. Résistance mécanique

En général, les géopolymères cellulaires ont une résistance mécanique élevée en raison de leur structure cellulaire et de leurs liaisons chimiques solides. Grâce à cette caractéristique, ils

peuvent préserver leur structure même sous des charges considérables, ce qui les rend intéressants pour des applications d'isolation dans des environnements soumis à des contraintes mécaniques [33].

2.3.1.2. Résistance thermique

Les géopolymères cellulaires offrent une excellente résistance thermique. Cela signifie qu'ils conservent leurs propriétés isolantes, même lorsque soumis à des températures élevées. Leur structure chimique et leur faible conductivité thermique en font des matériaux efficaces pour l'isolation thermique. Ils sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant une isolation dans des conditions de températures extrêmes [34].

2.3.1.3. Densité

La densité des géopolymères cellulaires est assez faible en raison de leur structure poreuse. Ils sont attrayants pour des applications d'isolation qui demandent une réduction importante du poids tout en offrant des performances d'isolation thermique élevées grâce à leur faible densité. Leur légèreté peut aussi rendre leur manipulation et leur installation plus faciles [35].

2.3.1.4. Porosité

L'ajustement de la porosité des géopolymères cellulaires est une caractéristique essentielle qui permet de personnaliser leurs performances d'isolation. On peut améliorer l'efficacité thermique en diminuant la conductivité thermique grâce à une porosité plus élevée, tandis qu'une porosité plus faible peut augmenter la résistance mécanique. La possibilité de changer la porosité les rend parfaitement adaptés à différentes applications d'isolation qui ont des exigences particulières [36].

2.4. Applications potentielles

Le géopolymère offre une alternative de construction au ciment Portland en réutilisant les sous-produits industriels et les déchets, réduisant ainsi l'impact environnemental des décharges. Les géopolymères ont été utilisés dans divers domaines tels que les matériaux résistants au feu, les nouvelles céramiques, les matériaux sans amiante, les matériaux de construction à faible technologie, la stabilisation des déchets dangereux, les matériaux adsorbants pour le traitement de l'eau, etc [37]. Le ciment et le béton sont essentiels pour le développement des infrastructures et de la civilisation moderne. Les géopolymères sont envisagés comme une alternative pour la construction d'infrastructures en fonction de la zone

géographique et de la chaîne d'approvisionnement en matériaux précurseurs [38]. Un exemple de succès est l'utilisation du béton géopolymère à base de cendres volantes dans la construction du bâtiment du Global Change Institute de l'Université du Queensland (Figure 5) en Australie. Le bâtiment comprenait 33 poutres de plancher préfabriquées en béton géopolymère d'une portée de 11 mètres, représentant environ 320 m³ de béton, répartis sur trois étages suspendus. L'aéroport de Brisbane West Wellcamp (Figure 1) en Australie a utilisé environ 40 000 m³ (100 000 tonnes) de béton géopolymère, permettant d'économiser 6 600 tonnes d'émissions de CO₂ [39].



Figure 5 Bâtiment de l'Institut du changement global et aéroport de Brisbane [54].

Les géopolymères cellulaires sont des matériaux polyvalents qui peuvent être utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs propriétés uniques. Leur structure poreuse et leur capacité à isoler la chaleur les rendent prometteurs pour un large éventail d'applications, qui sont les suivantes :

- Isolation thermique dans la construction : Les géopolymères cellulaires peuvent servir d'isolants thermiques dans le secteur de la construction afin de diminuer les pertes de chaleur et d'améliorer l'efficacité énergétique des constructions. En raison de leur faible conductivité thermique et de leur capacité à conserver leurs propriétés à des températures élevées, ils sont intéressants pour cette utilisation [33].
- Isolation dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatial : Les géopolymères cellulaires peuvent être employés dans le domaine de l'isolation thermique dans les domaines de l'automobile et de l'aérospatial, où il est crucial de réduire le poids tout en obtenant d'excellentes performances thermiques. La densité réduite et la résistance à la

chaleur de ces matériaux les rendent intéressants pour l'isolation des moteurs, des réservoirs de carburant, des cabines d'avions, etc [34].

- Isolation dans les domaines électrique et électronique : Les géopolymères cellulaires jouent un rôle important en tant que matériaux isolants dans les transformateurs, les câbles électriques, les composants électroniques, et bien d'autres composants. Pour ces applications, ils sont adaptés en raison de leur faible conductivité électrique et de leur résistance aux températures élevées [35].
- Isolation dans les applications industrielles à haute température : Les géopolymères cellulaires peuvent servir d'isolants dans des milieux industriels exposés à des températures élevées, comme les fours, les cheminées et les réacteurs chimiques. En raison de leur résistance à la chaleur intense et de leur stabilité face aux températures élevées, ils sont d'une grande avantage pour ces conditions extrêmes [36].

2.5. Utilisation de agents moussants et des fibres végétales dans lagéopolymérisation

2.5.1. Les agents moussants

La technologie des géopolymères a récemment progressé, permettant ainsi le développement de divers produits géopolymères. Parmi ceux-ci, il y a les mousses hautement poreuses à base de géopolymères, qui sont créées en incorporant des agents moussants dans une matrice géopolymère composée de cendres volantes. Ces agents interagissent avec la matrice liquide ou l'oxygène présent dans celle-ci, ce qui provoque la libération de gaz et la création de pores avant que le gel ne durcisse. Les propriétés mécaniques et thermiques de la structure durcie sont excellentes, ce qui permet leur utilisation dans des panneaux acoustiques et des composants préfabriqués légers pour une isolation thermique efficace [40]. De cette manière, les paramètres modifiés pendant la réaction de moussage ont un impact sur le processus de géopolymérisation et ont finalement un impact sur les caractéristiques des pores. Le rôle des tensioactifs dans la réaction de moussage est crucial. Les tensioactifs ont un impact sur la densité apparente, la porosité, la répartition de la taille des pores et la microstructure, ce qui a un impact significatif sur les préférences du GPF [29]. Les mousses présentant des pores plus étendus se déchirent facilement sous l'effet de la pression [41].

L'agent moussant est le principal composant utilisé pour produire de la mousse dans le mortier de béton. Grâce aux millions de bulles d'air de différentes tailles (0,1 mm à 2 mm) qu'il

contient, l'agent moussant permet d'obtenir des mortiers de béton avec différentes densités et propriétés d'isolation [42]. Deux méthodes sont utilisées pour l'incorporation de l'agent moussant dans la production de béton. Dans la première méthode, la mousse obtenue à partir de l'agent moussant est ajoutée au mortier pour produire le béton. Dans la seconde méthode, l'agent moussant est ajouté directement au mortier pendant sa production, ce qui permet de former la mousse [43]. Les agents moussants peuvent être d'origine végétale, protéique, résineuse ou chimique (utilisés comme détergents en chimie). Les poudres métalliques sont également couramment utilisées comme agents moussants dans la production industrielle de béton mousse.

Le béton mousse, également connu sous le nom de béton cellulaire ou poreux, est un type de béton léger. Pour le produire, de la mousse formée à l'aide d'un agent moussant est ajoutée au mélange de ciment, d'eau et d'agréats. La structure du béton mousse est constituée de 75% à 80% de pores fermés indépendants.

En utilisant des agents moussants appropriés, il est possible de produire de la mousse avec des densités différentes (400 à 1600 kg/m³). Bien que le béton mousse soit utilisé depuis 1923, il n'existe pas de méthode de préparation de mélange standard avec un rapport fixe. Cela dépend des caractéristiques et de la quantité d'agent moussant utilisé, de la méthode de production de la mousse, de l'homogénéité de la distribution de l'air, des méthodes de mélange appliquées et de nombreux autres facteurs [44].

2.5.2. Fibres végétales

Les fibres naturelles proviennent principalement de trois sources principales : végétale, animale et minérale [45]. Les fibres végétales sont obtenues à partir de différentes parties des plantes et sont principalement composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les fibres animales proviennent de poils d'animaux, de plumes ou de sécrétions d'insectes et sont principalement composées de protéines. Les fibres minérales sont obtenues à partir de roches minérales à structures fibreuses et sont principalement composées de divers oxydes tels que la silice et l'alumine. La plupart des fibres minérales nécessitent plusieurs traitements avant d'être utilisées, à l'exception de l'amiante qui est considérée comme cancérigène et ne convient pas à une utilisation respectueuse de l'environnement. En revanche, les fibres végétales sont un excellent matériau polymère naturel qui présente des avantages tels que des réserves abondantes, une biodégradabilité et une capacité à être traitées à plusieurs reprises [46]. De

plus, les fibres végétales se caractérisent par leur résistance élevée et leur faible dureté. En ajoutant des fibres végétales au béton, il est possible d'améliorer sa fragilité et d'augmenter sa ténacité [47]. Par conséquent, les fibres végétales ont de nombreuses applications potentielles dans les bétons renforcés de fibres géopolymères. Les fibres végétales typiques sont illustrées à la figure 6.



Figure 6 Types de fibres végétales.

La fibre végétale (FV) et le géopolymère satisfont aux besoins du développement durable. Les géopolymères offrent les bénéfices d'un procédé de préparation facile, de préservation et de protection de l'environnement, d'une grande résistance initiale, d'une grande disponibilité de matières premières et d'un coût abordable. Ils présentent de nombreuses possibilités d'utilisation et sont perçus comme les matériaux cimentaires les plus intéressants pour substituer le ciment. Néanmoins, étant donné la structure céramique et la fragilité des géopolymères, ils présentent une faible résistance à la flexion et à la traction, et ils sont vulnérables aux microfissures. Pour remédier à la fragilité des géopolymères, il est possible d'améliorer la résistance des composites en ajoutant des fibres. En ajoutant des fibres aux géopolymères, il est possible de restreindre la formation de fissures et d'améliorer leur ductilité, leur ténacité et leur résistance à la traction. La FV est un polymère naturel de qualité, offrant les bénéfices d'une densité faible et d'un rapport d'aspect élevé. Il s'agit non seulement de sources abondantes, accessibles et abordables, mais ils peuvent également être traités à

plusieurs reprises et biodégradables. La FV présente une grande résistance et une faible dureté, ce qui peut contribuer à accroître la durabilité des composites. Aujourd'hui, les géopolymères renforcés de fibres végétales (PFRG) sont de plus en plus utilisés dans les domaines de la recherche et de l'ingénierie [48]. En raison des préoccupations environnementales croissantes et de la demande de développement de matériaux respectueux de l'environnement et économes en énergie, les fibres végétales ont suscité un intérêt comme alternative aux autres types de fibres, comme renforts dans les composites cimentaires [64] [65].

La FV a le potentiel d'améliorer les propriétés mécaniques du mortier et du béton, en particulier la ténacité et la résistance après fissuration [53]. La capacité du FV à séquestrer le carbone est un facteur important à considérer pour ralentir la croissance du CO₂ dans l'atmosphère [54]. Basés sur des composites à matrices polymères, les composites renforcés par FV ne consomment que 37 % de l'énergie sur l'ensemble de leur cycle de vie, par rapport à un composite renforcé par des fibres de verre [54]. Une réduction similaire peut être obtenue pour les composites à base de matrices cimentaires [54].

Le composite géopolymère fibre végétale (FV) est constitué de fibres et d'une matrice géopolymère qui présentent des caractéristiques distinctes. Une interface est formée par la surface de contact entre la fibre végétale et la matrice géopolymère. La structure microstructurale de l'interface du matériau composite est très complexe, incluant la surface géométrique et la zone de transition où la matrice et la fibre interagissent [55]. On peut obtenir des performances optimales des composites géopolymères en ajustant l'état d'adhésion interfaciale et en améliorant les caractéristiques de la couche interfaciale entre la fibre et la matrice. La figure 7 illustre les différentes formes de liaison d'interface entre la fibre et la matrice, telles que l'inter diffusion, l'adhésion électrostatique, la liaison chimique et l'emboîtement mécanique [56].

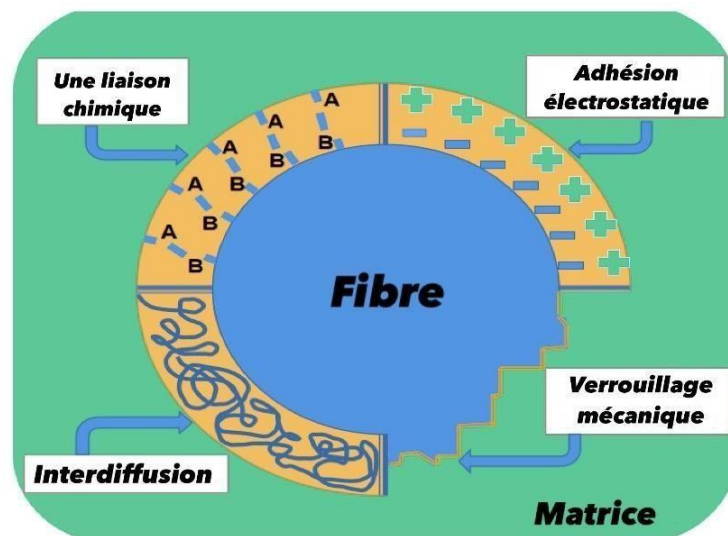


Figure 7 Forme d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice.

Les fibres végétales sont principalement constituées de cellulose, de pectine et de lignine [57]. Les différentes compositions entraînent des propriétés variées des fibres. Lorsqu'on utilise des fibres végétales comme matériau de renfort, les propriétés hydrophobes ou hydrophiles des fibres influencent l'adhésion entre les fibres et la matrice, car les fibres végétales gonflent habituellement après un contact avec l'eau. Les performances du béton géopolymère fibré sont influencées par la qualité des fibres végétales. La surface de la fibre végétale est généralement prétraitée afin d'assurer les performances du béton géopolymère fibré. Le processus de surface des fibres végétales est présenté dans la figure 8 [58].



Figure 8 Le processus général de traitement de surface des fibres végétales.

La fibre végétale, en tant qu'excellent matériau polymère naturel, présente les avantages de réserves abondantes, de traitements répétés et de biodégradabilité [46]. De plus, la fibre végétale présente les caractéristiques mécaniques d'une résistance élevée et d'une faible dureté.

Sur la base de ces avantages, l'ajout de fibres végétales au béton peut améliorer la fragilité et augmenter la ténacité du matériau [47]. Par conséquent, les fibres végétales ont de larges perspectives d'application dans le béton géopolymère renforcé de fibres.

2.6. Les sables dans la géopolymérisation

Les sables sont définis comme la partie des granulats minéraux avec des grains mesurant entre 80 μm et 5 mm, cette définition générale varie selon les classifications. Ils représentent également les matériaux ayant un diamètre maximal inférieur à 6,3 mm et dont moins de 30 % passent à travers un tamis de 80 microns.

2.6.1. Classification des sables en fonction de leur origine

Selon leur origine, les sables peuvent être catégorisés de la manière suivante :

- Sable rivière : extrait par dragage des lits des cours d'eau.
- Sable marin : provenant des littoraux marins. Pour son utilisation dans le béton,
- Sable de carrière : Souvent associé à de l'argile qui enveloppe les grains, entravant leur liaison avec les liants.
- Sable artificiel : obtenu par le broyage de roches (calcaires durs, grès...).
- Sable de dune : Un sable très fin, largement présent dans le Sahara.

2.6.2. Les différents types de sables

- **Sables Concassé (artificiels)**

Le sable concassé est un type de sable élaboré en réduisant en morceaux des roches ou des agrégats solides pour produire des particules de sable de dimensions précises. Il est fabriqué à l'aide de méthodes de broyage mécanique et possède des caractéristiques similaires à celles du sable naturel, mais son origine diffère. Il est fréquemment employé dans le domaine de la construction et du génie civil pour divers usages, tels que la confection de béton, de mortier, de revêtements de sol, de filtres, de remblais, entre autres.

Les atouts du sable concassé résident dans sa disponibilité régulière, son contrôle qualité et sa conformité aux normes techniques spécifiques. L'utilisation de sable concassé permet d'obtenir une granulométrie uniforme, favorisant ainsi une meilleure compacité, une résistance accrue et une adhérence améliorée dans les matériaux de construction [59].

- **Sables naturels (rivière)**

Les sables naturels peuvent provenir de cours d'eau, souvent désignés sous les termes de « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire ». Ils se distinguent par leur forme arrondie et leur dureté, résultant de l'érosion des roches par l'eau. Une autre variété de sable naturel est le sable de carrière, extrait des carrières et présentant une forme angulaire. Il peut être obtenu soit par extraction en masse du sol, soit par transformation de roches extraites des carrières. Quant au sable marin, issu de roches sous-marines, il est généralement fortement salin. Son utilisation nécessite un rinçage méticuleux pour éviter toute efflorescence éventuelle. Enfin, le sable de feuilles est un sable fin qui contient de nombreux vides d'air, ce qui implique son association avec d'autres types de sable lors de son utilisation. Il est récolté dans les zones montagneuses [59].

- **Sable de dune**

Le sable de dunes est le produit de l'érosion et de la sédimentation de divers types de roches, suivies d'un transport par les cours d'eau et le vent. La majeure partie de ces formations sableuses est composée de quartz. Il se caractérise par une granulométrie fine et compacte. Sa présence abondante dans des régions comme le Sahara, son faible coût d'extraction et son apparence propre en font un matériau attractif. Il offre une solution au problème de l'épuisement des ressources naturelles et est perçu comme un matériau prometteur pour l'avenir [60].

2.7. Conclusion

La recherche sur les géopolymères cellulaires est un domaine en pleine expansion. Les résultats des études publiées à ce jour indiquent que ces matériaux présentent un grand potentiel pour l'isolation thermique. Ils offrent une alternative durable et performante aux matériaux d'isolation traditionnels. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les propriétés des géopolymères cellulaires et développer des applications industrielles à grande échelle. L'utilisation d'agents moussants et de fibres végétales est une voie prometteuse pour améliorer les performances et la durabilité de ces matériaux.

CHAPITRE III
Matériaux et méthodes

3.1. Introduction

Ce chapitre présente une analyse détaillée des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour évaluer les propriétés des géopolymères cellulaires renforcés de fibres de lin (FL) et de sable concassé (SC). Les caractéristiques des matériaux constituent un élément essentiel pour comprendre l'impact des différents composants sur les performances finales du matériau. La méthodologie détaillée fournit un cadre méthodologique clair et rigoureux qui guide les expérimentations et les analyses effectuées pour atteindre les objectifs de cette étude. Ce chapitre offre ainsi un aperçu approfondi des fondements et des procédures adoptées pour mener à bien cette recherche.

3.2. Matériaux et caractérisation

3.2.1. Précurseurs

Dans cette section, nous présentons les trois types de précurseurs utilisés dans cette étude pour la formulation des géopolymères cellulaires. Ces précurseurs comprennent le laitier de haut fourneau (LHF), les fines recyclées des bétons démolis (FRs) et la poudre de verre (PV), chacun contribuant de manière unique aux propriétés finales du matériau. Chaque précurseur a été caractérisé méticuleusement pour évaluer sa composition chimique, sa granulométrie, et d'autres caractéristiques pertinentes.

Les compositions chimiques des précurseurs sont illustrées dans le tableau 1. Le LHF se compose principalement de calcium, de silice et d'alumine, tandis que la composition des FRs montre une teneur élevée en calcium et en silice du béton d'origine. La PV présente une fraction de silicium élevée du verre, mélangée avec du sodium, du magnésium et des oxydes de calcium.

Tableau 1 Composition chimique des précurseurs

%	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃
LHF	43.2	41.1	7	2.8	0.32	0.6	4.7	-	-	0.25
FRs	39.2	47.6	3.25	3.43	0.62	0.605	2.29	0.34	0.206	1.56
PV	8.71	70.57	1.32	0.51	0.53	14.74	2.49	-	-	0.29

La figure 9 présente les courbes de distribution de la taille des particules pour les précurseurs, mesurées par un analyseur de taille des particules. Le diamètre moyen des particules varie de 16,73 μm pour le LHF à 43,37 μm pour la PV.

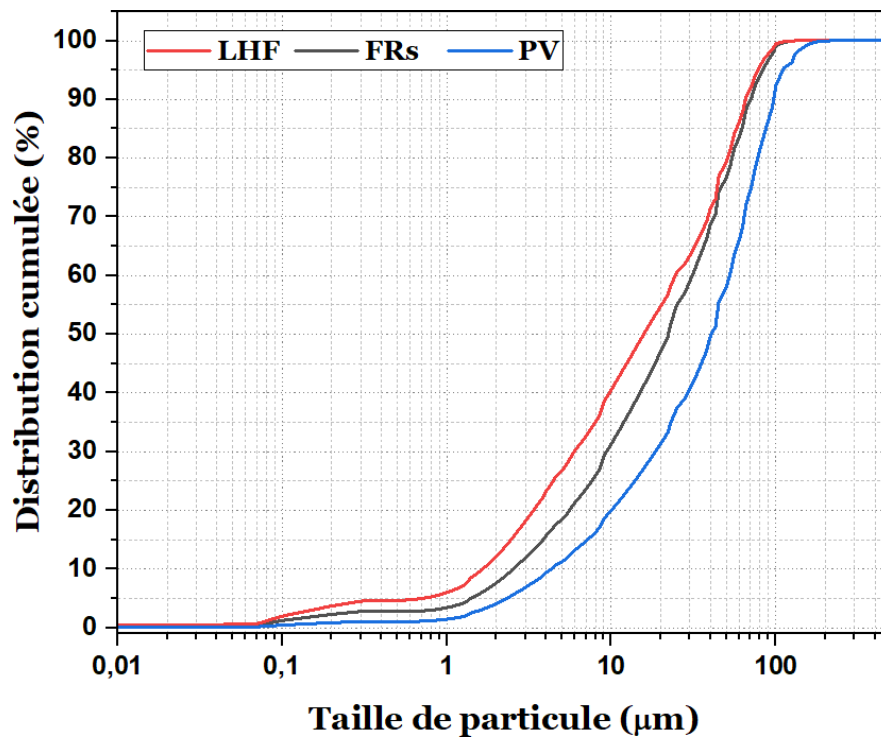


Figure 9 Courbes granulométriques des précurseurs

Les caractéristiques physiques des précurseurs sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 Propriétés physiques des précurseurs

Précurseurs	Densité	Surface spécifique de Blaine (g/cm ²)
LHF	2.94	2364.22
FRs	2.35	4531.46
PV	2.52	2805.8

3.2.2. Activateurs

3.2.2.1. Soude caustique

La soude caustique utilisée dans notre étude est de l'hydroxyde du sodium en perles, avec une pureté minimale de 99%. Ce produit est fabriqué et commercialisé par la société SPECILAB en Algérie sous la référence SP11271S025, et sa masse moléculaire est de 40. Les détails de sa composition sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 Composition chimique de la soude caustique

Composition	Teneur (%)
Hydroxyde de Sodium	99,6
Carbonate de Sodium	0,41
Chlorure de Sodium	0,002
Sulfate de sodium	0,005
Fer (Fe_2O_3)	0,001
Mercure (Hg)	0,00002

Pour préparer 1000 ml de la solution NaOH (10M) au laboratoire, nous avons suivi une méthode rigoureuse. Nous avons commencé par peser une quantité précise de sodium hydroxyde en perles (NaOH) selon sa formule moléculaire et la concentration cible de 10M (Equivalent de 40% de concentration). Ensuite, nous avons introduit cette quantité de NaOH (404.04 g) dans un volume calculé d'eau déionisée tout en prenant les précautions nécessaires en raison de la réactivité de la soude caustique avec l'eau.

Après avoir ajouté le NaOH dans l'eau, nous avons utilisé un agitateur pour mélanger doucement la solution jusqu'à ce que le solide soit complètement dissous (voir Figure 10). Cette opération doit être réalisée dans un environnement bien ventilé et en portant des équipements de protection individuelle, car la dissolution de la soude caustique dans l'eau génère de la chaleur et des vapeurs irritantes.

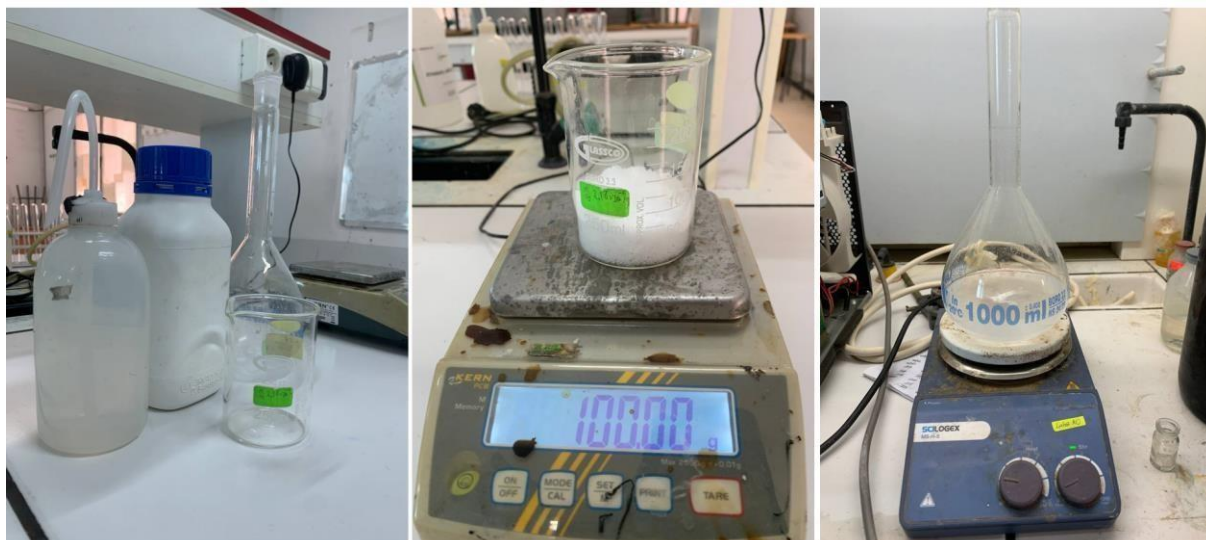


Figure 10 Préparation de la solution NaOH

Enfin, la solution NaOH (10M) a été stockée dans un contenant approprié, étiqueté avec les informations nécessaires sur le produit chimique et sa concentration. Les précautions de sécurité appropriées ont été respectées tout au long du processus de préparation et de manipulation de la solution NaOH.

3.2.2.2. Silicates de sodium

Les silicates de sodium utilisés dans cette étude ont été fournis par SARL GC à Sidi Aïssa, M'Sila, comme indiqué dans la figure 11. Les caractéristiques physico-chimiques de ce silicate de sodium sont présentées de manière synthétique dans le tableau 4 ci-dessous.



Figure 11 Silicates de sodium

Tableau 4 Caractéristiques des silicates de sodium utilisées

Paramètre	Composition
SiO ₂ (%)	29,8
Na ₂ O (%)	14,43
PH	13,01
Densité à 20° C (en g/cm ³)	1,53
Concentration (%)	45
SiO ₂ /Na ₂ O	2,06
Degré Baumé (°)	50,2

3.2.3. Agent moussant

La poudre d'aluminium utilisée comme agent moussant pour l'expansion du géopolymère cellulaire est de l'aluminium pur à 99% et une densité de 2.8, fourni par la société METANOF. Les résultats de l'analyse granulométrique par laser de la poudre d'aluminium sont présentés dans la figure 12.

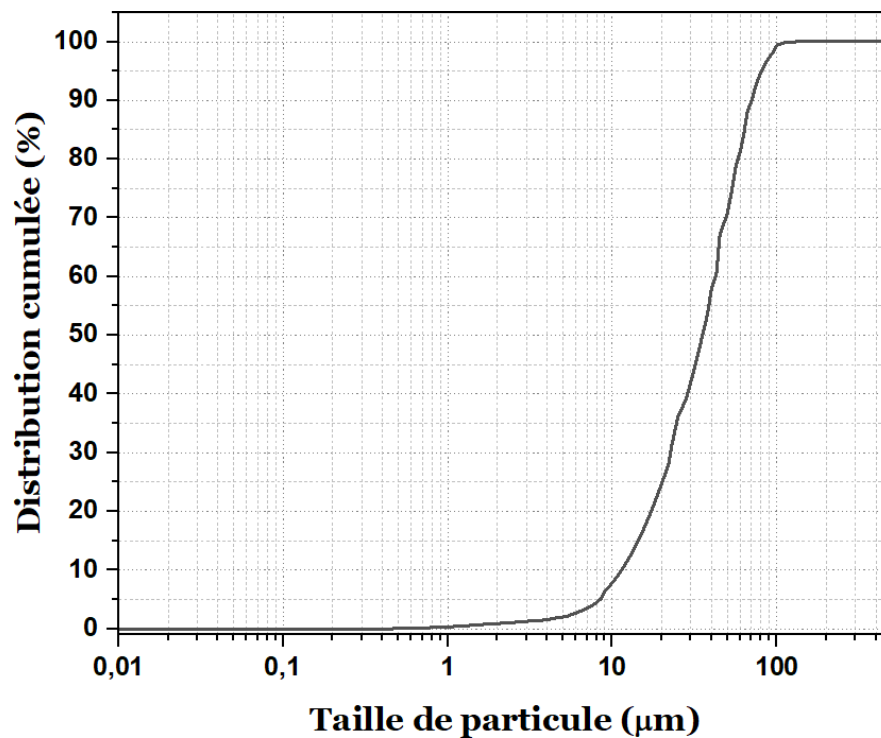


Figure 12 Courbe granulométrique de la poudre d'aluminium

3.2.4. Sables

Dans cette étude, nous avons utilisé deux types de sables, le sable de dune (SD) et le sable concassé (SC). Les apparences des deux sables sont illustrées dans la figure 13, SC présente des formes angulaires avec des particules fines à la surface des grains. En revanche, SD présente une forme arrondie et des surfaces de grain propres.



Figure 13 Morphologies des sables utilisés

La granulométrie des sables est présentée dans la Figure 14, leurs propriétés physiques sont présentées dans le tableau 5.

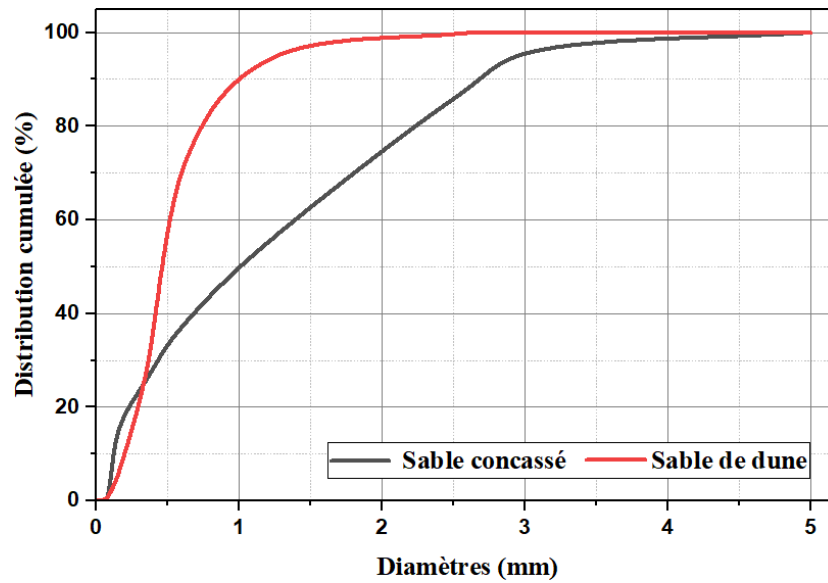


Figure 14 Granulométries des sables utilisés

Tableau 5 Propriétés physiques des sables utilisés

Type de sable	Densité	ES (%)	Quantité de poudre (<80 μ m) (%)	Module de finesse
Sable concassé	2.5	73	6	2.8
Sable de dune	2.61	90	3	2

3.2.5. Fibres de lin

Les fibres de lin (FL) ont été incorporées comme renforcement dans les composites géopolymères cellulaires. La figure 15 montre la visualisation à l'œil nu de la FL utilisée dans cette étude.



Figure 15 Fibres de lin

Afin d'améliorer la résistance à la traction et d'augmenter la rugosité de surface de FL, un traitement alcalin a été effectué en utilisant une solution d'hydroxyde de sodium à 1% (NaOH) pendant 1 heure (Figure 16). Ce traitement visait à éliminer les phases amorphes, telles que l'hémicellulose, la lignine et la cire, augmentant ainsi la cristallinité du composant cellulose [61]. Le traitement a abouti à une texture de surface plus rugueuse par rapport à la FL non traitée, améliorant potentiellement l'adhésion fibre-matrice et l'interconnexion mécanique au sein des composites géopolymères.



Figure 16 Traitement alcalin des fibres de lin

Après le traitement alcalin, les FL ont été soigneusement lavés avec de l'eau distillée jusqu'à ce qu'ils atteignent la neutralité chimique, assurant l'élimination de toute solution résiduelle de NaOH adhérente à la surface de la fibre. Par la suite, les FL traités ont été coupés à une longueur constante de 15 mm pour faciliter la distribution et l'incorporation uniformes dans les mélanges de géopolymères cellulaires.

3.3. Méthodologie

3.3.1. Les plans composites centrés

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode des plans composites centrés (PCC) pour évaluer l'effet des variables indépendantes sur les propriétés du matériau. Les deux facteurs

principaux considérés étaient la teneur en SC (sable concassé) comme remplaçant du sable de dune, et la teneur en FL (fibres de lin).

Les niveaux des facteurs ont été définis comme suit :

Teneur en SC : 0% à 100% par fraction massique.

Teneur en FL : 0% à 0.5% par fraction volumique.

Le plan expérimental PCC est une méthode efficace pour explorer l'effet des variables indépendantes sur les réponses mesurées. Il permet de déterminer les effets principaux, les interactions et les quadratiques des facteurs sur les propriétés du matériau.

Les combinaisons des niveaux des facteurs ont été sélectionnées de manière à couvrir un large domaine expérimental tout en minimisant le nombre d'essais nécessaires. Les essais ont été conçus de manière à inclure des points axiaux et un point central, permettant une évaluation complète des effets des facteurs.

Au total, 9 formulations stratégiques ont satisfait à la collecte de données de réponse pour correspondre aux courbes carrées et aux termes d'interaction à deux voies pour les mesures cibles : densité, porosité, résistance à la compression et conductivité thermique. Le tableau 6 présente le plan de formulations réalisées en utilisant l'approche PCC.

Tableau 6 Essais réalisés à l'aide de l'approche PCC

ID des mélanges	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Modèle	--	a0	+-	0a	00	0A	+-	A0	++
SC (%)	0	0	0	50	50	50	100	100	100
FL (%)	0	0.25	0.5	0	0.25	0.5	0	0.25	0.5

Les résultats de cette méthodologie comprennent les résultats de l'analyse des variances (ANOVA), les modèles mathématiques, les diagrammes de profilage de surface et le plan de mélange optimal obtenu à partir de l'analyse de désirabilité (Figure 17). Ces résultats fournissent des informations précieuses sur les effets des facteurs d'entrée sur les réponses et facilitent le développement d'une formulation de géopolymère cellulaire optimisée avec les propriétés souhaitées.

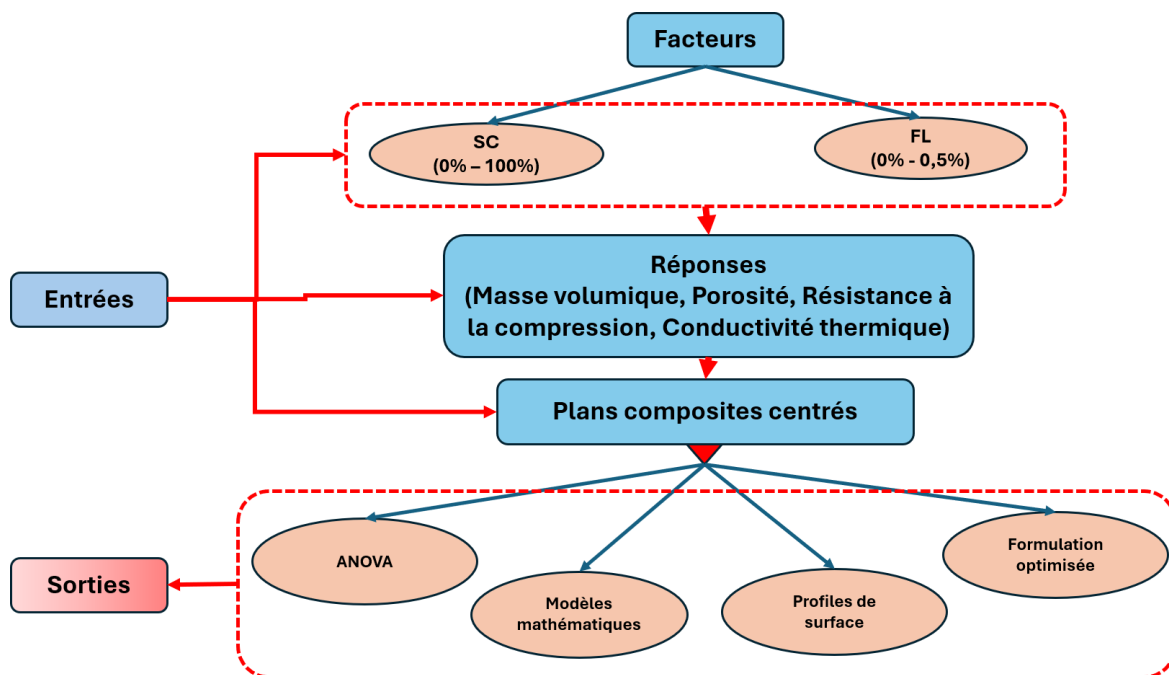


Figure 17 Schéma méthodologique pour l'optimisation des géopolymères cellulaires à l'aide de l'approche de conception plans composites centrés

La méthodologie PCC utilisée dans cette étude nous a permis de caractériser de manière approfondie les relations entre les variables de formulation et les propriétés du matériau, fournissant ainsi des informations précieuses pour l'optimisation des compositions de béton mousse géopolymère.

3.3.2. Préparation des mélanges

Les échantillons de géopolymères cellulaires ont été préparés selon les compositions de mélange déterminées par l'approche PCC (Tableau 7).

Tableau 7 Compositions des mélanges confectionnés

Mélanges	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
SC (kg/m ³)	0	0	0	547.05	547.05	547.05	1094.1	1094.1	1094.1
SD (kg/m ³)	1094.1	1094.1	1094.1	547.05	547.05	547.05	0	0	0
FL (kg/m ³)	0	3.75	7.5	0	3.75	7.5	0	3.75	7.5
LHF (kg/m ³)					400.59				
FRs (kg/m ³)					121.9				

PV (kg/m ³)	48.8
NaOH (kg/m ³)	114.28
Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	342.84
Al (kg/m ³)	75

Les précurseurs, les fibres de lin et les sables ont été pesés avec précision selon les proportions spécifiées par la matrice PCC. La poudre d'aluminium, agissant comme agent de mousse, a été incorporée dans le mélange sec à une proportion fixe de 3% par poids total. Ces constituants secs ont été soumis à un mélange minutieux pour assurer leur homogénéité. La solution d'activateur alcaline a été préparée en combinant l'hydroxyde de sodium et le silicate de sodium dans un rapport de 1/3. Le mélange sec a ensuite été mélangé avec la solution d'activateur à l'aide d'un mélangeur mécanique pendant 90 secondes, ce qui a donné lieu à une pâte géopolymère homogène en mousse. Ce mélange de géopolymère mousseux a été soigneusement versé dans des moules mesurant 4x4x4 cm³, les remplissant initialement à mi-chemin. (Figure 18).



Figure 18 Remplissage des moules

Pour faciliter les réactions de géopolymérisation et de mousse, les moules partiellement remplis ont été soumis à un traitement d'autoclave à 50°C pendant 15 minutes. Après la phase de cure initiale dans l'autoclave, les spécimens ont été démolis au bout d'un jour et transférés dans un

Environnement contrôlé (Figure 19), maintenu à une température de 20 ± 2 °C et à une humidité relative ≥ 95 %, où ils sont restés jusqu'à ce qu'ils atteignent l'âge d'essai souhaité.

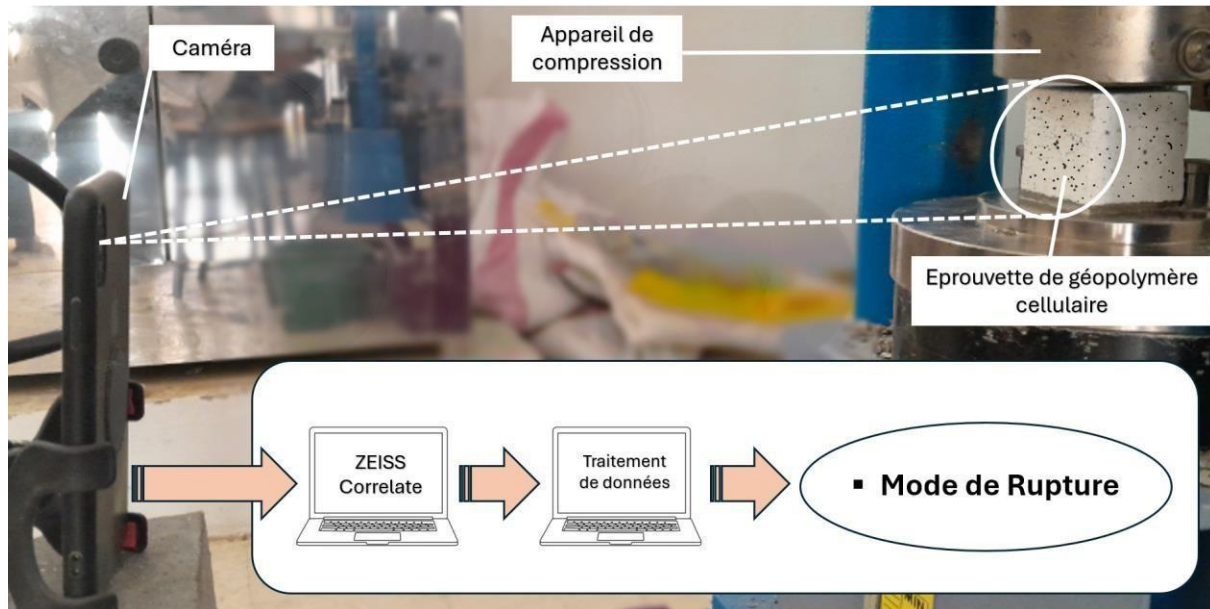


Figure 19 Les échantillons démoulés

3.3.3. Essais expérimentaux

Divers essais ont été effectués pour évaluer les propriétés des géopolymères cellulaires préparés, en évaluant leurs caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques. Le facteur de moussage, qui représente le rapport entre le volume final durci et le volume initial fraîchement mélangé, a été déterminé pour caractériser le comportement d'expansion. La masse volumique des échantillons après 28 jours de cure a été mesurée en utilisant la méthode standard ASTM C138 [62], tandis que leur porosité a été évaluée en quantifiant le volume des vides perméables accessibles à l'eau, conformément à la directive NBR 9778 [63]. Ces propriétés physiques sont intrinsèquement liées aux performances mécaniques, qui ont été évaluées par des tests de résistance à la compression effectués après 28 jours de cuisson, conformément aux normes ASTM C109 [64]. Cela a permis d'évaluer le comportement des échantillons sous charge compressive, un aspect critique pour les applications de construction. En outre, la conductivité thermique, un paramètre crucial pour les matériaux d'isolation, a été déterminée à l'aide d'une source de plan transitoire (TPS) 2500 [65]. Afin d'obtenir des informations sur les caractéristiques microstructurales et de les corrélérer avec les propriétés macroscopiques observées, des sections transversales polies des échantillons des géopolymères ont été préparées et analysées à l'aide d'une microscopie optique, révélant la distribution des pores et des fibres au sein de la matrice. En outre, en utilisant le logiciel ZEISS Correlate, la technique de corrélation d'image numérique (DIC) (Figure 20) a été employée comme méthode optique sans

contact pour surveiller la propagation des fissures et les modes de rupture sur la surface des échantillons clés sous charge mécanique, fournissant des informations précieuses sur leur mécanismes de défaillance.



3.4. Conclusion

En conclusion, l'étude approfondie des précurseurs utilisés dans cette recherche met en évidence leur impact sur les propriétés du géopolymère cellulaire. Les caractéristiques distinctes du sable concassé, sable de dune et des fibres de lin offrent des possibilités d'optimisation des formulations pour atteindre des performances spécifiques en termes de résistance, de conductivité thermique et de porosité. Comprendre ces caractéristiques est essentiel pour le développement de matériaux géopolymères cellulaire efficaces adaptés aux exigences de diverses applications en génie civil et en construction.

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

4.1 Introduction

Ce chapitre expose les résultats issus d'une analyse approfondie des formulations de géopolymère cellulaire renforcé de fibres de lin (FL) et de sable concassé (SC). Les propriétés mécaniques, thermiques et structurales sont étudiées en fonction des variations de contenu en SC et en FL. De plus, une analyse statistique détaillée est présentée, comprenant l'ajustement des modèles, l'analyse de variance (ANOVA) et la formulation de modèles mathématiques pour prédire les propriétés du géopolymère cellulaire en fonction des variables de formulation. Ces analyses offrent un éclairage approfondi sur les relations entre les paramètres de formulation et les performances du matériau, facilitant ainsi une optimisation précise des compositions de géopolymère cellulaire pour répondre à des critères de conception spécifiques.

4.2. Facteur de moussage

Le facteur de moussage, qui représente le rapport entre le volume final et le volume initial, varie considérablement selon les différents mélanges (Figure 21).

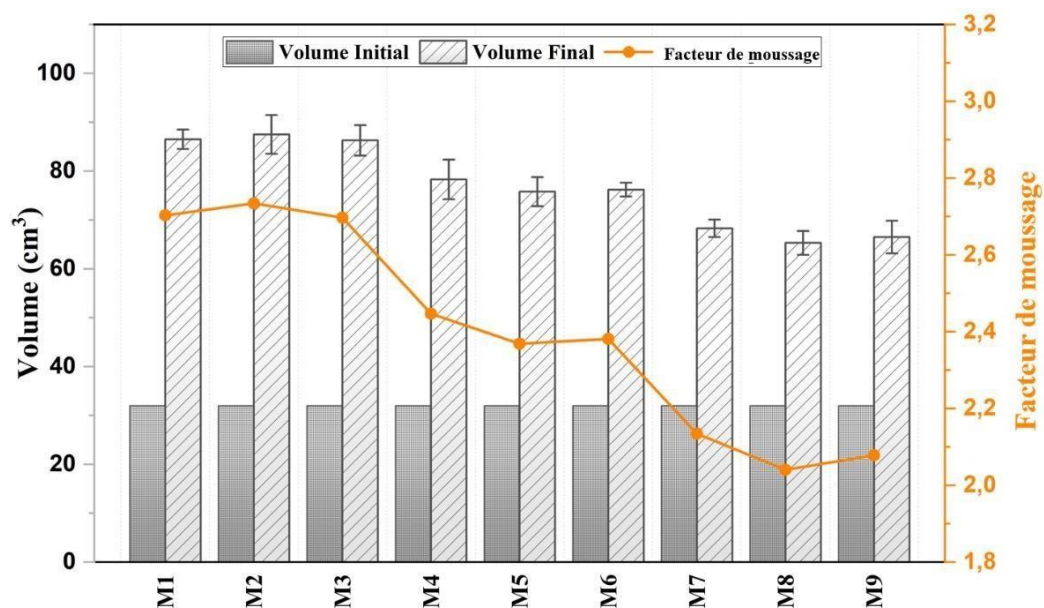


Figure 21 Expansion du volume et facteur de moussage des différents mélanges confectionnés

Une tendance notable est observée où des teneurs plus élevées en SC et FL sont corrélées à une diminution du facteur de moussage. Plus précisément, le mélange témoin M1 présente un facteur de moussage de 2,7, tandis qu'une augmentation de la teneur en SC et FL a entraîné une réduction du facteur de moussage à un minimum de 2,04. Ces tendances peuvent s'expliquer

par les effets contrastés de la SC et du FL sur les propriétés rhéologiques de la pâte géopolymère. La forme angulaire et la surface spécifique plus élevée des particules de SC augmentent probablement la viscosité et la contrainte à l'écoulement de la pâte, rendant plus difficile l'entraînement et la stabilisation des bulles d'air lors du moussage. D'autre part, l'augmentation de la teneur en FL pourrait également entraîner une augmentation excessive de la viscosité et une réduction de la maniabilité, ce qui entraverait le processus de moussage.

4.3. Analyse statistique des modèles

4.3.1. Résumés d'ajustement

Le plan composite centré (PCC) a été utilisé pour formuler des modèles de régression complets pour la masse volumique, la résistance à la compression, la porosité et la conductivité thermique. Le résumé de l'ajustement (tableau 8) montre de solides performances prédictives avec des valeurs R-carré élevées (0,96 à 0,99) indiquant un excellent ajustement du modèle. Les faibles valeurs du coefficient de variation (C.V.) (0,8 % à 9,09 %) reflètent la précision et la fiabilité des prévisions. Les valeurs de réponse moyennes (masse volumique : 1028,63 Kg/m³, CS : 5,28 MPa, porosité : 0,35, conductivité thermique : 0,15 W/mK) fournissent des points de référence pour l'évaluation du modèle.

Tableau 8 Résumé d'ajustement

	Masse volumique (Kg/m ³)	Rés. Compression (MPa)	Porosité	Conductivité thermique (W/mK)
R ²	0.99	0.96	0.99	0.99
R ² Adj	0.99	0.92	0.98	0.99
C.V. (%)	0.8	9.09	1.84	2.28
Moyen de réponse	1028.63	5.28	0.35	0.15

Cette relation peut également être visualisée en traçant les valeurs mesurées par rapport aux valeurs théoriques estimées. Cela est illustré dans la figure 22, qui met en évidence une corrélation significative entre ces deux séries de données.

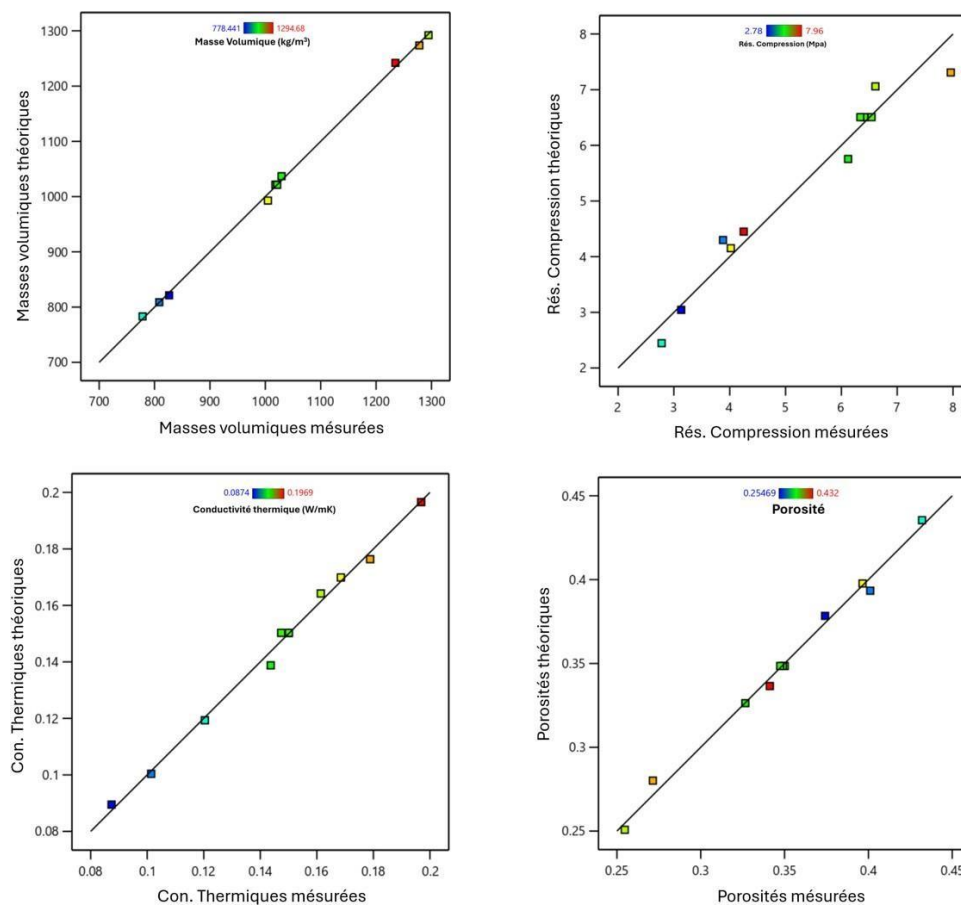


Figure 22 Diagrammes des valeurs mesurées et valeurs théoriques des quatre réponses

En observant la figure 30, on constate que les points sont répartis autour des lignes de régression. Cela suggère que les modèles sont de qualité suffisante, avec une probabilité élevée (de 96% à 99%) d'expliquer les variations observées dans les réponses mesurées. Les modèles fournissent une bonne représentation des phénomènes étudiés.

4.3.2. Analyse des variances

Les résultats de l'ANOVA (tableau 9) mettent en évidence l'impact significatif de la teneur en SC et FL sur les propriétés clés des géopolymères cellulaires. Le SC et les FL exercent individuellement une influence significative sur la masse volumique, la résistance à la compression, la porosité et la conductivité thermique. Bien que l'interaction entre SC et FL (SC*FL) ne soit pas significative pour certaines propriétés, telles que la masse volumique et la conductivité thermique, elle montre un effet marginal sur la porosité et la résistance à la compression. La combinaison de valeurs P très significatives (inférieures à 0,05) et de rapports F élevés dans les résultats de l'ANOVA confirme l'efficacité des modèles pour saisir les

relations entre la composition des géopolymères cellulaires et les variables de réponse. Ces résultats valident l'adéquation des modèles à des fins d'optimisation et de prédiction dans le contexte expérimental.

Tableau 9 Métriques ANOVA

Réponse	Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	Valeur F	Valeur de P	
Masse volumique	Modèle	3.280E+05	5	65597.20	973.85	< 0,0001	Significatif
	SC	3.240E+05	1	3.240E+05	4810.59	< 0,0001	
	FL	2918.94	1	2918.94	43.33	0.0012	
	SC*FL	35.11	1	35.11	0.5213	0.5026	
	SC ²	992.94	1	992.94	14.74	0.0121	
	FL ²	107.60	1	107.60	1.60	0.2620	
Porosité	Modèle	0.0278	5	0.0056	133.97	< 0,0001	Significatif
	SC	0.0193	1	0.0193	464.69	< 0,0001	
	FL	0.0077	1	0.0077	184.64	< 0,0001	
	SC*FL	0.0002	1	0.0002	4.96	0.0765	
	SC ²	0.0003	1	0.0003	8.43	0.0336	
	FL ²	0.0005	1	0.0005	11.19	0.0204	
Résistance à la compression	Modèle	27.98	5	5.60	24.34	0.0016	Significatif
	SC	13.59	1	13.59	59.11	0.0006	
	FL	3.86	1	3.86	16.77	0.0094	
	SC*FL	1.01	1	1.01	4.39	0.0902	
	SC ²	1.25	1	1.25	5.45	0.0668	
	FL ²	6.11	1	6.11	26.59	0.0036	
Conductivité thermique	Modèle	0.0105	5	0.0021	188.89	< 0,0001	Significatif
	SC	0.0087	1	0.0087	780.82	< 0,0001	
	FL	0.0015	1	0.0015	130.84	< 0,0001	
	SC*FL	1.562F-06	1	1.562F-06	0.1409	0.7228	
	SC ²	0.0004	1	0.0004	32.49	0.0023	
	FL ²	0.0000	1	0.0000	3.74	0.1111	

4.3.3. Modèles mathématiques

Dans cette section, nous discutons des équations mathématiques obtenues pour modéliser les propriétés du mélange de géopolymères cellulaire en fonction des variables de composition, notamment le contenu en SC et le contenu en FL. Ces équations ont été développées à partir d'un modèle de régression qui prend en compte les effets linéaires, les interactions et les termes quadratiques des variables.

Pour la masse volumique, l'équation (Eq. 1) montre une relation significative avec le contenu en SC et FL, ainsi que leurs interactions et les termes quadratiques associés. Une augmentation du contenu en SC semble augmenter la masse volumique, tandis que l'effet du contenu en FL dépend de son niveau et de son interaction avec le SC. L'équation de Porosité (Eq. 2) révèle comment le contenu en SC et FL influence la porosité du géopolymère cellulaire. Une augmentation du contenu en SC semble réduire la porosité, tandis que l'effet du contenu en FL peut être négatif, en fonction de son niveau et de son interaction avec le SC.

Pour la résistance à la compression (Eq. 3), l'équation indique une dépendance significative à la fois du contenu en SC et en FL, ainsi que de leurs interactions. Une augmentation du contenu en SC et FL semble augmenter la résistance à la compression, bien que l'effet puisse varier en fonction des niveaux de chaque variable et de leur interaction. En ce qui concerne la conductivité thermique (Eq. 4), l'équation montre comment le contenu en SC et FL affecte la conductivité thermique du géopolymère cellulaire, ainsi que leurs interactions. Une augmentation du contenu en SC semble augmenter la conductivité thermique, tandis que l'effet du contenu en FL peut être mitigé en fonction de son niveau et de son interaction avec le SC.

Les équations spécifiques obtenues sont les suivantes :

$$\text{Masse volumique (Kg/m}^3\text{)} = 1021.39 + 232.392 * SC + 22.0565 * FL + 2.96275 * SC * FL + 19.7978 * SC^2 - 6.51724 * FL^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Porosité} = 0.348487 - 0.0566517 * SC - 0.03571 * FL - 0.007165 * SC * FL - 0.0117434 * SC^2 + 0.0135316 * FL^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{Rés. Compression (MPa)} = 6.50737 + 1.505 * SC + 0.801667 * FL + 0.5025 * SC * FL - 0.703421 * SC^2 - 1.55342 * FL^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{Conductivité thermique (W/mK)} = 0.150288 + 0.0379917 * SC - 0.0155517 * FL - 0.000625 * SC * FL - 0.0119261 * SC^2 + 0.00404395 * FL^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

4.4. Validation et discussions

4.4.1. Masse volumique et porosité

Les surfaces de réponse et les tracés de contour fournis dans la Figure 23 révèlent que la masse volumique et la porosité des géopolymères cellulaires sont intrinsèquement liées et présentent des tendances contrastées par rapport aux contenus en SC et FL. Avec l'augmentation du contenu en SC de 0 % à 100 %, la masse volumique montre une augmentation substantielle, passant de 778,441 kg/m³ à un maximum de 1294,68 kg/m³ (à 100 % de SC et 0,5 % de FL), représentant une augmentation d'environ 66,2 %. En même temps, la porosité diminue de manière significative, avec une porosité minimale de 25,4 % observée à 100 % de SC et environ 0,2 % de FL, en raison de la morphologie et du module de finesse du SC, impactant l'expansion du volume et la formation de mousse. Les particules angulaires de SC avec un module de finesse plus élevé (2,8 contre 2,0 pour le sable de dune) possèdent une surface accrue et une distribution plus fine, perturbant la formation de mousse et réduisant la porosité. Leur forme irrégulière et leur plus grande surface peuvent entraver la stabilisation des bulles d'air, entraînant un effondrement et une cohésion réduite, ce qui se traduit par des mélanges plus denses. La taille de particule plus fine du SC favorise également un emballage plus serré de la matrice, réduisant les espaces vides et les surfaces poreuses (Figure 24-a), augmentant ainsi la densité globale. À mesure que le contenu en SC augmente, le multiple de moussage diminue, renforçant le rôle du SC dans l'entrave à l'expansion et conduisant à des mortiers plus denses avec une moindre porosité.

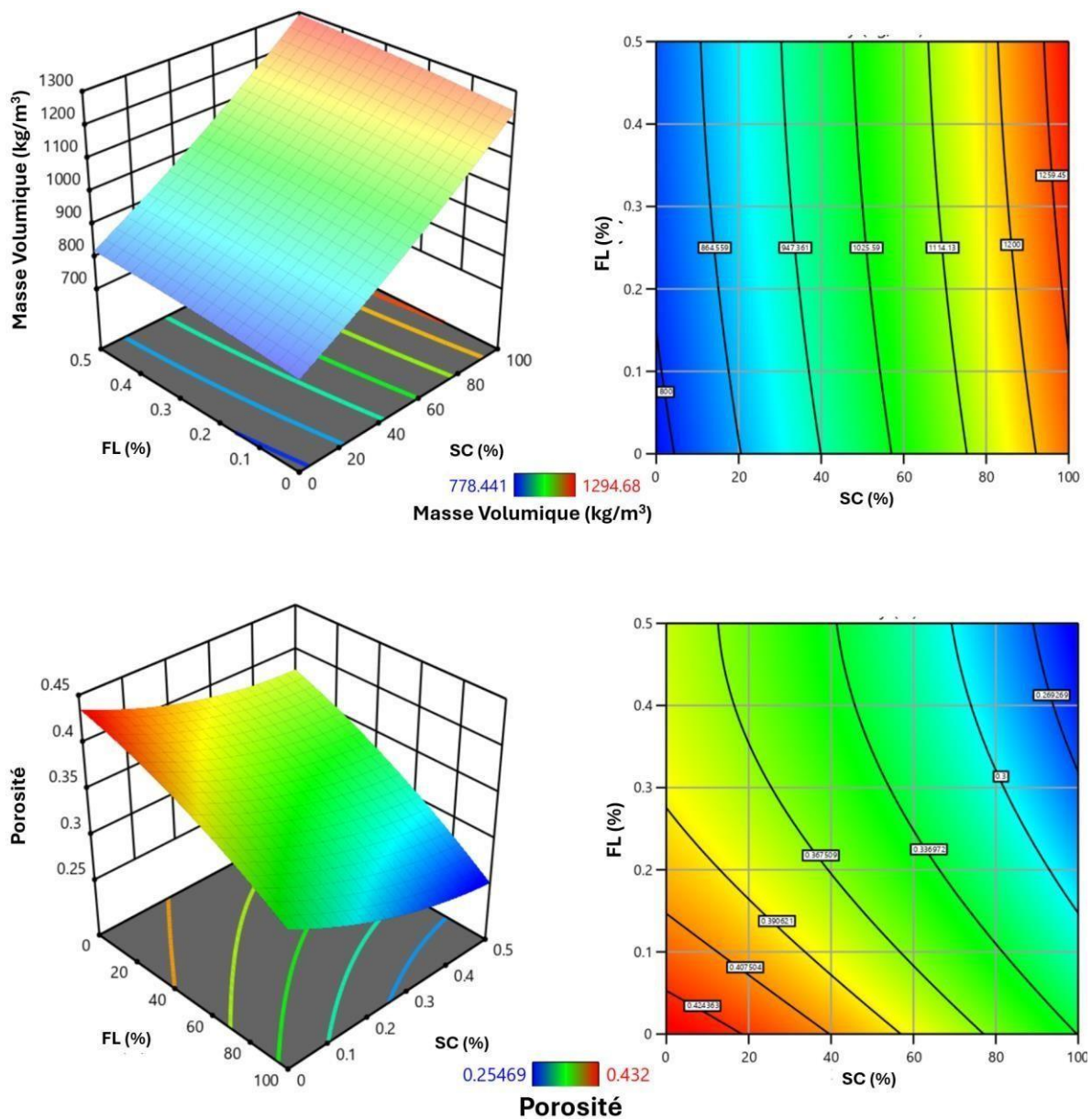


Figure 23 Courbes d'iso-réponse et graphiques de contour de la masse volumique et la porosité

Au même contenu en SC, la masse volumique et la porosité étaient principalement gouvernées par le contenu en FL. À 0 % de SC, l'augmentation du contenu en FL de 0 % à 0,5 % entraîne une augmentation de la masse volumique de 778,441 kg/m³ à environ 900 kg/m³, soit une augmentation d'environ 15,6 %. L'effet du FL sur la porosité présente un comportement similaire. À 0 % de SC, l'augmentation du contenu en FL de 0 % à 0,5 % entraîne une diminution de la porosité de 43,2 % à environ 37,5 %. De même, à un contenu en SC plus élevé, le FL continue de réduire la porosité à une valeur basse de 25 % pour 100 % de SC et 0,5 % de FL, mettant en évidence une interaction synergique entre ces facteurs.

Ce phénomène peut être attribué à la nature hygroscopique du FL, comme rapporté par Rahimi et al. [66], où le FL absorbe et consomme le NaOH en conditions de forte teneur en FL. Cette consommation de NaOH réduit la disponibilité des réactifs pour la réaction de moussage avec la poudre d'aluminium, entraînant une diminution de la formation de mousse et une formation ultérieure de moins de bulles d'air et de pores dans la microstructure du mélange. De plus, la structure désordonnée du FL à des concentrations plus élevées forme un réseau spatial au sein de la pâte géopolymère (comme illustré dans la Figure 24-b). Cette structure en réseau entrave et segmente l'expansion des pores, affectant à la fois leur distribution spatiale et leur taille au sein de la microstructure du géopolymère. Ce phénomène contribue à la réduction observée de la porosité en entravant l'expansion et la connectivité des bulles d'air lors du processus de moussage, influençant ainsi la masse volumique et la porosité globale du matériau géopolymère cellulaire.

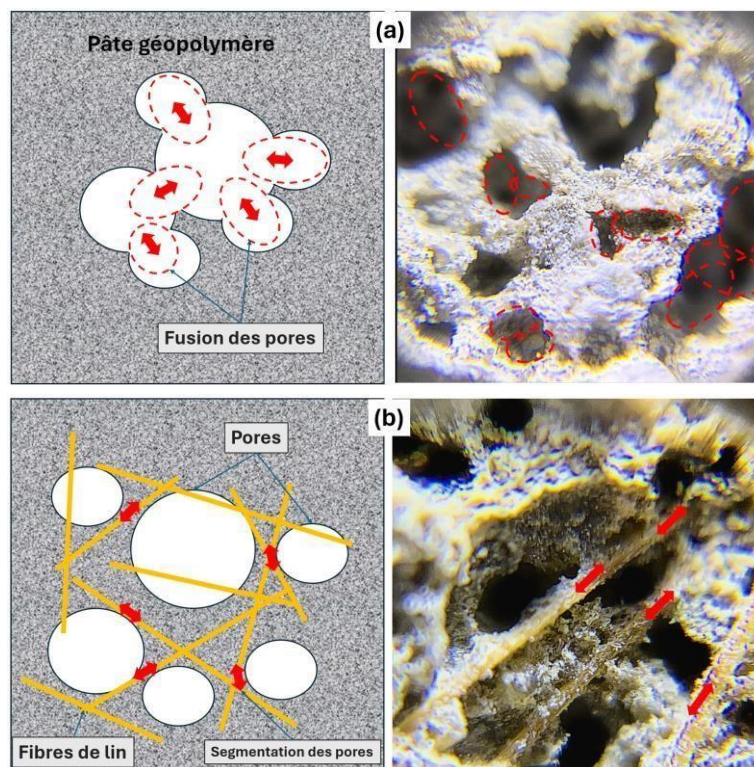


Figure 24 Schémas présentatifs et images optiques de (a) mélange non fibré (b) mélange fibré

4.4.2. Conductivité thermique

Les tests de conductivité thermique ont été réalisés pour évaluer les capacités de transfert de chaleur des géopolymères cellulaires. Les résultats ont indiqué que la conductivité thermique était directement proportionnelle à la densité et inversement proportionnelle à la porosité. Au même contenu en FL, la conductivité thermique augmentait avec l'augmentation du SC (Figure.

25). La conductivité thermique passe de 0,12 W/mK (à 0 % de SC et 0 % de FL) à 0,196 W/mK (à 100 % de SC et 0 % de FL), représentant une augmentation d'environ 63,3 %. Plusieurs facteurs contribuent à l'augmentation observée de la conductivité thermique. Tout d'abord, la phase solide à l'intérieur du mortier (composée de particules de SC, de liant géopolymère et d'autres composants) possède intrinsèquement une conductivité thermique plus élevée par rapport aux pores remplis d'air [67]. Avec l'augmentation du contenu en SC, la fraction de la phase solide augmente également, améliorant ainsi le transfert de chaleur à travers le matériau par conduction de phase solide. De plus, la réduction de la porosité accompagnant le contenu plus élevé en SC contribue à réduire la résistance au transfert de chaleur à l'intérieur du matériau, car il y a moins de poches d'air agissant comme barrières thermiques. Il est important de noter que la convection gazeuse à travers les poches d'air présente généralement une conductivité thermique inférieure par rapport à la conduction de phase solide [68]. De plus, la forme angulaire et la surface accrue des particules de SC favorisent un meilleur contact et une meilleure connectivité au sein de la phase solide du mélange. Ce contact et cette connectivité améliorés favorisent également un transfert de chaleur efficace à travers le matériau, ce qui contribue collectivement à l'augmentation observée de la conductivité thermique avec l'augmentation du contenu en SC.

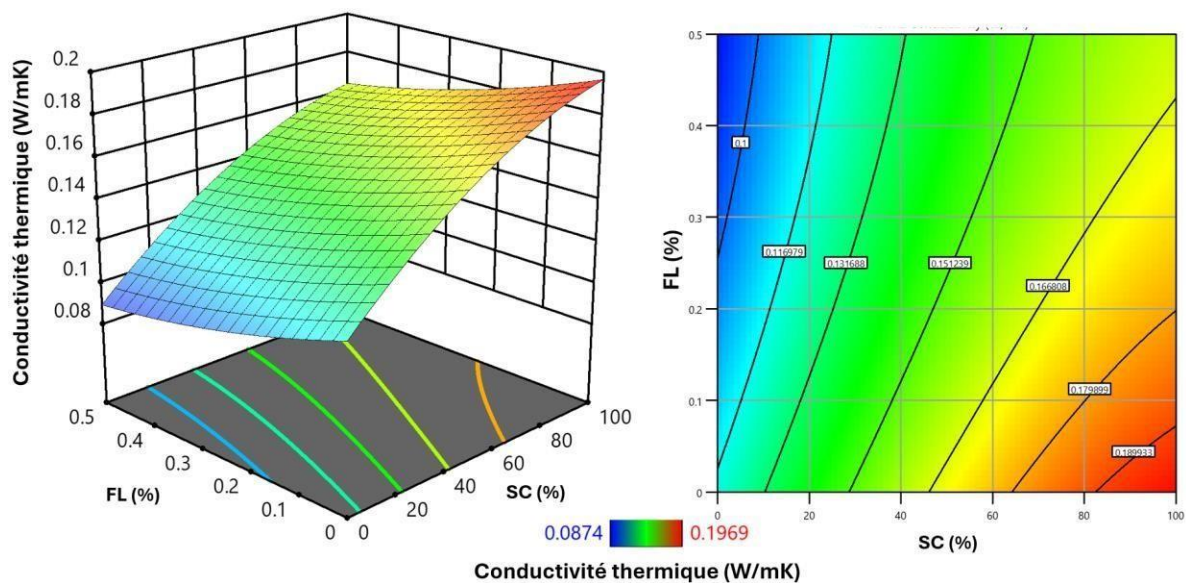


Figure 25 Courbe d'iso-réponse et graphique de contour de la conductivité thermique

En revanche, l'ajout de FL réduit généralement la conductivité thermique, comme en témoigne l'interaction antagoniste représentée dans la surface de réponse (Figure X). L'incorporation de

FL abaisse la conductivité thermique de 0,12 W/mK (à 0 % de SC et 0 % de FL) à 0,09 W/mK (à 0 % de SC et 0,5 % de FL), et de 0,196 W/mK (à 100 % de SC et 0 % de FL) à 0,16 W/mK (à 100 % de SC et 0,5 % de FL), représentant une diminution d'environ 33 % et 22,5 %, respectivement. Cette tendance peut être attribuée à deux facteurs. Tout d'abord, les FL ont une conductivité thermique intrinsèquement faible [69], agissant comme des barrières isolantes qui entravent le transfert de chaleur à travers les géopolymères cellulaires. Deuxièmement, la présence de FL peut perturber la connectivité et le contact au sein de la phase solide de la pâte géopolymère. Cette perturbation peut potentiellement augmenter la résistance au transfert de chaleur à travers le matériau, contribuant ainsi à la diminution observée de la conductivité thermique avec l'ajout de FL.

4.4.3. Résistance à la compression

Les tests de résistance à la compression ont été réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques des géopolymères cellulaires confectionnés. Comme prévu, la résistance à la compression a montré une augmentation constante avec une teneur plus élevée en SC (Figure 26). Plus précisément, la résistance à la compression est passée de 2,47 MPa (à 0 % de SC, 0 % de FL) à 4,48 MPa (à 100 % de SC, 0 % de FL), et de 3,09 MPa (à 0 % de SC, 0,5 % de FL) à 7,08 MPa (à 100 % de SC, 0,5 % de FL), mettant en évidence une amélioration notable de la résistance mécanique associée à des niveaux de SC plus élevés. Cette amélioration peut être attribuée à l'augmentation de la densité et à la réduction de la porosité résultant d'une teneur plus élevée en SC.

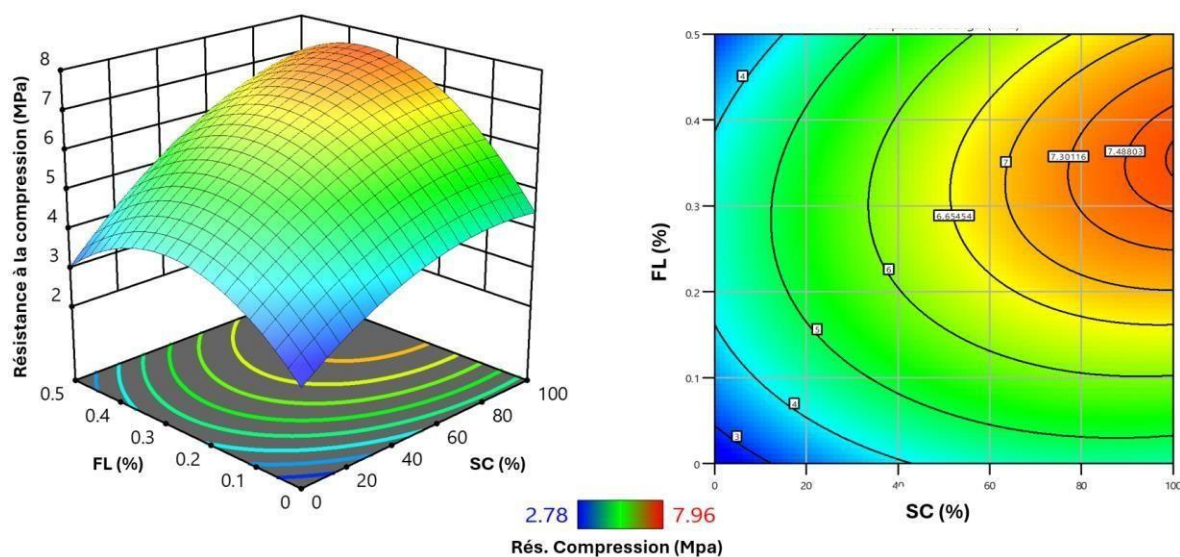


Figure 26 Courbe d'iso-réponse et graphique de contour de la résistance à la compression

Cependant, l'influence de la FL sur la résistance à la compression présente un comportement complexe. À des teneurs en FL plus faibles, l'incorporation de la FL renforce le SC jusqu'à un point optimal (environ 0,35 %), atteignant respectivement 4,02 MPa et 7,58 MPa à 0 % de SC et 100 % de SC. Cette amélioration est probablement attribuée à l'effet de renforcement des fibres, qui peuvent combler les microfissures et améliorer la ténacité et la ductilité des mortiers [70]. La combinaison de cet effet de renforcement avec les caractéristiques de densité et de porosité conférées par le SC contribue à l'augmentation globale observée de la résistance mécanique. Cependant, à mesure que la teneur en FL dépasse le niveau optimal, la résistance à la compression commence à diminuer (7,07 MPa à 100 % de SC et 0,5 % de FL). Cela peut être attribué à la formation potentielle d'agglomérats ou de grappes de fibres [71], qui peuvent créer des défauts et des zones de faiblesse au sein de la matrice géopolymère.

Les modes de rupture obtenus à partir de l'analyse de corrélation d'image (Figure 27) révèlent des comportements mécaniques distincts des géopolymères cellulaires influencés par la teneur en SC et en FL. M1 présente un comportement fragile caractérisé par une rupture soudaine, probablement causée par la propagation de défauts au sein de la matrice. Ce comportement indique un manque de ductilité et une capacité d'absorption d'énergie, typiques du béton cellulaire non renforcé [72]. En revanche, l'incorporation de FL dans M2 présente un mode de rupture plus progressif avec la formation de fissures visibles et de délamination. Ce comportement peut être attribué à l'effet de pontage des fibres [56] [70], qui peuvent transférer efficacement les contraintes à travers les fissures et retarder la rupture complète.

À mesure que la teneur en SC augmente jusqu'à 100 % dans des mélanges comme M7 et M8, les modes de rupture deviennent plus complexes, impliquant une combinaison de fissuration, de délamination. Les particules angulaires de SC contribuent à améliorer l'interverrouillage mécanique et le transfert de contraintes au sein de la matrice géopolymère, tandis que la FL fournit un renforcement et un pontage des fissures, améliorant ainsi la ductilité et la capacité d'absorption d'énergie. Plus précisément, pour M8, le mécanisme de rupture implique probablement une propagation progressive de fissures et une délamination, atténuée par les effets combinés de SC et de FL. La longueur de la fissure a augmenté en raison du transfert de charge entre la matrice géopolymère et les FL, indiquant une liaison continue le long de la microfissure. Cette liaison a efficacement prévenu la rupture fragile dans M8, contribuant à sa propagation lente améliorée des fissures.

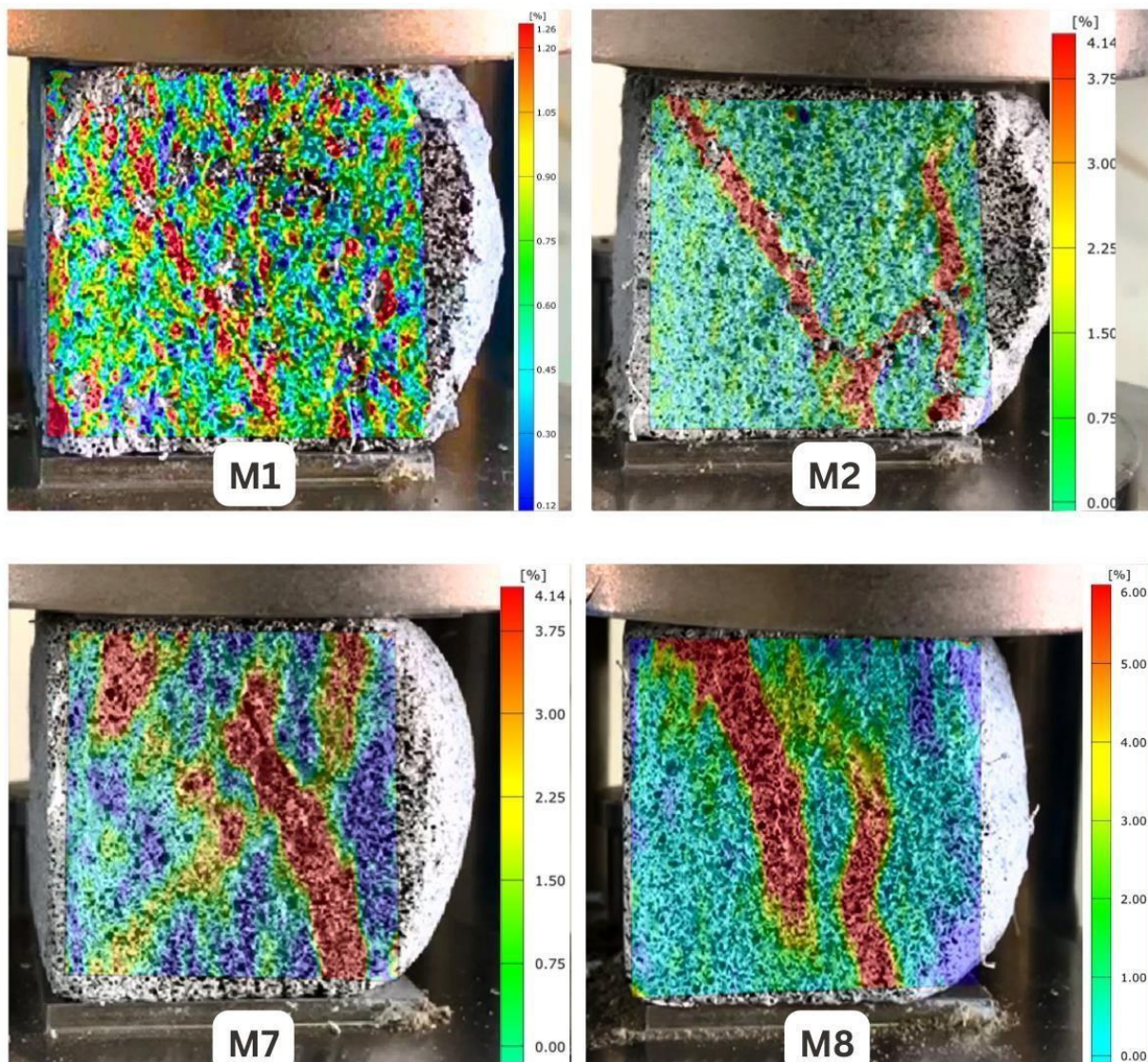


Figure 27 Mode de rupture des mélanges clés obtenu par DIC

4.5. Optimisation

La formulation des géopolymères cellulaires a été optimisée pour maximiser la résistance à la compression et minimiser la conductivité thermique, tout en tenant compte également de la densité et de la porosité. La résistance à la compression et la conductivité thermique ont été privilégiées avec la plus grande importance (niveau 5, poids 0,4 chacune) en raison de leur rôle critique dans la résistance mécanique et l'isolation. La densité et la porosité ont également été incluses (niveau 2, poids 0,1 chacune) en raison de leur impact sur les caractéristiques du matériau (Tableau 10). Cette approche s'est concentrée sur les attributs clés dans l'optimisation de la formulation des géopolymères cellulaires.

Pour élargir cette discussion, nous avons accordé une attention particulière à la sélection des paramètres les plus influents dans l'optimisation de la formulation des géopolymères cellulaires. La résistance à la compression et la conductivité thermique ont été considérées comme des critères essentiels en raison de leur impact direct sur les performances mécaniques et thermiques du matériau. La densité et la porosité ont également été prises en compte pour leur influence sur les propriétés globales du matériau, telles que sa légèreté et sa capacité d'isolation thermique.

Cette approche d'optimisation a impliqué une pondération des attributs en fonction de leur importance relative dans la formulation. Les niveaux de priorité ont été déterminés en tenant compte des objectifs finaux du matériau, visant à maximiser les performances mécaniques tout en optimisant les propriétés thermiques et structurelles.

Tableau 10 Contraintes de désirabilité

Réponse	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids réduit	Poids supérieur	Importance
Masse volumique	Maximiser	778.441	1294.68	0.1	1	3
Rés. Compression	Maximiser	2.78	7.96	0.4	1	5
Con. Thermique	Minimiser	0.0874	0.1969	1	0.4	5
Porosité	Maximiser	0.25469	0.432	0.1	1	3

Le graphique de surface de réponse illustré dans la figure X offre une visualisation claire de la formulation optimisée résultant de l'analyse de désirabilité. La solution optimale recommande une teneur en SC de 37,88 % et l'incorporation de 0,351 % de FL.

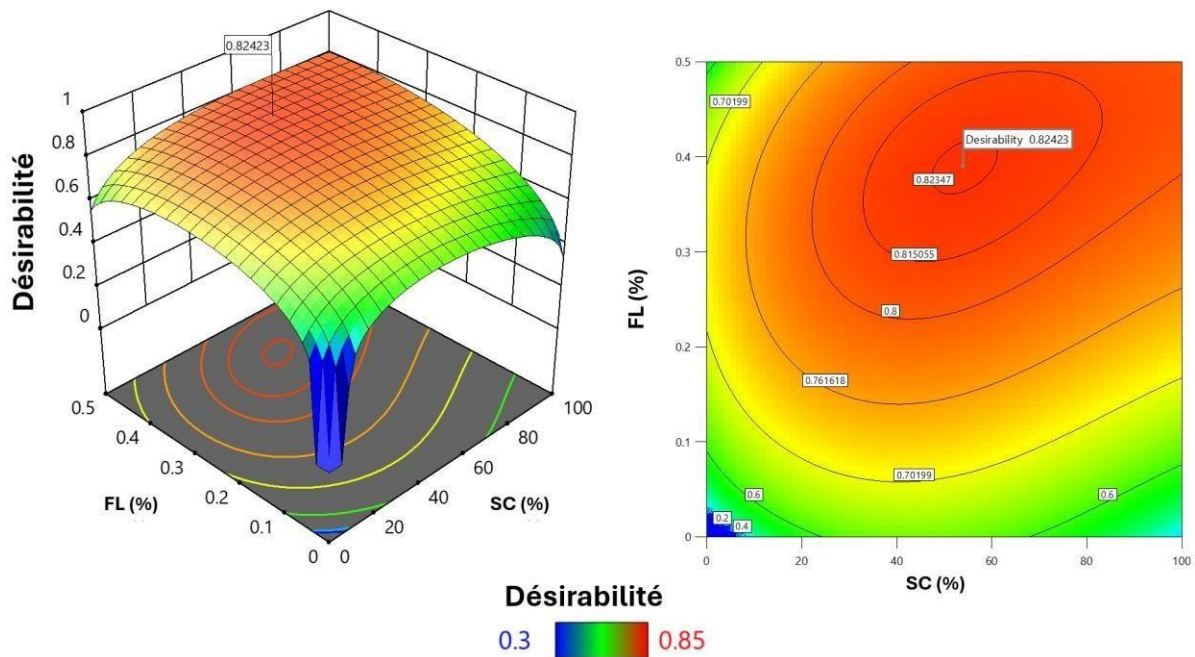


Figure 28 Optimisation des teneurs en sable concassé et fibres de lin

Avec cette formulation optimale, les réponses prédites présentées dans la figure X incluent une masse volumique de 973,81 kg/m³, une résistance à la compression de 6,12 MPa, une porosité de 35 % et une conductivité thermique de 0,13 W/mK.

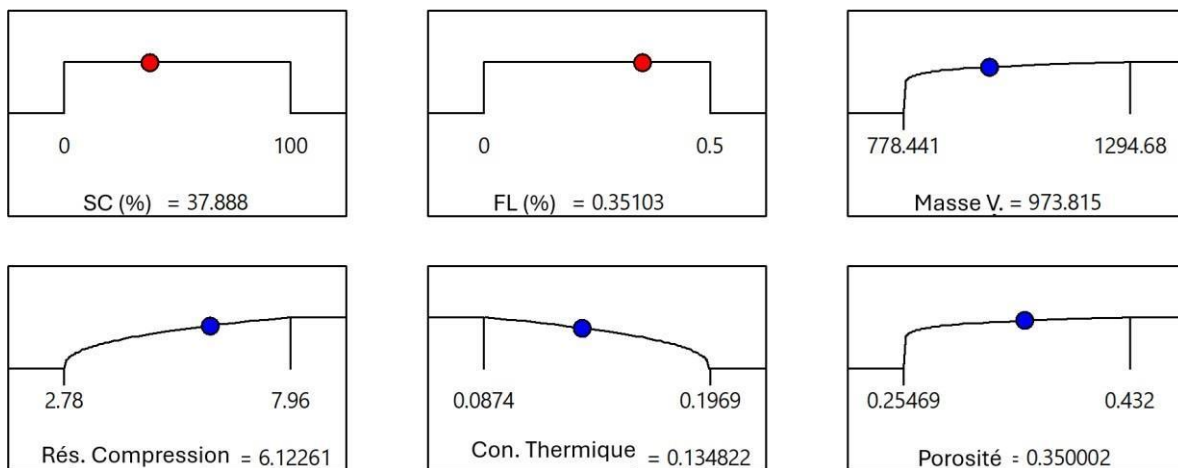


Figure 29 Les réponses optimales obtenues de l'analyse de désirabilité

La valeur globale de désirabilité obtenue est de 0,86, indiquant un niveau élevé de satisfaction par rapport aux objectifs spécifiés et aux niveaux d'importance attribués à chaque variable de

réponse. Cette formulation optimisée représente une combinaison équilibrée répondant aux propriétés mécaniques et d'isolation souhaitées pour le matériau géopolymère cellulaire.

4.6. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons examiné en détail l'impact du contenu en SC et en FL sur les propriétés du géopolymère cellulaire. Les résultats ont mis en évidence l'importance de l'équilibre entre la densité, la résistance à la compression et la conductivité thermique pour optimiser les performances du mortier cellulaire. L'ajustement des modèles mathématiques, l'analyse de variance (ANOVA) et l'approche d'optimisation ont fourni des outils précieux pour comprendre et améliorer la formulation en fonction des exigences spécifiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, cette étude a démontré l'impact significatif du contenu en sable concassé (SC) et en fibres de lin (FL) sur les propriétés du géopolymère cellulaire. Les résultats ont montré que l'augmentation du contenu en SC était fortement corrélée à une augmentation de la masse volumique et de la résistance à la compression du géopolymère cellulaire, tout en réduisant la porosité. Cependant, une densification excessive peut entraîner une augmentation de la conductivité thermique du matériau, ce qui nécessite un équilibre délicat entre les propriétés mécaniques et thermiques.

D'autre part, l'incorporation de fibres de lin (FL) a présenté des effets complexes sur les performances du géopolymère cellulaire. À des niveaux de contenu plus faibles, les FF ont renforcé le béton en améliorant la résistance à la compression grâce à leur capacité de pontage des microfissures. Cependant, des niveaux plus élevés de FL ont entraîné une diminution de la résistance à la compression, probablement en raison de la formation d'agrégats de fibres.

L'analyse statistique approfondie a permis de développer des modèles mathématiques fiables pour prédire les propriétés du géopolymère cellulaire en fonction des variables de formulation. Ces modèles offrent des outils précieux pour l'optimisation des formulations de béton mousse géopolymère afin de répondre à des exigences spécifiques en matière de performances mécaniques et thermiques.

Enfin, l'approche d'optimisation basée sur l'analyse de la désirabilité a permis de déterminer une formulation optimale de géopolymère cellulaire, combinant judicieusement le contenu en SC et en FL pour atteindre des performances équilibrées en termes de densité, de résistance à la compression et de conductivité thermique. Cette formulation optimale représente une avancée significative vers le développement de matériaux de construction durables et performants pour des applications diverses dans le domaine de la construction et du génie civil.

Recommandations

Sur la base des résultats et des conclusions de cette étude, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour orienter les futurs travaux de recherche et les applications pratiques :

- Approfondir l'étude des interactions entre les fibres de lin et le géopolymère cellulaire afin de mieux comprendre les mécanismes responsables des variations de résistance à la compression en fonction du contenu en fibres.
- Étendre la recherche aux effets à long terme du géopolymère cellulaire renforcé par des fibres naturelles, notamment en ce qui concerne la durabilité et la résistance aux environnements agressifs.
- Explorer d'autres types de fibres naturelles et de matériaux de renfort pour diversifier les formulations de béton mousse géopolymère et maximiser leurs performances dans différentes applications de construction.

Ces recommandations offrent des pistes prometteuses pour la poursuite des recherches visant à optimiser les propriétés des matériaux de construction écologiques et durables à base de géopolymères renforcés par des fibres naturelles.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] D. Kumar, M. Alam, P. X. W. Zou, J. G. Sanjayan, et R. A. Memon, « Comparative analysis of building insulation material properties and performance », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 131, p. 110038, oct. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110038.
- [2] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, et S. Schiavoni, « A review of unconventional sustainable building insulation materials », *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 4, p. 1-17, juill. 2015, doi: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.
- [3] T. H. Oh et S. C. Chua, « Energy efficiency and carbon trading potential in Malaysia », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n° 7, p. 2095-2103, sept. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.03.029.
- [4] D. J. Wessel, « Ashrae fundamentals handbook 2001 (si edition) », *Am. Soc. Heat. Refrig. Air-Cond. Eng.*, vol. 31, 2001.
- [5] Dr. M. S. Al-Homoud, « Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials », *Build. Environ.*, vol. 40, n° 3, p. 353-366, mars 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.
- [6] A. Zaidi, « L'impact de l'isolation thermique sur l'efficacité énergétique dans l'habitat collectif à Tébessa », Thesis, 2019. Consulté le: 6 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/http://localhost:8080/jspui/handle/123456789/6648>
- [7] « Ponni: Evaluation of indoor temperature through roof... - Google Scholar ». Consulté le: 6 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Evaluation+of+Indoor+Temperature+through+Roof+and+Wall+Temperatures%E2%80%94+Experimental+Study+in+Hot+and+Humid+Clim+ate&author=Ponni,+M.&author=Baskar,+R.&publication_year=2014&journal=Int.+J.+Eng.+Inno+v.+Technol.+IJET&volume=4&pages=205%E2%80%93211
- [8] M. Squier et C. I. Davidson, « Heat flux and seasonal thermal performance of an extensive green roof », *Build. Environ.*, vol. 107, p. 235-244, oct. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.07.025.
- [9] O. HERIHIRI, « ETUDE DES PROPRIETES MECANIQUES, THERMIQUES ET ACOUSTIQUES DES BETONS DE GRANULATS LEGERS », doctoral, Université Mohamed Khider Biskra, 2022. Consulté le: 6 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://thesis.univ-biskra.dz/6248/>
- [10] S. Fuchsl, F. Rheude, et H. Röder, « Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review », *Clean. Mater.*, vol. 5, p. 100119, sept. 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100119.
- [11] « L'amélioration du DPE par une isolation performante ». Consulté le: 21 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bpdiagnostics.fr/lamelioration-du-dpe-par-une-isolation-performante/>
- [12] A. Zaidi, « L'impact de l'isolation thermique sur l'efficacité énergétique dans l'habitat collectif à Tébessa », Thesis, 2019. Consulté le: 6 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/http://localhost:8080/jspui/handle/123456789/6648>
- [13] M. Łach, « Geopolymer Foams—Will They Ever Become a Viable Alternative to Popular Insulation Materials?—A Critical Opinion », *Materials*, vol. 14, n° 13, Art. n° 13, janv. 2021, doi: 10.3390/ma14133568.
- [14] M. V. Madurwar, R. V. Ralegaonkar, et S. A. Mandavgane, « Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review », *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, p. 872-878, janv. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011.
- [15] J. R. Gasca-Tirado, A. Manzano-Ramírez, et J. L. Reyes-Araiza, « The potential use of geopolymer for cleaning air », in *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic*

- Bonded Fiber Composites*, Elsevier, 2017, p. 221-233. Consulté le: 11 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020012000097>
- [16] N. Böke, G. D. Birch, S. M. Nyale, et L. F. Petrik, « New synthesis method for the production of coal fly ash-based foamed geopolymers », *Constr. Build. Mater.*, vol. 75, p. 189-199, janv. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.041.
- [17] Ellen Grance, M. Paiva, F. Souza Jr, et R. Toledo Filho, « Geopolymer: A Review of Structure, Applications and Properties of Fiber Reinforced Composites », *Res. Dev. Mater. Sci.*, vol. 7, juin 2018, doi: 10.31031/RDMS.2018.07.000666.
- [18] H. Li, Q. Deng, J. Zhang, B. Xia, et M. Skitmore, « Évaluation des émissions de CO₂ du cycle de vie des structures en béton armé : quatre cas en Chine », *J. Clean. Prod.*, vol. 210, p. 1496-1506, févr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.102.
- [19] A. Akbar, F. Farooq, M. Shafique, F. Aslam, R. Alyousef, et H. Alabduljabbar, « Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers », *J. Build. Eng.*, vol. 33, p. 101492, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101492.
- [20] J. Zhang, G. Liu, B. Chen, D. Song, J. Qi, et X. Liu, « Analyse des émissions de CO₂ pour la fabrication du ciment avec des matières premières alternatives : un cadre basé sur l'ACV », *Energy Procedia*, vol. 61, p. 2541-2545, janv. 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.041.
- [21] N. Shehata, E. T. Sayed, et M. A. Abdelkareem, « Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review », *Sci. Total Environ.*, vol. 762, p. 143166, mars 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143166.
- [22] « Qualitative and quantitative optimization of thermal insulation materials: Insights from the market and energy codes », *J. Build. Eng.*, vol. 30, p. 101275, juill. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101275.
- [23] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, et F. Asdrubali, « Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, p. 988-1011, sept. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
- [24] M. Ozel, « Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials », *Energy Build.*, vol. 49, p. 552-559, juin 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.002.
- [25] « Les isolants traditionnels pour les combles », *IsolationCombles.fr*. Consulté le: 23 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://isolationcombles.fr/choisir-son-isolant/isolants-traditionnels/>
- [26] L. LeBucheron, « L'importance de l'isolation écologique pour les bâtiments », *Scierie Sillat*. Consulté le: 21 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://scieriesillat.com/limportance-de-lisolation-ecologique-pour-les-batiments/>
- [27] S. M. Abbasi, H. Ahmadi, G. Khalaj, et B. Ghasemi, « Microstructure and mechanical properties of a metakaolinite-based geopolymer nanocomposite reinforced with carbon nanotubes », *Ceram. Int.*, vol. 42, n° 14, p. 15171-15176, nov. 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.06.080.
- [28] M. H. Rafieipour, A. Nazari, M. A. Mohandesi, et G. Khalaj, « Improvement compressive strength of cementitious composites in different curing media by incorporating ZrO₂ nanoparticles », *Mater. Res.*, vol. 15, p. 177-184, avr. 2012, doi: 10.1590/S1516-14392012005000008.
- [29] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, et H. Wang, « Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction », *Constr. Build. Mater.*, vol. 56, p. 113-127, avr. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
- [30] M. Łach, K. Korniejenko, et J. Mikuła, « Thermal Insulation and Thermally Resistant Materials Made of Geopolymer Foams », *Procedia Eng.*, vol. 151, p. 410-416, janv. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.350.
- [31] K. Dhasindrakrishna, K. Pasupathy, S. Ramakrishnan, et J. Sanjayan, « Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 116, p. 103886, févr. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103886.

- [32] M. Łach, K. Korniejenko, M. Hebdowska-Krupa, et J. Mikuła, « The Effect of Additives on the Properties of Metakaolin and Fly Ash Based Geopolymers », *MATEC Web Conf.*, vol. 163, p. 06005, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201816306005.
- [33] J. Davidovits, « Geopolymers: inorganic polymeric new materials », *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 37, n° 8, p. 1633-1656, 1991.
- [34] A. Fernández-Jiménez et A. Palomo, « Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator », *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, n° 10, p. 1984-1992, 2005.
- [35] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, et J. S. J. van Deventer, « Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties », *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 269, n° 1, p. 47-58, nov. 2005, doi: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060.
- [36] V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, et C. Thaumaturgo, « Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers », *Int. J. Inorg. Mater.*, vol. 2, n° 4, p. 309-317, sept. 2000, doi: 10.1016/S1466-6049(00)00041-6.
- [37] V. O. Shikuku et T. Sylvain, « Application of Geopolymer Composites in Wastewater Treatment: Trends, Opportunities, and Challenges », in *Polymer Nanocomposites for Advanced Engineering and Military Applications*, IGI Global, 2019, p. 131-149. doi: 10.4018/978-1-5225-7838-3.ch005.
- [38] J. L. Provis, « Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? », *Mater. Struct.*, vol. 47, n° 1, p. 11-25, janv. 2014, doi: 10.1617/s11527-013-0211-5.
- [39] T. Glasby, J. Day, R. Genrich, et M. Kemp, « Commercial Scale Geopolymer Concrete Construction ».
- [40] V. Ducman et L. Korat, « Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H₂O₂ as foaming agents », *Mater. Charact.*, vol. 113, p. 207-213, mars 2016, doi: 10.1016/j.matchar.2016.01.019.
- [41] C. Fernández Pereira, Y. Luna, X. Querol, D. Antenucci, et J. Vale, « Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers », *Fuel*, vol. 88, n° 7, p. 1185-1193, juill. 2009, doi: 10.1016/j.fuel.2008.01.021.
- [42] S. Siddique et J. G. Jang, « Acid and sulfate resistance of seawater based alkali activated fly ash: A sustainable and durable approach », *Constr. Build. Mater.*, vol. 281, p. 122601, avr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122601.
- [43] E. K. K. Nambiar et K. Ramamurthy, « Influence of filler type on the properties of foam concrete », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, n° 5, p. 475-480, mai 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001.
- [44] K. Ramamurthy, E. K. Kunhanandan Nambiar, et G. Indu Siva Ranjani, « A classification of studies on properties of foam concrete », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, n° 6, p. 388-396, juill. 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006.
- [45] G. Silva, S. Kim, R. Aguilar, et J. Nakamatsu, « Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry », *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 23, p. e00132, avr. 2020, doi: 10.1016/j.susmat.2019.e00132.
- [46] M. Haque, R. Rahman, N. Islam, M. Huque, et M. Hasan, « Mechanical Properties of Polypropylene Composites Reinforced with Chemically Treated Coir and Abaca Fiber », *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, n° 15, p. 2253-2261, août 2010, doi: 10.1177/0731684409343324.
- [47] S. Prakash Chandar et S. K. Sangeeth Kumar, « Mechanical properties of fiber reinforced concrete – natural fibers: A review », *Mater. Today Proc.*, vol. 68, p. 2066-2071, janv. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.362.
- [48] C. Lv, J. Liu, G. Guo, et Y. Zhang, « The Mechanical Properties of Plant Fiber-Reinforced Geopolymers: A Review », *Polymers*, vol. 14, n° 19, Art. n° 19, janv. 2022, doi: 10.3390/polym14194134.

- [49] J. Sliseris, L. Yan, et B. Kasal, « Numerical modelling of flax short fibre reinforced and flax fibre fabric reinforced polymer composites », *Compos. Part B Eng.*, vol. 89, p. 143-154, mars 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.11.038.
- [50] M. Pervaiz et M. M. Sain, « Carbon storage potential in natural fiber composites », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 39, n° 4, p. 325-340, nov. 2003, doi: 10.1016/S0921-3449(02)00173-8.
- [51] J. L. Provis, « Alkali-activated materials », *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, p. 40-48, déc. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009.
- [52] E. Gallucci et K. Scrivener, « Crystallisation of calcium hydroxide in early age model and ordinary cementitious systems », *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, n° 4, p. 492-501, avr. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.01.001.
- [53] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, et S. K. Bhattacharyya, « Geopolymer concrete: A review of some recent developments », *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, p. 78-90, juin 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.
- [54] H. A. Santana, J. S. Andrade Neto, N. S. Amorim Júnior, D. V. Ribeiro, M. S. Cilla, et C. M. R. Dias, « Self-compacting geopolymer mixture: Dosing based on statistical mixture design and simultaneous optimization », *Constr. Build. Mater.*, vol. 249, p. 118677, juill. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118677.
- [55] J. Rao, Y. Zhou, et M. Fan, « Revealing the Interface Structure and Bonding Mechanism of Coupling Agent Treated WPC », *Polymers*, vol. 10, n° 3, Art. n° 3, mars 2018, doi: 10.3390/polym10030266.
- [56] Belkadi, A. A., Aggoun, S., Amouri, C., Geuttala, A., & Houari, H. (2018). Effect of vegetable and synthetic fibers on mechanical performance and durability of Metakaolin-based mortars. *Journal of adhesion science and Technology*, 32(15), 1670-1686.
- [57] A. R. G. de Azevedo *et al.*, « Natural Fibers as an Alternative to Synthetic Fibers in Reinforcement of Geopolymer Matrices: A Comparative Review », *Polymers*, vol. 13, n° 15, Art. n° 15, janv. 2021, doi: 10.3390/polym13152493.
- [58] Y. Pan, L. Deng, S. Li, J. Wang, et F. Zhang, « A study using a combined method of scientometric and manual analysis to review the present research of plant fibres reinforced concrete », *Constr. Build. Mater.*, vol. 341, p. 127551, juill. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127551.
- [59] R. Makkeb, « Mortier autoplaçant avec addition de sable de dunes: propriétés rhéologiques et mécaniques », PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2023. Consulté le: 11 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.umtmo.dz/dspace/bitstream/umtmo/22171/1/Makkeb%2C%20Randa.pdf>
- [60] C. Dad, « Etude comparative de l'utilisation du sable de dune en substitution du sable de rivière: cas des mortiers normalisés », PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2019. Consulté le: 8 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.umtmo.dz/dspace/bitstream/umtmo/10285/1/dad%20celia.pdf>
- [61] Q. Li, L. Ibrahim, W. Zhou, M. Zhang, et Z. Yuan, « Treatment methods for plant fibers for use as reinforcement in cement-based materials », *Cellulose*, vol. 28, n° 9, p. 5257-5268, juin 2021, doi: 10.1007/s10570-021-03903-w.
- [62] C. ASTM, « 1701; Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete », *Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken PA USA*, 2017.
- [63] A. B. D. N. Técnicas, « NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos—Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica », *Rio Jan.*, 2005.
- [64] A. Standard, « ASTM C109-standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars », *ASTM Int. West Conshohocken PA*, 2008.
- [65] I. ISO, « 22007-2 Plastics—Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity—Part 2: Transient Plane Heat Source (Hot Disc) Method », *ISO Geneva Switz.*, 2015.

- [66] M. Rahimi, A. Omran, et A. Tagnit-Hamou, « Role of homogenization and surface treatment of flax fiber on performance of cement-based composites », *Clean. Mater.*, vol. 3, p. 100037, 2022.
- [67] N. Ranjbar et M. Zhang, « Fiber-reinforced geopolymer composites: A review », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 107, p. 103498, 2020.
- [68] X. Qian, J. Zhou, et G. Chen, « Phonon-engineered extreme thermal conductivity materials », *Nat. Mater.*, vol. 20, n° 9, p. 1188-1202, 2021.
- [69] K. Malik *et al.*, « A Review of Flax Fiber Reinforced Thermoset Polymer Composites: Thermal-Physical Properties, Improvements and Application », *J. Nat. Fibers*, vol. 19, n° 15, p. 10412-10430, nov. 2022, doi: 10.1080/15440478.2021.1993507.
- [70] N. Kouta, J. Saliba, et N. Saiyouri, « Fracture behavior of flax fibers reinforced earth concrete », *Eng. Fract. Mech.*, vol. 241, p. 107378, 2021.
- [71] H. M. Hamada, J. Shi, M. S. Al Jawahery, A. Majdi, S. T. Yousif, et G. Kaplan, « Application of natural fibres in cement concrete: A critical review », *Mater. Today Commun.*, p. 105833, 2023.
- [72] E. A. Flores-Johnson et Q. M. Li, « Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces », *Compos. Struct.*, vol. 94, n° 5, p. 1555-1563, 2012.