



جامعة برج بوعريـرج - محمد البشير الإبراهيمي-
University of Bordj Bou Arreridj
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Science and Technology



République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الـلابراهيمـي برج بوعريـرج
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 et étude des propriétés de géopolymères intégrant des des fines et des granulats légers perlite et fibres de chanvres

Réalisé par :

- Radhia Chihab
 - Alima Bouaissi
- BELKADI

Encadrants :

Dr. Dridi Meriem
Dr. Ahmed Abderraouf

Soutenu le : 03/06/2026

Nom &Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
Dr. Loumachi Lazher	MCB	Président	Univ-BBA
Dr. Dridi Meriem	MCB	Encadrant	Univ-BBA
Dr. Belkadi Ahmed Abderraouf	MCA	Encadrant	Univ-BBA
Dr. Maafi Nabil	MCA	Examineur	Univ-BBA
Dr. Khanouf Abdelaziz	MCB	Examineur	Univ-BBA

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اهداء:

هما كتبت من عبارات لن أجد أصدق من قول الله تعالى في كتابه المنزه بعد بسم الله الرحمن الرحيم ذلك فضل الله علينا وعلى الناس ولكن أكثر الناس لا يشكرون. فالحمد لله الذي وفقنا لهذا العمل

فإلى والديّ العزيزين، حفظهما الله، اللذين كانا سندي ودعمي طوال مشواري الدراسي رحمهما الله كما ربونا صغارا وإلى رفيقتنا حسبية التي شجعتنا ووقفت بجانبنا في لحظات التعب والاقوات الصعبة فاللهم اجزها عنا خير الجزاء فليس هناك ما يوافي دعمها
إلى أساتذتي الكرام، الذين أناروا طريقي بالعلم والمعرفة
وإلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذه المذكرة
ونفسي التي قالت أنا لها سأنالها وها أنا اليوم أقف على عتبة تخرجني
وفي الأخير أهديهم ثمرة جهدي المتواضع هذا، راجيةً من الله التوفيق والنجاح. وما أصبنا فمن الله وما أخطأنا فمن أنفسنا

Remerciements:

Après avoir terminé ce travail, nous remercions le Tout-Puissant qui nous a donné le courage, la patience, la volonté et la force de faire face à toutes les difficultés et obstacles rencontrés tout au long de nos années d'études.

Nous ne pouvons pas terminer ce travail sans remercier plusieurs personnes qui ont contribué à la réalisation de ce rapport.

Nous tenons à exprimer notre gratitude particulièrement aux personnes qui ont répondu au questionnaire. Sans leurs réponses, cette étude n'aurait pas pu voir le jour.

À l'enseignant qui a apporté une contribution précieuse et des conseils précieux tout au long de ce travail. (dr belkadi ,dridi)

Au président du comité d'évaluation et aux membres du comité pour avoir accepté d'évaluer et d'enrichir ce rapport de leurs connaissances et de leurs conseils.

À tous ceux qui ont soutenu, encouragé et aidé à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous pour votre soutien et votre coopération. C'est grâce à vous que j'ai pu mener à bien ce travail avec succès.

Grâce à vous tous, mes rêves sont devenus réalité

Résumé:

Face aux enjeux environnementaux actuels et à l'empreinte carbone élevée du ciment Portland traditionnel, le développement d'éco-matériaux de construction s'impose comme une alternative durable. Ce travail de mémoire est consacré à l'étude des performances physico-mécaniques de matrices géo polymériques basées sur l'activation alcaline du laitier de haut fourneau (LHF). L'originalité de cette recherche repose sur l'hybridation de cette matrice par la substitution du sable siliceux par un granulat volcanique expansé ultraléger (la perlite) à des taux de 0 %, 50 % et 100 %, combinée à un renforcement par des fibres végétales de chanvre introduites à des dosages de 0 %, 0,15 % et 0,3 % par rapport à la masse. Les propriétés de ces composites ont été caractérisées à l'état frais par l'essai d'étalement, et à l'état durci après 7, 28 et 90 jours de cure (résistances à la compression et à la flexion, masse volumique sèche et porosité). Les résultats expérimentaux révèlent que l'intégration de la perlite améliore la fluidité à l'état frais et allège considérablement le matériau, bien qu'une substitution totale (100 %) entraîne une baisse des résistances mécaniques due à une porosité accrue. À l'inverse, l'ajout de fibres de chanvre réduit l'ouvrabilité mais compense la fragilité de la matrice grâce à un mécanisme de pontage des fissures. L'analyse globale montre qu'une excellente synergie est obtenue avec la formulation optimale M50-0.3 (50 % de perlite et 0,3 % de fibres de chanvre), qui permet d'atteindre des résistances remarquables à la compression (jusqu'à 60 MPa à 90 jours). Ce composite hybride offre ainsi un excellent compromis entre légèreté, isolation potentielle et hautes performances structurelles pour l'éco-construction en Algérie

Mots-clés : Géopolymère, Laitier de haut fourneau, Perlite, Fibres de chanvre, Éco-matériaux, Résistance mécanique, Allègement.

الملخص:

في مواجهة التحديات البيئية الحالية والبصمة الكربونية العالية للإسمنت البورتلاندي التقليدي، أصبح تطوير مواد بناء صديقة للبيئة بديلاً مستداماً وضرورياً. يركز هذا البحث في مذكرة الماستر على دراسة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمصفوفات وتكمن أصالة هذا العمل في تهجين هذه المصفوفة من (LHF) الجيوبوليمرية القائمة على التنشيط القلوي لخبث أفران الصهر العالية خلال الاستبدال الجزئي أو الكلي للمرمل السيليسي بركام بركاني ممدد وفائق الخفة (البرليت) بنسب (0%، 50%، و100%)، مصحوباً بتدعيم بألياف نباتية طبيعية (ألياف القنب) مضافة بجرعات (0%، 0.15%، و0.3%) بالنسبة للكتلة. تم تمييز خصائص هذه المركبات في الحالة الطازجة من خلال اختبار التدفق (الانسياب)، وفي الحالة المتصلدة بعد (7، 28، و90 يوماً) من المعالجة (مقاومة الانضغاط والانحناء، الكثافة الحجمية الجافة، والمسامية). أظهرت النتائج التجريبية أن دمج البرليت يحسن بشكل كبير من سيولة الخليط في الحالة الطازجة ويخفف من وزن المادة، على الرغم من أن الاستبدال الكامل (100%) يؤدي إلى انخفاض في المقاومة الميكانيكية بسبب زيادة المسامية. في المقابل، فإن إضافة ألياف القنب تقلل من قابلية التشغيل ولكنها تعوض هشاشة **M50-0.3** وأظهر التحليل العام أنه تم تحقيق توافق ممتاز ومثالي في الصيغة (Pontage) المصفوفة بفضل آلية تجسير الشقوق (50% برليت و0.3% ألياف القنب)، والتي سمحت بالوصول إلى مقاومة انضغاط ملحوظة (تصل إلى 60 ميغاباسكال عند 90 يوماً). وبالتالي، يقدم هذا المركب الهجين حلاً وسطاً ممتازاً بين خفة الوزن، العزل الحراري المحتمل، والأداء الهيكلي العالي لصالح البناء المستدام والصديق للبيئة في الجزائر

الكلمات المفتاحية: جيوبوليمر، خبث أفران الصهر العالية، برليت، ألياف القنب، مواد صديقة للبيئة، المقاومة الميكانيكية، تخفيف الوزن..

Abstract :

in response to current environmental challenges and the high carbon footprint of traditional Portland cement, the development of eco-friendly construction materials has become a sustainable alternative. This Master's thesis focuses on investigating the physico-mechanical performance of geopolymer matrices based on the alkaline activation of blast furnace slag (BFS). The originality of this research lies in the hybridization of this matrix by replacing siliceous sand with an ultra-lightweight expanded volcanic aggregate (perlite) at substitution rates of 0%, 50%, and 100%, combined with reinforcement using natural hemp fibers added at dosages of 0%, 0.15%, and 0.3% by weight. The properties of these composites were characterized in the fresh state using the slump flow test, and in the hardened state after 7, 28, and 90 days of curing (compressive and flexural strengths, dry bulk density, and porosity). Experimental results reveal that the inclusion of perlite significantly improves fresh-state fluidity and reduces overall material density, although total substitution (100%) leads to a decrease in mechanical strength due to higher porosity. Conversely, adding hemp fibers reduces workability but mitigates matrix brittleness through a crack-bridging mechanism. The overall analysis demonstrates that an excellent synergy is achieved with the optimal formulation **M50-0.3** (50% perlite and 0.3% hemp fibers), yielding remarkable compressive strengths (up to 60 MPa at 90 days). This hybrid composite thus offers an outstanding compromise between lightness, potential insulation, and high structural performance for eco-construction

Keywords: Geopolymer, Blast furnace slag, Perlite, Hemp fibers, Eco-materials, Mechanical strength, Lightweight aggregates

Table des matières :

اهداء.....	3
Remerciements:	4
Résumé	5
الملخص	6
Abstract :	7
Introduction :	16
Chapitre1 : géopolymères généralités et état de l'art	18
Introduction :	19
1.1 Définition et principe de la géo polymérisation :	19
1.2 Matières premières utilisées dans les géopolymères :	20
1. 2.1 Sources alumino-silicatées (Précurseurs) :	20
1.2.2 Activateurs alcalins :	21
1.3 Paramètres influençant la géo polymérisation	22
1.3.1 Influence de la composition chimique :	22
1.3.2 Rôle des conditions de cure :	23
1.3.3. Importance du rapport molaire Si/Al :	23
1.4. Propriétés des géopolymères :	24
1.5 Applications des géopolymères dans le génie civil :	24
Conclusion :	25
Chapitre 2 : Géopolymères légers à base de fines et de perlite Renforcé par des fibres végétales ..	26
Introduction :	27
2.1 Généralités sur les Matériaux Composites :	27
2.2 Classification des Composites :	28
2.3 Rôle des fines dans les matrices géo polymériques :	28
2.4 Rôle du sable gros dans les matrices géo polymériques :	29
2.4.1: Stabilisation dimensionnelle et contrôle du retrait :	29

2.4.2 : Amélioration des propriétés mécaniques :.....	29
2.4.3 : Aspect économique et thermique :	29
2.5 : Granulats légers : classification et caractéristiques :	30
2.5.1 Classification des granulats légers :	30
2.5.2 Caractéristiques fondamentales :	31
2.6. La perlite : origine, propriétés et domaines d'application :	31
2.6.1: Origine et processus d'expansion	32
2.6.2 : Propriétés physico-chimiques :	32
2.6.3 : Domaines d'application :	32
2.6.3.1 Microstructure et phénomène d'expansion thermique :	33
2.6.3.2 Réactivité pouzzolanique en milieux alcalins :	33
2.6.3.3 : Performances thermiques et résistance au feu :	33
2.7 : Les fibres : classification, caractéristiques et rôle structurel :	34
2.7.1 : Classification des types de fibres :	34
2.7.2 Les fibres végétales : un renforcement biosourcé :	35
2.7.3 Le rôle des fibres dans le composite :	35
2.8 Importance de l'isolation pour l'efficacité énergétique :	35
2.8.1 Un rôle déterminant :	35
2.8.2 Le cas spécifique de l'Algérie :	36
2.9 Effet de l'incorporation de la perlite et des fibres dans les géopolymères :	37
2.9.1 : Propriétés mécaniques (Comportement et Résistance) :	37
2.9.2 Propriétés thermiques et physiques :	38
2.10 État de l'art sur les géopolymères allégés :	38
2.10.1 Évolution des techniques d'allègement :	38
2.10.2 Tendances récentes (2020-2026) :	39
Conclusion :	39
Chapitre 3 : Matériaux et méthodologie expérimentale	41
Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
3.1 Matériaux utilisés :	42
3.1.1. Précurseurs :	42
3.2.2. Activateurs :	43
3.2.2.1. Soude caustique :	43
3.2.2.2. Silicates de sodium :	44
3.3 La perlite :	46

3.4 Le Fibres :	47
3.4.1 Caractéristiques Techniques de la Fibre :	47
3.4.2 Avantages dans les Matériaux Allégés :	47
3.4.3 Les Défis de l'Usage en Milieu Alcalin :	48
3.4.4 Traitements de Surface Préconisés :	48
3.4.5 Synthèse pour la Recherche :	48
3.5 Formulations des géopolymères développés :	49
3.6 Préparation des mélanges et mise en œuvre :	49
3.6.1 Moulage et Compactage :	50
3.7 Méthodes d'essais expérimentaux :	51
3.7.1 Essais à l'état frais :	52
3.7.2 Essais à l'état durci :	53
3.7.3 Essais thermiques :	55
Porosité : Méthodologie expérimentale	55
Chapitre 4 : Résultats et discussion	57
Introduction	58
Etalement :	58
Résistance à la compression :	60
Masse volumique :	63
Conclusion	66
Conclusion generale :	67
Références :	68

List de figure :

Figure1 : Une vision atomique des alternatives au ciment respectueuses de l'environnement.

Figure 2 :meta kaowlin

Figure3 : Cendres volantes

Figure 4 : laitier de haut fourneau

Figure 5 : NaOH

Figure 6 : silicate alcalin

Figure 7 : Structure chimique

Figure 8 : importance du rapport molaire et son influence sur la structure et les propriétés des géopolymères

Figure 9 : matériaux composites

Figure 10 : La perlite

Figure11 : la fibre

Figure12 : Monde enter : Consommation d'énergie (millions de tonnes équivalent pétrole) et émissions de CO₂

Figure 13 : Courbes granulométriques des LHF.

Figure 14 : Préparation de la solution NaOH

Figure 15 : Silicates de sodium

Figure 16: Morphologies des sables utilisés

Figure 16 : Granulométries des sables utilisés

Figures 17 : Histogramme représentant la composition centésimale des mélanges

Figure 18 : Préparation des mélanges

Figure 19 : Moulage et Compactage

Figure 20 : éprouvette prismatique et coup

Figure 21 : étalement

Figure 22 : essai à l'Etat frais

Figure 23 : essai mécanique flexion

Figure 24 : essai mécanique compression

Figure 25 : préparation de l'essai

Figure 26 : Influence de la substitution du sable siliceux par la perlite et de l'incorporation des fibres de chanvre sur l'étalement des géopolymères à base de laitier.

Figure 27 : Évolution de la résistance à la compression des géopolymères en fonction du taux de substitution en perlite et du dosage en fibres de chanvre à 7, 28 et 90 jours.

Figure 28 : Évolution de la résistance à la flexion des géopolymères selon le taux de substitution du sable siliceux par la perlite et le dosage en fibres de chanvre à différents âges de cure

Figure 29 : Variation de la masse volumique à l'état sec des géopolymères en fonction du taux de substitution du sable siliceux par la perlite et de l'ajout de fibres de chanvre.

Figure 30 : Influence de la substitution du sable siliceux par la perlite et des fibres de chanvre sur la porosité accessible à l'eau des géopolymères

List de tableau :

Tableau 1 : Classification des granulats légers.

Tableau 2 : Composition chimique de LHF

Tableau 3 : Propriétés physiques de LHF

Tableau 4 : Composition chimique de la soude caustique

Tableau 5 : Caractéristiques des silicates de sodium utilisées

Tableau 6 : Propriétés physiques des sables utilisés

Tableau 7 : les impacts du chanvre

Tableau 8 : Formulations des géopolymères développés

Tableau 9 : la masse volumique

Tableau 10 : tableau des masses





Introduction :

L'expansion accélérée du secteur de la construction à l'échelle mondiale rend cruciale l'adoption de méthodes de construction durables. Toutefois, ce progrès peut être entravé par l'utilisation de matériaux conventionnels, tels que le ciment Portland, qui contribuent de manière significative aux émissions de CO₂, à la consommation d'énergie et à l'épuisement des ressources.

Le géopolymère est un matériau cimentaire qui a suscité un grand intérêt au cours des dernières décennies. Développé initialement dans les années 1970 par Joseph Davidovits, puis par d'autres chercheurs, son étude s'est intensifiée avec l'entrée en vigueur de la réglementation RE2020, qui impose des normes de construction bas carbone.

Les matériaux géopolymères sont principalement composés de liants inorganiques (cendres volantes, laitier de haut fourneau, etc.) activés dans un environnement alcalin fort. Leur structure tridimensionnelle, formée de tétraèdres de Al_2O et SiO liés par des atomes d'oxygène, leur confère des propriétés mécaniques supérieures et une stabilité chimique à long terme, ce qui en fait une alternative prometteuse au ciment traditionnel.

L'intégration de matériaux additifs, tels que la perlite, présente des avantages majeurs : c'est un matériau chimiquement inerte qui ne produit pas de substances nocives, réduit la masse volumique (facilitant le transport et la mise en œuvre) et favorise une structure poreuse offrant une excellente isolation thermique et acoustique. De même, l'utilisation de granulats fins joue un rôle crucial dans le remplissage des vides, l'amélioration de la résistance mécanique, la maniabilité lors du mélange, ainsi que la réduction du retrait et de la fissuration.

Cependant, les géopolymères, à l'instar du béton conventionnel, présentent une faible résistance à la traction et à la flexion. Il est donc d'incorporer des agents de renforcement, qu'ils soient naturels (fibres végétales) ou synthétiques. À cet égard, les fibres végétales constituent l'une des solutions les plus viables nécessaire économiquement et écologiquement, offrant de bonnes propriétés mécaniques et un module d'élasticité élevé.

Face au défi de réduire l'empreinte environnementale des infrastructures, l'utilisation du géopolymère s'impose comme une solution durable. L'intégration de composants de renfort tels que les fibres végétales, la perlite et les granulats fins — tant sur le plan qualitatif que quantitatif — influence considérablement les propriétés du matériau. Cela nécessite encore des études approfondies, notamment sur la résistance mécanique, la rigidité et la densité. D'où la problématique suivante : Comment l'intégration de ces matériaux de renfort avec des liants inorganiques peut-elle permettre d'obtenir un matériau léger et écologique sans compromettre ses performances structurelles ?

- Cette thèse se compose d'une introduction liminaire, de quatre chapitres pivots, suivis d'une conclusion synthétique présentant le bilan scientifique établi. Le premier chapitre est consacré à l'établissement d'un cadre théorique sur le géopolymère, ses paramètres de réaction et ses domaines d'applications structurelles. Le deuxième chapitre porte sur l'étude des particules fines et leur rôle dans la structure des matrices géopolymères, avec une analyse des propriétés physico-chimiques des granulats légers (perlite) et des fibres végétales, tout en examinant l'effet de leur incorporation sur l'amélioration de l'efficacité thermique, ainsi qu'une revue des technologies innovantes dans ce domaine. Le troisième chapitre est dédié à la caractérisation des matières premières, à la méthodologie de préparation et au protocole expérimental adopté. Enfin, le quatrième chapitre se consacre à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux relatifs aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité du géopolymère composite renforcé par des fibres naturelles et de la perlite."

Chapitre1 : géopolymères généralités et état de l'art

Introduction :

Les géopolymères sont des matériaux récents qui suscitent un grand intérêt dans le domaine du génie civil, en raison de leur potentiel en tant qu'alternative écologique au ciment traditionnel. Ces matériaux reposent sur la réaction entre des sources aluminosilicatées et des activateurs alcalins, conduisant à la formation d'une structure solide présentant de bonnes propriétés mécaniques et thermiques.

Ce chapitre vise à présenter une vue d'ensemble des géopolymères, en abordant leur définition et leurs principes de base, les matières premières utilisées, ainsi que les paramètres influençant le processus de géo polymérisation, tout en mettant en évidence leurs principales propriétés et applications dans le domaine de la construction.

1.1 Définition et principe de la géo polymérisation :

Les géopolymères sont des matériaux inorganiques obtenus par l'activation alcaline de matières riches en aluminosilicates, telles que le méta kaolin, les cendres volantes ou les laitiers [1]. Cette réaction conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel amorphe constitué principalement de liaisons Si–O–Al, ce qui confère au matériau de bonnes propriétés mécaniques et une excellente durabilité [2].

Le principe de la géo polymérisation repose sur plusieurs étapes fondamentales. Tout d'abord, la dissolution des espèces silicatées et alumineuses se produit sous l'effet d'un activateur alcalin (NaOH , Na_2SiO_3) [1]. Ensuite, ces espèces dissoutes subissent une réorganisation suivie d'une polycondensation, formant un gel aluminosilicaté [3]. Enfin, ce gel durcit progressivement pour donner une structure solide et stable.

Ce processus est influencé par plusieurs paramètres, notamment la nature des matières premières, la concentration des solutions alcalines, le rapport Si/Al et les conditions de cure, qui déterminent les propriétés finales du matériau [2].photo

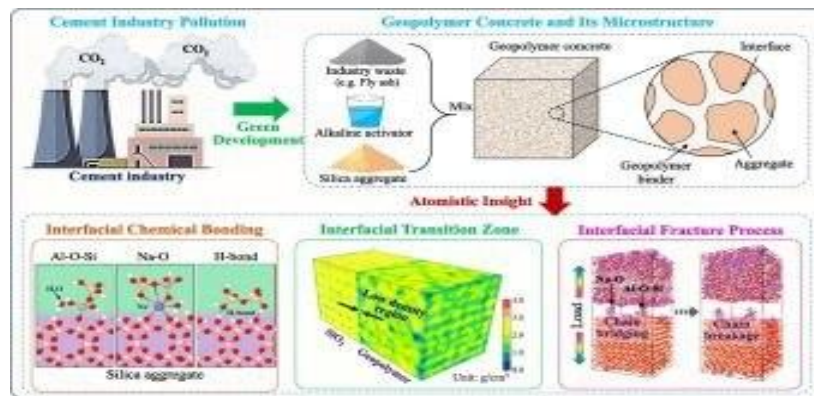


Figure1 : Une vision atomique des alternatives au ciment respectueuses de l'environnement.

1.2 Matières premières utilisées dans les géopolymères :

La synthèse d'un géopolymère repose sur la combinaison de deux éléments fondamentaux : un précurseur réactif et une solution d'activation.

1. 2.1 Sources alumino-silicatées (Précurseurs) :

Ce sont des matériaux solides riches en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3). Leur réactivité dépend de leur finesse et de leur caractère amorphe [4].

- **Le Méta-kaolin** : Obtenu par calcination de l'argile (kaolin). C'est le précurseur "étalon" en raison de sa pureté et de sa composition constante, permettant une étude précise des mécanismes de réaction [5].



Figure 2 :meta kaowlin

- **Les Cendres volantes (Fly Ash)** : Issues de la combustion du charbon. Les cendres de type F sont privilégiées pour leur faible teneur en calcium, offrant une meilleure durabilité face aux acides [6].



Figure3 : Cendres volantes

- **Le Laitier de haut fourneau (BFS)** : Sous-produit sidérurgique riche en calcium. Son ajout permet souvent de durcir le matériau à température ambiante, contrairement au méta-kaolin qui nécessite parfois une cure thermique [4].



Figure 4 : laitier de haut fourneau

1.2.2 Activateurs alcalins :

L'activateur est une solution aqueuse qui déclenche la dissolution des sources solides. Le choix de l'activateur influence directement la vitesse de prise et la porosité finale [7].

- **Hydroxydes alcalins (NaOH ou KOH)** : Ils fournissent les ions OH nécessaires à la rupture des liaisons SiO-Si et SiOAl de la source solide. L'hydroxyde de sodium est le plus utilisé pour son rapport efficacité/prix [8].

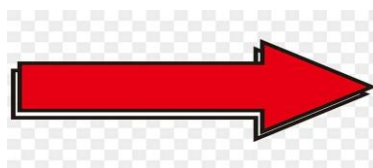


Figure 5 : NaOH

- **Silicates alcalins (Na_2SiO_3)** : Souvent appelé "verre soluble", il est mélangé à l'hydroxyde pour augmenter le ratio de silice soluble. Cela favorise une polymérisation plus dense et une résistance mécanique accrue [7].



Figure 6 : silicate alcalin

1.3 Paramètres influençant la géo polymérisation

La cinétique de la réaction de géo polymérisation, ainsi que le développement des propriétés microstructurales du matériau final, résultent d'une interaction complexe entre plusieurs facteurs physico-chimiques essentiels.

1.3.1 Influence de la composition chimique :

La réactivité globale du système est intrinsèquement liée à la concentration de la solution activatrice, car une alcalinité optimale est indispensable pour assurer la dissolution efficace des liaisons covalentes de la source alumino-silicatée. Il a été démontré qu'une concentration excessive en ions hydroxydes peut s'avérer contre-productive en provoquant une précipitation prématurée des espèces dissoutes, ce qui limite la formation d'un réseau polymérique homogène et réduit la résistance mécanique à long terme [9]. Par ailleurs, l'incorporation d'oxydes de calcium modifie la nature du gel formé en favorisant la coexistence de phases hybrides qui renforcent la densité de la matrice [10].

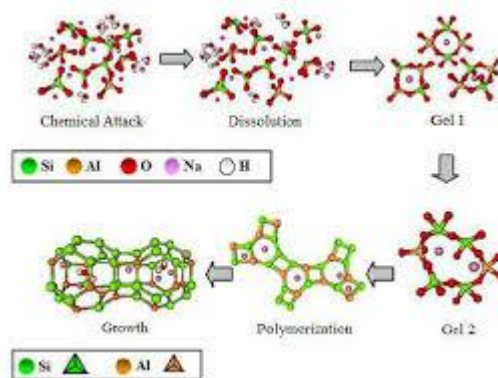


Figure 7 : Structure chimique

1.3.2 Rôle des conditions de cure :

Le traitement thermique appliqué durant les premières heures de la synthèse constitue un levier majeur pour accélérer le processus de polycondensation, particulièrement pour les précurseurs dont la réactivité est limitée à température ambiante. L'application d'une température contrôlée, généralement comprise entre 40°C et 80°C, permet non seulement d'atteindre des performances mécaniques élevées en un temps réduit, mais nécessite également une gestion rigoureuse de l'hygrométrie [11]. En effet, le maintien d'une humidité relative élevée est impératif pour prévenir l'évaporation précoce de l'eau interstitielle, évitant ainsi le phénomène de retrait et la fissuration prématurée de la structure [12].

1.3.3. Importance du rapport molaire Si/Al :

Le rapport atomique entre le silicium et l'aluminium est considéré comme le paramètre le plus déterminant pour définir l'architecture moléculaire du réseau géo polymérique. Un rapport Si/Al proche de l'unité favorise la création d'un maillage de type poly(sialate) rigide, tandis qu'une augmentation de ce ratio vers des valeurs supérieures à 2 engendre une structure plus dense et plus résistante, mieux adaptée aux contraintes des bétons de structure [13]. À des ratios plus élevés, le matériau acquiert des propriétés vitreuses spécifiques qui améliorent considérablement sa stabilité thermique face aux températures extrêmes [9].

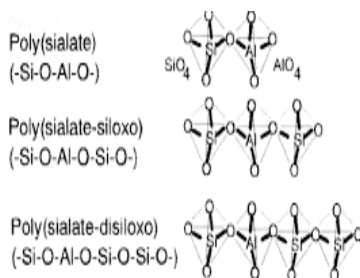


Figure 8 : importance du rapport molaire et son influence sur la structure et les propriétés des géopolymères

1.4. Propriétés des géopolymères :

Les géopolymères possèdent des caractéristiques exceptionnelles qui les différencient des liants classiques tels que le ciment Portland. Leurs propriétés sont le résultat de leur composition chimique spécifique, obtenue par le biais d'une réaction de géo polymérisation entre des matériaux à haute teneur en silice et en alumine et une solution alcaline. Voici les caractéristiques clés des géopolymères :

- **Haute résistance mécanique :** Les géopolymères ont la capacité d'afficher une résistance mécanique importante, comparable ou supérieur à celle de matériaux traditionnels comme le ciment Portland. On peut ajuster cette résistance mécanique en changeant la formulation des géopolymères et les conditions de durcissement.

Durabilité accrue : Résistance aux attaques chimiques : Les géopolymères sont très résistants aux environnements acides, aux sulfates et aux chlorures, ce qui les rend idéaux pour les environnements agressifs comme les usines chimiques ou les structures marines

. Faible perméabilité : Leur structure microporeuse réduit la pénétration d'eau et d'agents corrosifs, prolongeant la durée de vie des structures

- **Durcissement rapide :** Les géopolymères présentent un durcissement rapide, même à température ambiante, ce qui favorise une installation plus prompte des structures.

- **Faible retrait :** Contrairement au ciment Portland, les géopolymères subissent un retrait limité lors du durcissement, réduisant les risques de fissuration.

- **Adhérence et compatibilité :** Ils adhèrent bien à divers substrats, y compris les matériaux traditionnels comme le béton, ce qui les rend utiles pour les travaux de réparation et de renforcement. Ces caractéristiques rendent les géopolymères des matières polyvalentes et efficaces, convenant à diverses applications. Leur élaboration favorise une démarche plus écoresponsable et novatrice dans le secteur des matériaux de construction(14).

1.5 Applications des géopolymères dans le génie civil :

Les géopolymères se distinguent par leurs propriétés mécaniques et thermiques supérieures, ce qui permet leur déploiement dans plusieurs domaines clés du génie civil :

- **Béton de structure et éléments préfabriqués :** La substitution du ciment Portland par des liants géopolymères permet de fabriquer des poutres, des colonnes et des

voussoirs de tunnel. Ces éléments présentent une résistance précoce élevée et une empreinte carbone réduite [15].

- **Réparation et réhabilitation des infrastructures** : En raison de leur excellente adhérence aux supports en béton conventionnel et de leur faible retrait, ils sont utilisés comme mortiers de réparation pour les ponts et les structures maritimes soumises à des attaques chlorées [16].
- **Stabilisation des sols et infrastructures routières** : L'injection de solutions géopolymères est employée pour stabiliser les sols argileux instables sous les chaussées. Cette méthode est plus durable que le traitement classique à la chaux ou au ciment [17].
- **Protection thermique et résistance au feu** : Contrairement au béton ordinaire qui subit un éclatement (spalling) sous l'effet de la chaleur, les géopolymères conservent leur intégrité structurelle à des températures dépassant 800°C, ce qui les rend idéaux pour les revêtements de tunnels [18].
- **Gestion des déchets et éco-matériaux** : Ils servent de matrice pour l'encapsulation de déchets industriels toxiques ou miniers, transformant ces derniers en matériaux de construction utiles comme des briques ou des granulats artificiels [19]

Conclusion :

- En conclusion, les géopolymères apparaissent comme une alternative innovante et durable aux matériaux traditionnels du génie civil. Leur formation repose sur le processus de géo polymérisation impliquant des sources alumino-silicatées activées par des solutions alcalines.
- Les différents paramètres tels que la composition chimique, les conditions de cure et le rapport Si/Al jouent un rôle déterminant dans les performances finales du matériau. Par ailleurs, les géopolymères se distinguent par leurs propriétés mécaniques satisfaisantes, leur résistance thermique et chimique ainsi que leur durabilité.
- Ainsi, grâce à leurs multiples avantages et à leur faible impact environnemental, les géopolymères offrent des perspectives prometteuses pour des applications variées dans le domaine du génie civil, notamment dans le développement de matériaux de construction plus écologiques.

Chapitre 2 : Géopolymères légers à base de fines et de perlite Renforcé par des fibres végétales

Introduction :

Dans le domaine des matériaux de construction, l'allègement des structures constitue un enjeu majeur, notamment pour améliorer les performances thermiques et réduire les charges. À cet effet, l'intégration de granulats légers tels que la perlite, ainsi que l'utilisation de fines et de fibres végétales, permet de développer des géopolymères légers présentant des propriétés adaptées aux exigences modernes du bâtiment.

Les fines jouent un rôle essentiel dans la densification de la matrice géo polymérique et dans l'amélioration de la cohésion interne du matériau. Par ailleurs, les fibres végétales contribuent au renforcement des propriétés mécaniques, notamment en limitant la fissuration et en améliorant la ductilité.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les généralités sur les matériaux composites, ainsi que les constituants principaux des géopolymères légers, notamment la matrice, les granulats légers (perlite) et les fibres végétales. Il met également en évidence le rôle des fines, les caractéristiques des granulats légers, ainsi que l'effet de leur incorporation sur les propriétés mécaniques, thermiques et physiques des géopolymères. Enfin, un état de l'art sera présenté afin de situer cette étude dans le contexte des recherches récentes.

2.1 Généralités sur les Matériaux Composites :

Un matériau composite est défini comme un assemblage d'au moins deux matériaux de natures différentes, non miscibles, dont la combinaison permet d'obtenir un nouveau matériau doté de propriétés supérieures à celles des composants pris isolément [20].

Structurellement, un composite est constitué de deux phases principales :

- **La Matrice** : C'est la phase continue qui assure la cohésion de la structure, transmet les efforts mécaniques au renfort et protège ce dernier des agressions environnementales [21].
- **Le Renfort** : C'est la phase discontinue (souvent sous forme de fibres ou de particules) qui assure l'armature mécanique, apportant la rigidité et la résistance à la traction [22].

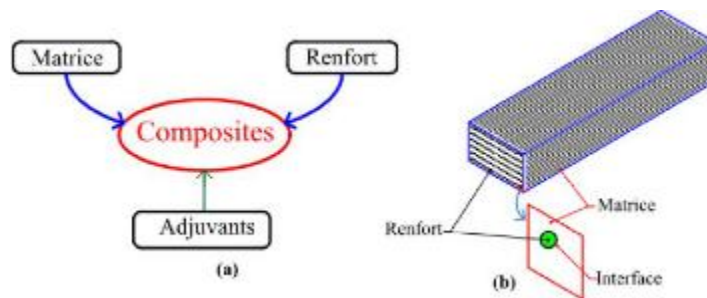


Figure 9 : matériaux composites

2.2 Classification des Composites :

Les composites sont généralement classés selon la nature de leur matrice en trois catégories majeures :

1. **Composites à Matrice Organique (CMO)** : Les plus courants, utilisant des polymères (résines).
2. **Composites à Matrice Métallique (CMM)** : Utilisés pour leur bonne tenue en température.
3. **Composites à Matrice Céramique (CMC)** : Destinés aux applications de très haute température (aéronautique, spatial) [23].

2.3 Rôle des fines dans les matrices géo polymériques :

L'incorporation des fines dans les matrices géo polymériques ne se limite pas à un simple remplissage volumique, mais constitue un levier stratégique pour l'optimisation des performances microstructurales et mécaniques du matériau final [24]. Sur le plan physique, les fines agissent selon l'effet de remplissage (**filler effect**), en comblant les interstices entre les particules plus grossières du précurseur aluminosilicate, ce qui conduit à une densification accrue de la matrice et à une réduction significative de la porosité capillaire [25].

Sur le plan cinétique, la présence de particules ultrafines augmente la surface spécifique disponible pour les réactions de dissolution dans le milieu alcalin, favorisant ainsi une accélération de la géo polymérisation dès les premiers stades de la cure [26]. Ce phénomène favorise la formation d'un gel de silicate d'alumine (N-A-S-H) plus homogène et mieux structuré, ce qui se traduit par une amélioration notable de la résistance à la compression et une meilleure durabilité face aux agents agressifs [27]. En outre, l'utilisation de fines issues de sous-produits industriels ou de déchets minéraux permet non seulement de moduler la

rhéologie de la pâte fraîche en optimisant l'empilement granulaire, mais s'inscrit également dans une démarche d'économie circulaire visant à réduire l'empreinte carbone globale du ciment géopolymère [28].

2.4 Rôle du sable gros dans les matrices géo polymériques :

L'introduction de sable gros (ou granulats fins de granulométrie élevée) dans les systèmes géo polymériques joue un rôle multifonctionnel qui influence directement la microstructure et les performances macroscopiques du composite final [29]. Contrairement aux pâtes de géopolymère pures, l'ajout de sable permet de créer un squelette granulaire stable.

2.4.1: Stabilisation dimensionnelle et contrôle du retrait :

L'un des rôles majeurs du sable gros est la réduction du **retrait de dessiccation**. Les matrices géopolymériques (notamment celles à base de métakaolin) sont sujettes à une contraction importante lors de la polycondensation. Le sable agit comme un obstacle physique rigide qui limite la contraction de la matrice, réduisant ainsi drastiquement les risques de fissuration précoce [30].

2.4.2 : Amélioration des propriétés mécaniques :

Le sable gros contribue à l'augmentation de la résistance à la compression en optimisant l'empilement granulaire.

- **Squelette porteur** : Les grains de sable transmettent les charges mécaniques à travers la structure, tandis que la matrice géo polymérique assure la cohésion entre ces grains [31].
- **Zone de Transition Interfaciale (ZTI)** : La rugosité du sable gros favorise un ancrage mécanique fort avec le gel géo polymérique (N-A-S-H ou C-A-S-H), ce qui améliore la rigidité globale du matériau [32].

2.4.3 : Aspect économique et thermique :

Sur le plan pratique, l'incorporation de sable permet de réduire la quantité de précurseur (liant) et de solution activatrice nécessaire, diminuant ainsi le coût de revient et l'exothermie de la réaction de géo polymérisation [33]. De plus, la densité du sable influence la conductivité thermique ; dans le cas de géopolymères allégés (avec perlite), le sable gros peut être utilisé pour ajuster l'équilibre entre légèreté et résistance structurelle [29]

2.5 : Granulats légers : classification et caractéristiques :

Les granulats légers se distinguent des granulats conventionnels par leur structure hautement poreuse et leur faible masse volumique apparente, des propriétés qui en font des constituants essentiels pour l'élaboration de bétons à haute performance thermique et à poids réduit [34]. Leur intégration dans les matrices cimentaires ou géo polymériques répond non seulement à des exigences structurelles, visant à alléger les ouvrages et à réduire les charges permanentes, mais aussi à des impératifs environnementaux à travers l'utilisation de ressources renouvelables ou recyclées [35].

2.5.1 Classification des granulats légers :

La classification de ces matériaux s'opère généralement selon leur origine et leur mode de production, distinguant ainsi trois catégories majeures :

- **Les granulats naturels** : Issus de roches volcaniques n'ayant subi aucun traitement thermique complexe, tels que la pierre ponce (pumice) ou la pouzzolane, appréciés pour leur stabilité chimique intrinsèque [36].
- **Les granulats artificiels** : Obtenus par des procédés industriels d'expansion thermique (souvent à plus de 1100°C), comme l'argile expansée (ALEX), le schiste expansé ou le verre cellulaire, offrant des propriétés géométriques et mécaniques contrôlées [37].
- **Les granulats de synthèse ou recyclés** : Incluant les sous-produits industriels (scories, cendres volantes frittées) ou des matériaux organiques (particules de bois, polystyrène expansé), s'inscrivant directement dans une logique de construction durable [38].

Numéro des matériaux	chapitre	6	16	20	17	18	19	5	4	3	2	1	8	7
Classe granulaire		0/2R	0/2CL	0/2M	0/2CS	0/4R	0/4S	2/8R	4/16R	8/16R	16/22R	16/32R	4/22R	4/32R
Granularité	4.3.2	GF 85	GF 85	GF 85	GF 85	GF 85	GF 85	GC 85/20	GC 90/15	GC 85/20	GC 80/20	GC 85/20	Gc 90/15	Gc 90/15
Tamis intermédiaires	4.3.2	-	-	-	-	-	-	-	GT 17,5	-	-	-	GT 17,5	GT 17,5
Forme des gravillons	4.4	NR	NR	NR	NR	NR	NR	FI 20	FI 20	FI 20	FI 20	FI 20	FI 20	FI 20
Masses volumiques réelles (M_{gr}) $\pm 0,03$	5.5	2,64	2,65	2,65	2,65	2,65	2,64	2,55	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,63
Teneur en fines	4.6	f3	f3	f3	f16	f16	f3	f1,5	f1,5	f1,5	f1,5	f3	f1,5	f1,5
Qualité des fines	4.7 an D	NR	NR	NR	SE 65	SE 65	NR	-	-	-	-	-	-	-
Module de finesse	4.3.3 an B	MF	MF	MF	MBF 5	MF	MF	-	-	-	-	-	-	-
Résistance à la fragmentation	5.2	-	-	-	-	-	-	LA 20	LA 20	LA 20	LA 20	LA 20	LA 20	LA 20
Résistance au polissage (PSV)	5.4.1	-	-	-	-	-	-	SZ 26	SZ 26	SZ 26	SZ 26	SZ 26	SZ 26	SZ 26
Résistance à l'abrasion de surface (AAV)	5.4.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Résistance à l'usure (M_{UD})	5.3	-	-	-	-	-	-	MDE 10	MDE 10	MDE 10	MDE 10	MDE 10	MDE 10	MDE 10
Résistance à l'abrasion par les pneus à crampons (AN)	5.4.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chlorure (<in M-%)	6.2	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003	Cl 0,0003
Sulfates solubles dans l'acide	6.3.1	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2	AS 0,2
Soufre total	6.3.2	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Substances organiques	6.4.1	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute	pas de doute
Teneur en carbonate de calcium	6.5	7,2	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Absorption d'eau ($W_{A_{20}}$)	5.5	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Résistance au gel-dégel (sulfate de magnésium)	-	-	-	-	-	-	-	MS 18	MS 18	MS 18	MS 18	MS 18	MS 18	MS 18
Résistance au gel-dégel (perte de masse)	5.7.1	PR	-	-	-	-	-	F 1	F 1	F 1	F 1	F 1	F 1	F 1
Réaction alcali-silice	5.7.1	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR	PR
Impuretés organiques légères (m_{LPC})	6.4.1	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5	mLPC0.5
(-) Aucune performance déterminée														
Valeurs spécifiques aux tamis intermédiaires		Numéro	Classe granulaire	% de passants aux tamis intermédiaires avec tolérances					Tolérances d'après les tableaux 4 ou C1					
				0,063	0,25	1	2	4						
Sables		6	0/2R	< 1	47 $\pm$ 25	80 $\pm$ 20	90 $\pm$ 5	-	4					
		16	0/2CL	< 1	16 $\pm$ 15	58 $\pm$ 10	91 $\pm$ 5	100	C1					
		20	0/2M	< 3	37 $\pm$ 15	75 $\pm$ 10	90 $\pm$ 5	100	C1					
		17	0/2CS	11 $\pm$ 5	29 $\pm$ 15	64 $\pm$ 10	94 $\pm$ 5	100	C1					
		18	0/4R	3 $\pm$ 3	39 $\pm$ 10	71 $\pm$ 10	-	94 $\pm$ 5	C1					
		19	0/4S	< 3	29 $\pm$ 10	60 $\pm$ 10	-	94 $\pm$ 5	C1					

Tableau 1 : Classification des granulats légers.

2.5.2 Caractéristiques fondamentales :

Sur le plan technique, les granulats légers sont caractérisés par une porosité interne élevée qui influence directement leur capacité d'absorption d'eau, nécessitant souvent un pré-mouillage pour éviter la dessiccation précoce de la matrice environnante [37]

Outre leur faible conductivité thermique, ils présentent un module d'élasticité réduit, ce qui peut améliorer la ductilité globale du composite tout en modifiant le comportement à la rupture par rapport aux bétons ordinaires [38].

2.6. La perlite : origine, propriétés et domaines d'application :

La perlite est un matériau siliceux d'origine volcanique qui occupe une place prépondérante dans l'industrie des matériaux de construction légers en raison de sa structure alvéolaire unique et de sa polyvalence fonctionnelle [39]. Son utilisation, particulièrement dans les matrices cimentaires et géo polymériques, s'inscrit dans une quête de performance thermique et de durabilité environnementale.



Figure 10 : La perlite

2.3.1: Origine et processus d'expansion

D'un point de vue géologique, la perlite est une roche volcanique amorphe (verre rhyolitique) possédant une teneur en eau combinée comprise entre 2 et 5 % [40]. Sa caractéristique fondamentale réside dans sa capacité à l'expansion : lorsqu'elle est chauffée rapidement à des températures comprises entre 850 et 1100°C, l'eau interne s'évapore brutalement, provoquant un gonflement de la roche qui peut atteindre 7 à 16 fois son volume initial. Ce processus génère des granulats ultra-légers de couleur blanche, constitués d'une multitude de micro-bulles d'air occluses [41].

2.6.2 : Propriétés physico-chimiques :

Les propriétés de la perlite expansée sont étroitement liées à sa structure poreuse :

- **Faible masse volumique** : Sa densité apparente extrêmement basse (généralement entre 30 et 150 kg/m³) permet un allègement substantiel des structures [42].
- **Isolation thermique et acoustique** : Grâce à l'air emprisonné dans ses pores, elle présente une conductivité thermique très faible, agissant comme une barrière efficace contre les flux de chaleur [39].
- **Réactivité pouzzolanique** : Dans les systèmes géopolymères, la perlite broyée peut présenter une réactivité chimique non négligeable en libérant de la silice et de l'alumine, participant ainsi à la formation du réseau polymérique [43].

2.6.3 : Domaines d'application :

Grâce à ses performances multimodales, la perlite est exploitée dans divers secteurs :

1. **Bâtiment et Travaux Publics (BTP) :** Fabrication de bétons et mortiers légers, enduits isolants, et panneaux de toiture coupe-feu [40].
2. **Isolation cryogénique :** Utilisation dans l'isolation des réservoirs de gaz liquide grâce à sa stabilité à très basse température [42].
3. **Applications environnementales :** Support de filtration pour le traitement des eaux et amendement de sols en agriculture pour améliorer la rétention d'eau [43].

2.6.3.1 Microstructure et phénomène d'expansion thermique :

La perlite brute se distingue par sa teneur intrinsèque en eau combinée, piégée au sein de sa structure vitreuse. Sous l'effet d'un traitement thermique intense, cette eau se transforme brusquement en vapeur, exerçant une pression interne multidirectionnelle qui provoque l'expansion des grains et la formation d'une structure alvéolaire à cellules fermées. Cette architecture poreuse constitue le fondement de sa légèreté exceptionnelle ; chaque granule expansé est composé de milliers de micro-bulles d'air encapsulées par de fines parois de silice, conférant au matériau une surface spécifique élevée ainsi qu'un pouvoir isolant remarquable [44].

2.6.3.2 Réactivité pouzzolanique en milieux alcalins :

La perlite ne se comporte pas comme un granulat strictement inerte. En raison de sa nature vitreuse riche en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3), elle manifeste une activité pouzzolanique notable lorsqu'elle entre en contact avec des activateurs alcalins (tels que l'hydroxyde de sodium).

Cette réaction chimique induit une dissolution partielle de la surface des grains de perlite, ce qui renforce l'adhésion mécanique entre le granulat et la matrice géo polymérique au niveau de la zone de transition interfaciale (**Interface Transition Zone - ITZ**) [45].

Ce renforcement de l'interface limite la propagation des microfissures, optimisant ainsi l'efficacité du matériau face aux sollicitations mécaniques, en dépit de sa porosité structurelle élevée [46].

2.6.3.3 : Performances thermiques et résistance au feu :

Classée comme matériau incombustible (Euroclasse A1), la perlite conserve une stabilité structurelle rigoureuse jusqu'à des températures avoisinant 900 °C. Au sein des matrices géopolymériques, l'intégration de la perlite remplit deux fonctions majeures :

- **Réduction de la conductivité thermique** : Les vacuoles d'air occluses agissent comme des barrières thermiques, faisant de ce composite une solution idéale pour l'isolation thermique des bâtiments et l'efficacité énergétique [47].
- **Atténuation du retrait hydraulique** : Grâce à sa capacité d'absorption hydrique, la perlite peut libérer progressivement l'eau de gâchage durant le durcissement (processus de *Curing Interne*), protégeant ainsi le réseau géopolymérique contre les fissurations précoces dues à la dessiccation [48].

2.7 : Les fibres : classification, caractéristiques et rôle structurel :

L'incorporation de fibres dans les matrices fragiles, telles que les géopolymères, constitue une stratégie de renforcement essentielle pour pallier leur faible résistance à la traction et leur fragilité intrinsèque. Cette section examine la diversité des fibres et met l'accent sur les fibres végétales en tant qu'alternative durable.



Figure11 : la fibre

2.7.1 : Classification des types de fibres :

Les fibres utilisées dans l'industrie de la construction se subdivisent en trois grandes catégories selon leur origine [49] :

- **Fibres minérales et synthétiques** : Incluant les fibres de verre, de carbone et d'acier, ainsi que les polymères synthétiques (polypropylène, nylon). Elles offrent des

performances mécaniques élevées mais présentent souvent une empreinte carbone importante.

- **Fibres végétales (Naturelles) :** Issues de ressources renouvelables (lin, chanvre, jute, sisal, palmier), elles gagnent en popularité grâce à leur faible coût et leur caractère écologique [50].
- **Fibres recyclées :** Provenant du retraitement de déchets industriels ou textiles, s'inscrivant dans une démarche d'économie circulaire.

2.7.2 Les fibres végétales : un renforcement biosourcé :

Les fibres végétales se distinguent par leur structure hiérarchique complexe, composée principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine.

- **Avantages :** Elles possèdent un rapport résistance/poids compétitif et une excellente capacité d'isolation thermique.
- **Défis techniques :** Leur caractère hydrophile et leur sensibilité à la dégradation en milieu alcalin (phénomène de minéralisation) nécessitent souvent des traitements de surface (alcalisation, acétylation) pour améliorer leur durabilité et leur adhérence avec la matrice géo polymérique [51].

2.7.3 Le rôle des fibres dans le composite :

Le renforcement par fibres transforme le comportement du matériau d'un mode de rupture fragile à un mode ductile à travers plusieurs mécanismes [52] :

1. **Le pontage des fissures (Crack Bridging) :** Les fibres traversent les microfissures et empêchent leur propagation macroscopique en transférant les contraintes à travers les lèvres de la fissure.
2. **Amélioration de la ténacité :** L'énergie nécessaire à la rupture est augmentée par les phénomènes de frottement et de déchaussement des fibres (**Pull-out**).
3. **Contrôle du retrait :** Elles limitent la fissuration précoce due au retrait hydraulique ou thermique lors de la phase de cure [53].

2.8 Importance de l'isolation pour l'efficacité énergétique :

1.8.1 Un rôle déterminant :

L'isolation de l'enveloppe du bâtiment constitue le levier principal de l'efficacité énergétique et du confort intérieur. En effet, les parois extérieures sont responsables de **50 à 60 %** des échanges thermiques globaux avec l'environnement .

L'intégration de matériaux isolants vise avant tout à limiter les transferts de chaleur, réduisant ainsi la demande en chauffage et en climatisation tout en stabilisant le **confort hygrothermique** intérieur. Au-delà de l'aspect thermique, un choix judicieux de matériaux permet d'assurer une isolation acoustique efficace et de renforcer la sécurité incendie de l'ouvrage

Un autre aspect crucial réside dans l'**énergie grise** (énergie incorporée) des isolants. Pour qu'un bâtiment soit considéré comme performant, l'économie d'énergie réalisée durant sa phase d'exploitation doit largement compenser l'énergie consommée pour la fabrication des matériaux, garantissant ainsi un bilan énergétique net positif et une réduction réelle des émissions de gaz à effet de serre . Dans un contexte de raréfaction des ressources énergétiques, l'isolation thermique — définie comme un dispositif freinant les flux de chaleur par **conduction, convection et rayonnement** — est devenue une exigence réglementaire majeure

L'utilisation de ces solutions passives limite la dépendance aux systèmes **CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation)**, ce qui préserve les ressources naturelles et prolonge les périodes de confort passif sans recours à l'énergie mécanique . Ce domaine de recherche, axé sur l'optimisation des enveloppes, a connu des avancées technologiques considérables ces dernières années .

Sur le plan structurel, une isolation adéquate permet de dimensionner au plus juste les équipements techniques et de réguler les apports thermiques annuels. Elle assure une **inertie thermique** protectrice, particulièrement utile durant les intersaisons. La performance de ce "bouclier thermique" dépend directement de la nature des matériaux choisis et des conditions climatiques locales . Les murs et la toiture restent les principaux vecteurs d'échange ; ils reçoivent le rayonnement solaire (ondes courtes) et réémettent de la chaleur (ondes longues), créant des flux thermiques qui varient selon les saisons : entrants et massifs en été, sortants et continus en hiver .

2.8.2 Le cas spécifique de l'Algérie :

En **Algérie**, le secteur de la construction (logements et bureaux) souffre encore d'une prise en compte insuffisante de l'isolation de l'enveloppe. Cette lacune structurelle conduit à une consommation excessive d'électricité et de gaz pour compenser les déperditions thermiques

massives. Ces pertes d'énergie, qui s'effectuent principalement à travers les ponts thermiques, les parois opaques (murs, dalles) et les parois vitrées, représentent un défi majeur pour la transition énergétique nationale [54].

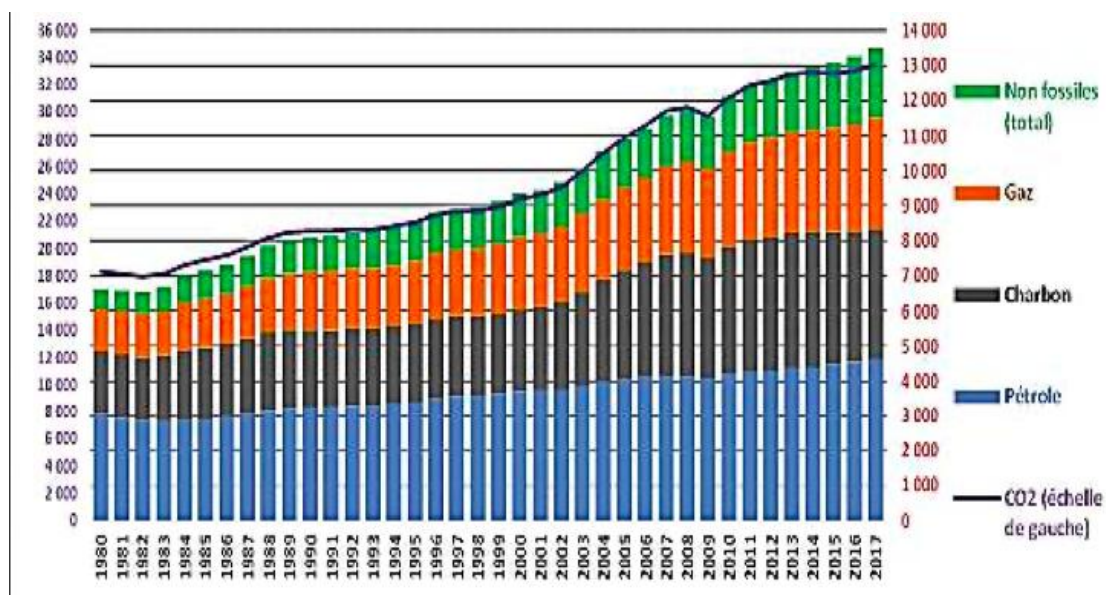


Figure12 : Monde entier : Consommation d'énergie (millions de tonnes équivalent pétrole) et émissions de CO₂

2.9 Effet de l'incorporation de la perlite et des fibres dans les géopolymères :

L'élaboration de composites hybrides combinant la perlite expansée et les renforts fibreux vise à concevoir un matériau multifonctionnel capable de pallier les insuffisances intrinsèques des matrices géo polymériques pures, notamment leur fragilité et leur conductivité thermique élevée [55]. Cette synergie permet d'équilibrer le compromis entre la légèreté structurelle et la ductilité mécanique.

2.9.1 : Propriétés mécaniques (Comportement et Résistance) :

L'incorporation de la perlite, bien qu'elle réduise généralement la résistance à la compression en raison de sa porosité élevée, est compensée par l'ajout de fibres qui transforment radicalement le mode de rupture du composite [56].

- **Ductilité et Ténacité** : Tandis que la perlite crée une matrice allégée, les fibres agissent par un mécanisme de "pontage des fissures" (crack-bridging), absorbant l'énergie de traction et empêchant la rupture brutale. Cela se traduit par une

augmentation significative de la résistance à la flexion et de la ténacité à la rupture [57].

- **Zone de Transition Interfaciale (ZTI) :** La réactivité pouzzolanique de la perlite (libération de silice) améliore l'adhérence à l'interface fibre-matrice, optimisant ainsi le transfert des contraintes mécaniques et limitant le phénomène de déchaussement des fibres (pull-out) [58].

2.9.2 Propriétés thermiques et physiques :

L'effet combiné de la perlite et des fibres (particulièrement végétales) génère un réseau poreux hiérarchisé qui redéfinit les caractéristiques physiques du matériau :

- **Isolation Thermique :** La perlite expansée, avec sa structure alvéolaire, diminue drastiquement la conductivité thermique (λ) du géopolymère. L'ajout de fibres, notamment cellulósiques, renforce cette isolation en créant des micro-barrières thermiques supplémentaires au sein de la matrice [55][59].
- **Masse Volumique et Porosité :** L'utilisation de la perlite permet d'obtenir des bétons ultra-légers. Physiquement, l'interaction entre les fibres et les pores de la perlite peut modifier la perméabilité à la vapeur d'eau, offrant ainsi un meilleur confort hygrométrique à l'intérieur des bâtiments [57].
- **Stabilité Dimensionnelle :** Les fibres jouent un rôle crucial en limitant le retrait hydraulique induit par la porosité de la perlite, réduisant ainsi les risques de fissuration précoce lors de la phase de polymérisation [56].

2.10 État de l'art sur les géopolymères allégés :

La thématique des géopolymères allégés a connu une croissance exponentielle durant la dernière décennie, stimulée par la nécessité de développer des matériaux de construction à faible empreinte carbone et à haute performance thermique. L'état de l'art actuel révèle une transition d'une approche purement expérimentale vers une compréhension fine des interactions microstructurales [60]

2.10.1 Évolution des techniques d'allègement :

Les recherches antérieures identifient principalement deux méthodes pour réduire la densité des matrices géopolymériques :

1. **L'allègement par agents moussants (Moussage chimique) :** Initialement, les travaux se sont concentrés sur l'utilisation du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) ou de la poudre d'aluminium. Bien que ces méthodes permettent d'atteindre des densités très faibles (jusqu'à 300 kg/m^3), elles posent des défis en termes de contrôle de la taille des pores et de stabilité de la mousse [61].
2. **L'allègement par granulats légers (Approche granulaire) :** Plus récemment, l'usage de la perlite expansée, de l'argile expansée ou du verre cellulaire a été privilégié pour sa capacité à maintenir une résistance structurelle acceptable tout en offrant une isolation thermique stable [62].

2.10.2 Tendances récentes (2020-2026) :

Les études les plus récentes (État de l'art actuel) mettent en évidence plusieurs points clés :

- **Composites Hybrides :** La tendance actuelle consiste à combiner des granulats légers (comme la perlite) avec des fibres (naturelles ou synthétiques) pour pallier la fragilité intrinsèque des mousses géopolymères. Les travaux de **Hassan et al. (2024)** ont démontré que cette synergie permet d'obtenir des panneaux isolants structurels [63].
- **Réactivité des Interfaces :** Un axe majeur de la recherche actuelle concerne la "Zone de Transition Interfaciale" (ITZ). Il a été prouvé que la nature poreuse des granulats légers favorise un "curing interne", améliorant ainsi l'adhérence chimique entre la matrice et le granulat, contrairement aux bétons de ciment Portland classiques [64].
- **Optimisation Thermique :** Les chercheurs se penchent désormais sur la prédiction de la conductivité thermique en fonction de la distribution porale. L'utilisation de la perlite expansée est aujourd'hui reconnue comme l'une des solutions les plus efficaces pour atteindre des valeurs de λ inférieures à 0.15 W/m.K [60].

Conclusion :

"En conclusion, ce deuxième chapitre a permis d'établir une base théorique solide sur le développement des géopolymères légers. L'étude a mis en évidence l'importance de l'incorporation de la perlite et des fines pour l'obtention d'une structure poreuse favorisant l'isolation thermique et l'efficacité énergétique. Par ailleurs, l'ajout de fibres végétales s'est avéré crucial pour renforcer la matrice géopolymérique, améliorant ainsi ses propriétés mécaniques tout en réduisant sa fragilité intrinsèque. Cette

synthèse de l'état de l'art confirme le potentiel de ces matériaux écologiques comme alternative durable dans le secteur de la construction. Ainsi, les connaissances acquises ici constituent le socle nécessaire pour aborder, dans le chapitre suivant, la phase expérimentale et l'analyse des performances réelles de ces composites."

Chapitre 3 : Matériaux et méthodologie expérimentale

3.1 Matériaux utilisés :

3.1.1. Précurseurs : Le laitier de haut fourneau est utilisé comme précurseur principal dans cette étude. Ce choix est justifié par ses propriétés hydrauliques et sa réactivité chimique optimale lors de la géo polymérisation. Grâce à sa teneur élevée en silice et en calcium, il joue un rôle crucial dans le développement des résistances mécaniques et de la durabilité de la matrice, permettant ainsi l'obtention d'un liant performant et durable

%	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

Tableau 2 : Composition chimique de LHF

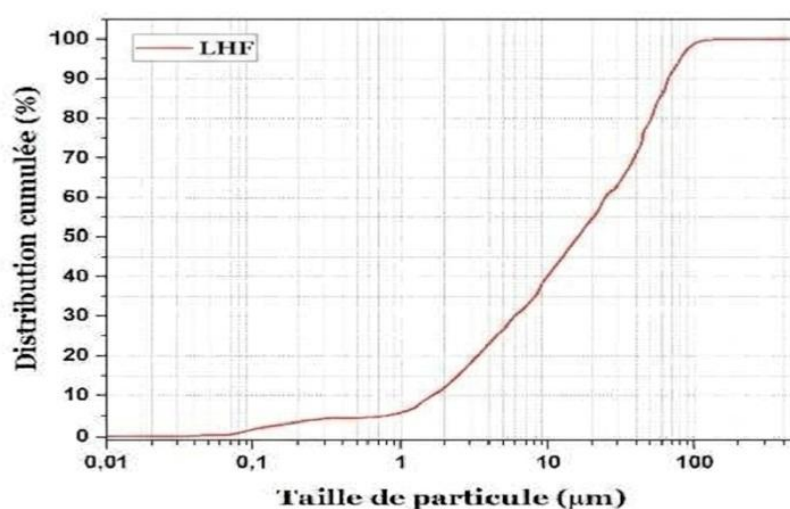


Figure 13 : Courbes granulométriques des LHF.

Les caractéristiques physiques de LHF sont présentées dans le tableau 3

Précurseur	Densité	Surface spécifique de Blaine (g/cm ²)
LHF	2.94	2364.22

Tableau 3 : Propriétés physiques de LHF

3.2.2. Activeurs :

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

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

Tableau 4 : Composition chimique de la soude caustique

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 14). 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 14 : 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 15. Les caractéristiques physico-chimiques de ce silicate de sodium sont présentées de manière synthétique dans le tableau 5 ci-dessous



Figure 15 : Silicates de sodium

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

Tableau 5 : Caractéristiques des silicates de sodium utilisées

Sable concassé (SC)

Dans cette étude, nous avons utilisé le sable concassé (SC). L'apparence de ce sable est illustrée dans la Figure. Le SC présente des formes angulaires avec des particules fines à la surface des grains.

La granulométrie du sable concassé est présentée dans la (courbe noire). Ses propriétés physiques sont présentées dans le Tableau



Figure 16: Morphologies des sables utilisés

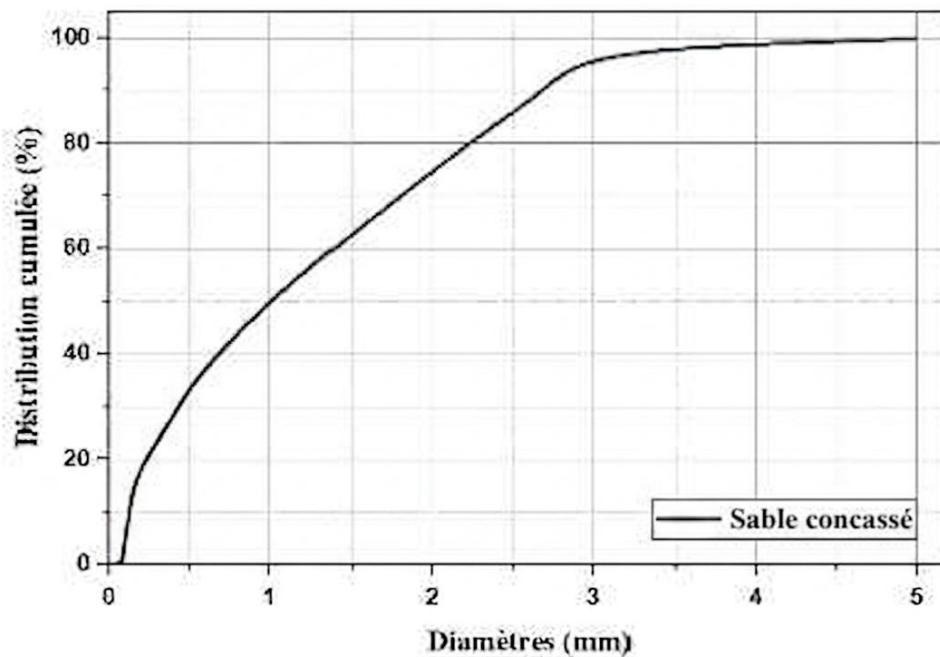


Figure 16 : Granulométries des sables utilisés

Type de sable	Densité	ES (%)	Quantité de poudre ($<80\mu\text{m}$)(%)	Module de finesse
Sable concassé	2.5	73	6	2.8

Tableau 6 : Propriétés physiques des sables utilisés

3.3 La perlite :

Le Perlite Construct de la marque algérienne Taouab, illustré dans l'image, est une solution d'ingénierie innovante extraite de roches volcaniques naturelles traitées thermiquement pour devenir des granules ultralégers à structure poreuse. La valeur fondamentale de ce produit réside dans sa capacité exceptionnelle d'isolation thermique et acoustique, ce qui le rend idéal pour isoler les murs et les plafonds tout en réduisant la consommation d'énergie des bâtiments. Il est également utilisé comme alternative aux agrégats traditionnels pour produire des bétons et mortiers légers, contribuant ainsi à alléger les charges structurelles globales et à

accroître la résistance parasismique des ouvrages. Outre sa légèreté et sa facilité de manipulation sur les chantiers, la perlite se distingue par son incombustibilité, offrant une protection efficace contre les incendies, ainsi que par sa stabilité chimique qui garantit la durabilité de ses propriétés isolantes à vie, sans décomposition ni corrosion

Propriétés Physico-Chimiques

- **Structure** : Cellulaire et multi-cellulaire, ce qui lui confère une porosité élevée.
- **Masse volumique apparente** : Très faible, généralement comprise entre 30 et 150 kg/m³.
- **Conductivité thermique (λ)** : Excellente, variant souvent de 0,04 à 0,06 W/(m·K).

3.4 Le Fibres :

L'utilisation des **fibres de chanvre** (*Cannabis sativa L.*) dans les matériaux de construction, et particulièrement dans les matrices cimentaires ou géopolymères, s'inscrit parfaitement dans une démarche d'éco-conception grâce à leur faible empreinte carbone et leurs excellentes propriétés isolantes.

Voici une analyse technique détaillée de leur intégration :

3.4.1 Caractéristiques Techniques de la Fibre :

Le chanvre est une fibre cellulosique naturelle qui se distingue par des propriétés physiques remarquables :

- **Résistance spécifique** : Bien que leur résistance absolue soit inférieure à celle de l'acier, leur légèreté leur confère une excellente résistance spécifique (rapport résistance/poids).
- **Morphologie** : Les fibres présentent une structure poreuse et rugueuse, ce qui favorise théoriquement l'accrochage mécanique dans la matrice.
- **Propriétés thermiques** : Elles contribuent à abaisser la conductivité thermique du matériau final, renforçant l'effet isolant déjà apporté par des granulats comme la perlite.

3.4.2 Avantages dans les Matériaux Allégés :

Dans un système composé de liants (ciment/géopolymère) et de granulats légers, le chanvre apporte :

- **Contrôle de la fissuration** : Les fibres de chanvre agissent efficacement pour limiter le retrait plastique et le retrait de dessiccation, fréquents dans les bétons légers.
- **Amélioration du confort hygrométrique** : Grâce à leur capacité naturelle à absorber et relarguer l'humidité (effet tampon), elles participent à la régulation du climat intérieur des bâtiments.
- **Renforcement de la ductilité** : Elles permettent d'éviter une rupture fragile du matériau sous charge, un point critique pour les bétons à base de perlite.

3.4.3 Les Défis de l'Usage en Milieu Alcalin :

C'est le point de vigilance majeur pour vos travaux de recherche :

- **Dégradation alcaline** : Les milieux cimentaires et, de manière plus agressive, les **activateurs géopolymères** (pH très élevé), s'attaquent à la lignine et à l'hémicellulose des fibres naturelles. Cela peut entraîner une perte de résistance mécanique à long terme.
- **Absorption d'eau** : Les fibres de chanvre sont hydrophiles. Elles peuvent absorber jusqu'à 3 à 4 fois leur poids en eau, ce qui peut perturber le rapport Eau/Liant et nuire à la cinétique de durcissement.

3.4.4 Traitements de Surface Préconisés :

Pour optimiser l'adhérence et la durabilité des fibres de chanvre dans une matrice, plusieurs prétraitements sont souvent étudiés :

1. **Traitements chimiques** : Lavage à l'eau, traitement alcalin (mercerisation au NaOH) pour éliminer les impuretés et augmenter la rugosité, ou silanisation.
2. **Enrobage (Coating)** : Utilisation de polymères ou de paraffine pour imperméabiliser la fibre et la protéger de l'attaque alcaline.

3.4.5 Synthèse pour la Recherche :

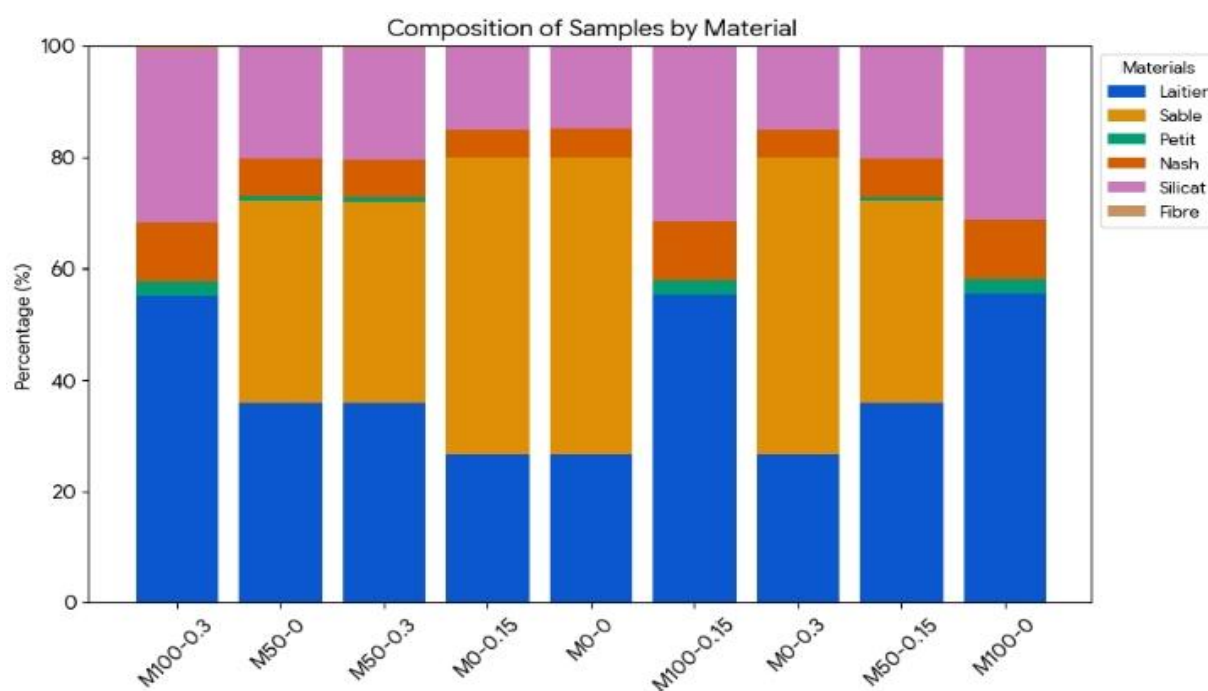
Paramètre	Impact du Chanvre
Densité	Réduction supplémentaire (matériau plus léger).
Conductivité thermique	Amélioration (baisse de λ).
Durabilité	Point critique nécessitant un traitement des fibres.
Bilan Carbone	Très positif (stockage de CO ₂ biogénique).

Tableau 7 : les impacts du chanvre

3.5 Formulations des géopolymères développés :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	M100-0.3	M50_0	M50_0.3	M0_0.15	M0_0	M100_0.15	M0_0.3	M 50_0.15	M100_0.15
Laitier	735	597.74	597.74	597.74	597.74	735	597.74	597.74	735
Sable	0	598.702	598.702	1197.4	1197.4	0	1197.4	558.702	0
Perlit	34	13.82	13.82	0	0	34	0	13.82	34
Naoh	138	112.1	112.1	112.1	112.1	138	112.1	112.1	138
Silicat	414	336.3	336.3	336.3	336.3	414	336.3	336.3	414
Fibre	7.48	0	6.1	2.17	0	2.7	2.17	2.17	0

Tableau 8 : Formulations des géopolymères développés



Figures 17 : Histogramme représentant la composition centésimale des mélanges.

3.6 Préparation des mélanges et mise en œuvre :



1. Préparation des fibres de chanvre :
pesée et découpe à la longueur souhaitée (~10 mm)



2. Malaxage à sec : mélange du laitier avec la perlite dans le malaxeur



3. Préparation de la solution activante :
pesée des solides, dissolution dans l'eau et vérification de la masse totale



4. Malaxage final : ajout progressif de la solution activante et des fibres de chanvre – contrôle des quantités

Figure 18 : Préparation des mélanges

3.6.1 Moulage et Compactage :

Le mélange est coulé dans des moules (4×4×4 cm) et (4×4×16 cm) en trois phases successives. Les moules sont ensuite placés sur une table vibrante afin de minimiser les vides interstitiels, ce qui accroît la compacité et la résistance du matériau, garantit une distribution optimale du béton et améliore l'aspect de l'état de surface



Figure 19 : Moulage et Compactage

] Séchage :

Démouler après 24 heures



Figure 20 : éprouvette prismatique et coup

3.7 Méthodes d'essais expérimentaux :

3.7.1 Essais à l'état frais :

Objectif : Cet essai est réalisé pour évaluer la fluidité et la maniabilité du mortier (ou béton) frais. Il permet de caractériser la capacité du mélange à s'écouler sous l'effet de chocs normalisés.

Procédure :

Le cône d'Abrams (version mortier) est placé au centre de la table à secousses, puis rempli en deux couches successives, chacune étant compactée par 10 coups à l'aide d'une tige de piquage.

Après avoir arasé la surface supérieure, le cône est levé verticalement avec précaution.

La table est ensuite soumise à 15 secousses (chocs) en 15 secondes.

Mesure : Le diamètre de la galette obtenue est mesuré selon deux directions perpendiculaires. La valeur moyenne de ces deux mesures représente l'étalement du mélange, exprimée en centimètres (ou millimètres).

Interprétation :

Un étalement plus élevé indique une plus grande fluidité, ce qui est crucial pour assurer un bon remplissage des moules, surtout en présence de fibres.



Figure 21 : étalement



Figure 22 : essai à l'Etat frais

3.7.2 Essais à l'état durci :

Essais Mécaniques : Flexion et Compression

- **Essai de Flexion simple (3 points) :**

Objectif : Déterminer la résistance à la traction par flexion du matériau.

Procédure :

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (cm).

L'échantillon est placé sur deux appuis inférieurs, et une charge centrale est appliquée progressivement jusqu'à la rupture.

Résultat : La résistance à la flexion est calculée en fonction de la charge maximale supportée et des dimensions de l'éprouvette.



Figure 23 : essai mécanique flexion

- **Essai de Compression :**

Objectif :

Mesurer la capacité du matériau à supporter des charges de compression, ce qui est l'indicateur principal de sa performance structurelle.

Procédure :

Cet essai est effectué sur les demi-prismes issus de l'essai de flexion ou sur des cubes (cm).

La charge est appliquée uniformément sur les faces latérales (faces lisses en contact avec le moule) à une vitesse constante jusqu'à l'écrasement total de l'échantillon.

Mesure : La résistance à la compression est exprimée en Mégapascals (MPa).

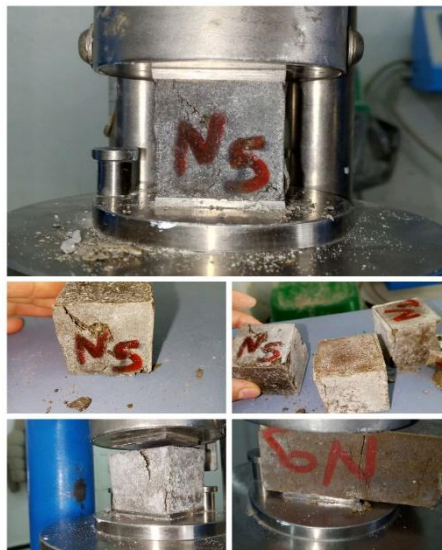


Figure 24 : essai mécanique compression

Masse Volumique :

À 28j cubique :

$$MCu = \frac{m}{v} = \frac{126.86}{4*4*4} = 1.98g/cm^3$$

à 28j prismatique :

$$MP = \frac{m}{v} = \frac{494.07}{4*4*16} = 1.92g/cm^3$$

Cubique				Prézmatique		
	La masse	Volume	M1	La masse	Volume	M2
1	126.86	64	1.98	494.07	256	1.92
2	148.07	64	2.31	559	256	2.18
3	145.74	64	2.27	558	256	2.17
4	151.85	64	2.37	591	256	2.3
5	148.21	64	2.31	570	256	2.22
6	125.08	64	1.95	490.05	256	1.91
7	154.48	64	2.41	576	256	2.25
8	144.70	64	2.26	564.91	256	2.13
9	121.40	64	1.89	489	256	1.91

Tableau 9 : la masse volumique

3.7.3 Essais thermiques :

Porosité : Méthodologie expérimentale

Dans cette étude, un protocole expérimental rigoureux a été suivi pour la préparation et la caractérisation des échantillons. Tout d'abord, un pesage initial a été effectué à l'air libre afin de déterminer leur masse initiale. Ensuite, les échantillons ont été soumis à une opération de séchage en étuve à une température contrôlée, dans le but d'éliminer toute humidité. Après une durée de trois jours, ils ont été retirés de l'étuve et pesés de nouveau pour obtenir la masse sèche.

Par la suite, les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant trois jours supplémentaires afin d'assurer leur saturation complète. Après cette étape, ils ont été retirés de l'eau et leur surface a été soigneusement essuyée pour éliminer l'excès d'eau. Enfin, un pesage hydrostatique a été réalisé à l'aide d'une balance hydrostatique, en se basant sur le principe de principe d'Archimède, afin de déterminer avec précision leurs propriétés physique .



Figure 25 : préparation de l'essai

	A l'aire(g)	Dans l'étuve(g)	Dans l'eau(g)
1	125.46	121.26	61.35
2	264.06	255.67	140.48
3	145.37	142.39	78.18
4	148.8	145.71	81.74
5	275.7	269.92	153.34
6	123.27	118.80	60.20
7	145.73	142.59	81.18
8	144.38	141.16	77.30
9	203.48	195.79	98.45

Tableau 10 : tableau des masses

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Introduction :

Ce chapitre présente une étude expérimentale portant sur l'élaboration et la caractérisation de géopolymères à base de laitier, intégrant la perlite comme substitut partiel ou total du sable siliceux et des fibres de chanvre comme renforcement naturel. Dans un contexte de développement de matériaux de construction plus durables, légers et performants, l'utilisation de géopolymères constitue une alternative prometteuse aux liants conventionnels grâce à leur faible impact environnemental et à leurs propriétés mécaniques intéressantes. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence du taux de substitution du sable siliceux par la perlite, utilisée comme granulat léger, ainsi que l'effet de différents dosages de fibres de chanvre (0 %, 0,15 % et 0,3 %) sur les propriétés à l'état frais et durci des composites géo polymériques. À cet effet, plusieurs formulations ont été élaborées et comparées à un mélange témoin (M0-0) composé exclusivement de laitier et de sable siliceux. Les performances des matériaux ont été analysées à travers différents paramètres, notamment l'ouvrabilité par essai d'étalement, les propriétés mécaniques en compression et en flexion à différents âges de cure (7, 28 et 90 jours), ainsi que les propriétés physiques telles que la masse volumique à l'état sec et la porosité accessible à l'eau. L'ensemble de ces investigations permet de mieux comprendre les interactions entre la matrice géo polymérique, les granulats légers et les fibres végétales, afin d'identifier les formulations les plus adaptées à un compromis optimal entre légèreté, durabilité et performances mécaniques.

Etalement :

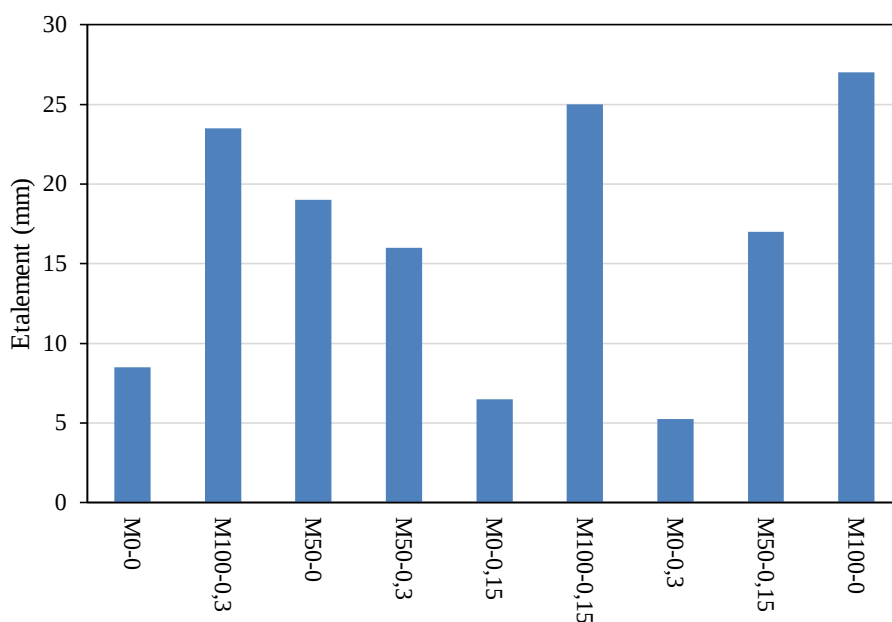


Figure 26 : Influence de la substitution du sable siliceux par la perlite et de l'incorporation des fibres de chanvre sur l'étalement des géopolymères à base de laitier.

L'analyse des résultats d'étalement met en évidence une influence significative de la substitution du sable siliceux par la perlite ainsi que du dosage en fibres de chanvre sur l'ouvrabilité des géopolymères élaborés. Globalement, les formulations contenant une forte proportion de perlite présentent les valeurs d'étalement les plus élevées, tandis que l'incorporation de fibres de chanvre, particulièrement à dosage élevé (0,3 %), tend à réduire sensiblement la fluidité du mélange. Le mélange témoin M0-0 (100 % laitier et sable siliceux, sans fibres) présente un étalement intermédiaire de 8,5 cm, traduisant une ouvrabilité modérée du système de référence. L'introduction de 0,15 % de fibres de chanvre sans substitution granulaire (M0-0,15) réduit légèrement cette valeur à 6,5 cm, soit une diminution d'environ 23,5 % par rapport au témoin, ce qui peut être attribué à l'absorption d'eau par les fibres et à l'augmentation des interactions internes limitant la mobilité de la pâte géo polymérique. Cet effet devient encore plus prononcé pour M0-0,3, dont l'étalement chute à 5,25 cm, correspondant à une baisse d'environ 38,2 % par rapport au mélange de référence, indiquant qu'un dosage élevé en fibres accroît fortement la cohésion du mélange et diminue sa capacité d'écoulement en raison de l'effet d'enchevêtrement des fibres et de l'augmentation de la viscosité apparente.

À l'inverse, les formulations intégrant de la perlite montrent une nette amélioration de l'ouvrabilité. Le mélange M100-0 (100 % substitution du sable siliceux par la perlite, sans fibres) atteint le plus fort étalement avec 27 cm, soit une augmentation remarquable d'environ 217 % par rapport au témoin M0-0, mettant en évidence le rôle favorable de la perlite sur la fluidité du matériau. Cette amélioration peut être liée à la faible densité apparente et à la morphologie granulaire de la perlite, qui réduisent les frottements internes dans le mélange. L'ajout de fibres de chanvre dans ces formulations allégées entraîne toutefois une légère diminution de l'ouvrabilité : M100-0,15 présente un étalement de 25 cm, soit une réduction d'environ 7,4 % par rapport à M100-0, tandis que M100-0,3 affiche 23,5 cm, représentant une diminution d'environ 13 %, ce qui confirme l'effet restrictif des fibres sur la mobilité du mélange tout en conservant une bonne ouvrabilité globale.

Les formulations intermédiaires avec 50 % de substitution en perlite présentent un comportement équilibré entre fluidité et cohésion. Le mélange M50-0 atteint un étalement de 19 cm, soit une augmentation d'environ 124 % comparativement au témoin, indiquant qu'une substitution partielle permet déjà d'améliorer notablement l'ouvrabilité. L'ajout de fibres

réduit progressivement cette valeur : M50-0,15 affiche 17 cm, soit une baisse d'environ 10,5 % par rapport à M50-0, tandis que M50-0,3 descend à 16 cm, représentant une diminution de 15,8 %. Malgré cette réduction, les valeurs restent supérieures à celles du mélange de référence, ce qui suggère qu'une substitution partielle en perlite permet de compenser l'effet défavorable des fibres sur la fluidité.

Dans l'ensemble, les résultats démontrent que la perlite améliore significativement l'ouvrabilité des géopolymères, l'effet étant proportionnel au taux de substitution du sable siliceux, alors que les fibres de chanvre diminuent l'étalement, particulièrement à fort dosage (0,3 %) en raison de leur capacité d'absorption et de leur effet de renforcement interne. Ainsi, un compromis intéressant entre maniabilité et renforcement mécanique semble être atteint pour les formulations M50-0,15 et M50-0,3, qui conservent une ouvrabilité satisfaisante (16–17 cm) tout en intégrant un renforcement fibré susceptible d'améliorer les performances mécaniques du composite géo polymérique.

Résistance à la compression :

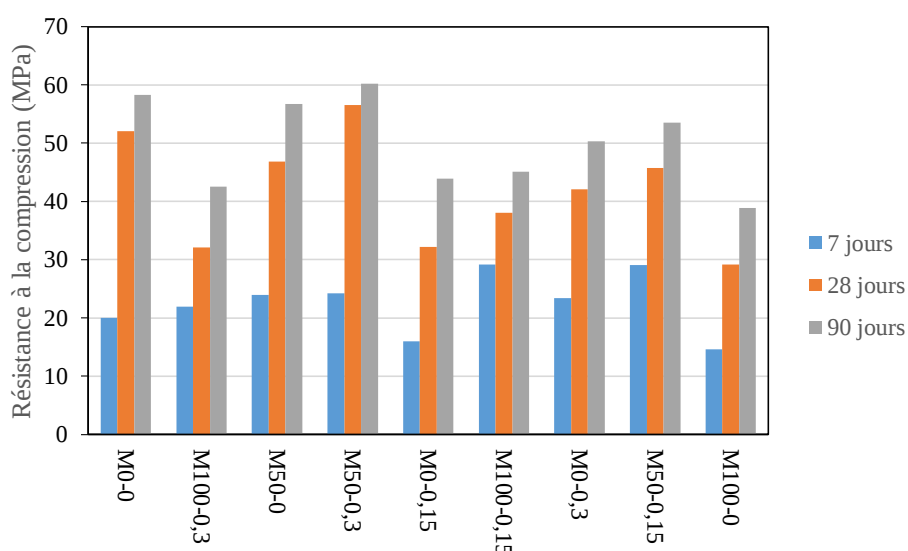


Figure 27 : Évolution de la résistance à la compression des géopolymères en fonction du taux de substitution en perlite et du dosage en fibres de chanvre à 7, 28 et 90 jours.

La Figure, montre l'évolution de la résistance à la compression des différents géopolymères élaborés à base de laitier en fonction du taux de substitution du sable siliceux par la perlite et du dosage en fibres de chanvre, mesurée à 7, 28 et 90 jours de cure. De manière générale, tous les mélanges présentent une augmentation progressive de la résistance avec le temps, traduisant la poursuite des réactions géo polymériques et la densification progressive de la matrice. Le mélange témoin M0-0 (100 % laitier + 100 % sable siliceux sans fibre) affiche des résistances d'environ 20 MPa à 7 jours, 52 MPa à 28 jours et 58 MPa à 90 jours, ce qui confirme le bon développement mécanique du système géo polymérique de référence. L'introduction totale de la perlite avec 0,3 % de fibres de chanvre (M100-0,3) entraîne une diminution sensible de la résistance, avec environ 22 MPa, 32 MPa et 42 MPa respectivement à 7, 28 et 90 jours, ce qui peut être attribué à la forte porosité de la perlite, réduisant la compacité du matériau malgré l'effet de pontage des fibres. En revanche, le mélange M50-0 (50 % sable siliceux / 50 % perlite sans fibres) présente un comportement intermédiaire très performant avec des résistances proches de 24 MPa à 7 jours, 47 MPa à 28 jours et 56 MPa à 90 jours, démontrant qu'une substitution partielle permet de maintenir de bonnes propriétés mécaniques tout en réduisant la densité du composite. Le mélange M50-0,3, combinant 50 % de perlite et 0,3 % de fibres, se distingue comme le plus performant, atteignant approximativement 24 MPa à 7 jours, 56 MPa à 28 jours et 60 MPa à 90 jours, suggérant un effet synergique entre la substitution modérée en perlite et le renforcement fibré, probablement dû à une meilleure limitation de la propagation des microfissures. Concernant les formulations à 0,15 % de fibres, le mélange M0-0,15 atteint environ 16 MPa, 32 MPa et 44 MPa, indiquant que l'ajout de fibres sans perlite peut réduire légèrement les performances par rapport au témoin, possiblement en raison d'une dispersion imparfaite ou d'une augmentation de la porosité interfaciale. Le mélange M100-0,15 obtient environ 29 MPa à 7 jours, 38 MPa à 28 jours et 45 MPa à 90 jours, montrant une amélioration par rapport à M100-0,3, ce qui laisse supposer qu'un dosage plus faible en fibres favorise une meilleure cohésion de la matrice allégée. Pour M0-0,3, les résistances avoisinent 23 MPa, 42 MPa et 50 MPa, traduisant un effet positif modéré des fibres sur le système sans perlite. De même, M50-0,15 affiche des performances élevées, avec environ 29 MPa à 7 jours, 46 MPa à 28 jours et 53 MPa à 90 jours, confirmant l'intérêt d'un compromis entre allègement et renforcement. Enfin, M100-0 (100 % perlite sans fibres) présente les plus faibles résistances à long terme, soit approximativement 15 MPa à 7 jours, 29 MPa à 28 jours et 39 MPa à 90 jours, ce qui met en évidence l'effet défavorable d'une substitution totale du sable siliceux par un agrégat léger sur la compacité et la résistance mécanique du géopolymère. Globalement, les résultats

indiquent que la substitution partielle du sable siliceux par la perlite (50 %) combinée à un renforcement approprié en fibres de chanvre, notamment à 0,3 %, permet d'optimiser la résistance à la compression tout en conservant le caractère allégé du matériau, tandis qu'une substitution totale par la perlite conduit à une réduction notable des performances mécaniques malgré l'ajout de fibres.

Résistance à la flexion

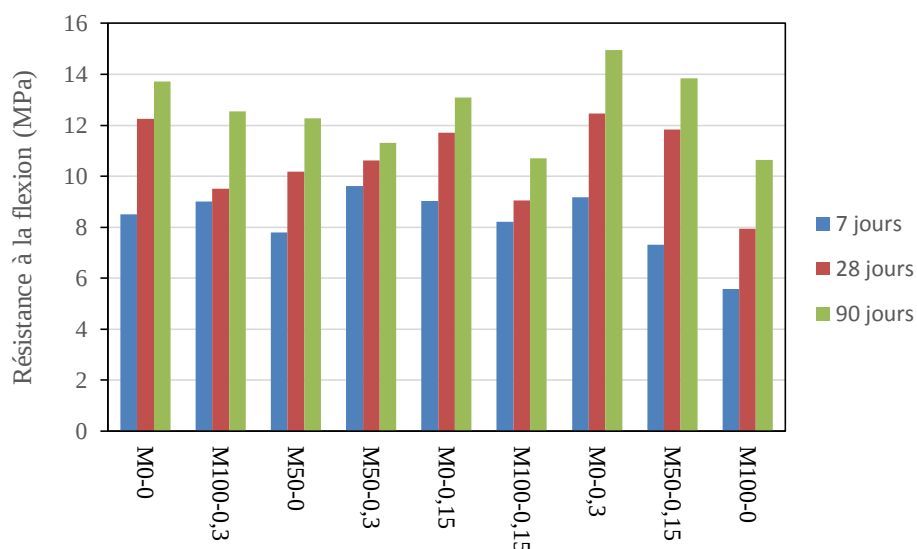


Figure 28 : Évolution de la résistance à la flexion des géopolymères selon le taux de substitution du sable siliceux par la perlite et le dosage en fibres de chanvre à différents âges de cure

L'évolution de la résistance à la flexion des différentes formulations géo polymériques met en évidence l'influence combinée du taux de substitution du sable siliceux par la perlite et de l'incorporation des fibres de chanvre sur le comportement mécanique en traction indirecte. D'une manière générale, toutes les formulations présentent une augmentation progressive de la résistance à la flexion entre 7, 28 et 90 jours, traduisant la poursuite des réactions de géo polymérisation et le développement progressif de la cohésion matricielle. Le mélange témoin M0-0 (100 % laitier et sable siliceux sans fibres) affiche une résistance de 8,51 MPa à 7 jours, augmentant à 12,26 MPa à 28 jours puis 13,72 MPa à 90 jours, indiquant un bon développement mécanique du matériau de référence. L'incorporation de 0,3 % de fibres de chanvre sans perlite (M0-0,3) améliore davantage les performances, avec des résistances atteignant 9,17 MPa à 7 jours, 12,47 MPa à 28 jours et 14,96 MPa à 90 jours, soit la meilleure performance globale, ce qui suggère un effet bénéfique des fibres sur la limitation de la propagation des microfissures et l'amélioration de la ténacité du composite. À l'inverse,

l'ajout plus faible de fibres (M0-0,15) conduit à des valeurs légèrement inférieures (9,03 ; 11,70 ; 13,09 MPa), indiquant qu'un dosage de 0,3 % semble plus favorable au renforcement en flexion.

Concernant les formulations intégrant de la perlite comme substitut du sable siliceux, une substitution totale (M100-0) entraîne une diminution significative des performances, avec seulement 5,57 MPa à 7 jours, 7,94 MPa à 28 jours et 10,64 MPa à 90 jours, ce qui peut être attribué à la nature poreuse et à la faible rigidité de la perlite, réduisant la compacité de la matrice géo polymérique et favorisant la concentration des contraintes. Toutefois, l'ajout de fibres de chanvre améliore ce comportement : M100-0,15 atteint 8,21 ; 9,05 ; 10,70 MPa, tandis que M100-0,3 présente des valeurs supérieures (9,01 ; 9,51 ; 12,55 MPa), démontrant que les fibres compensent partiellement la perte de résistance induite par la substitution totale en jouant un rôle de pontage des fissures. Pour les formulations à substitution intermédiaire (50 % de perlite), les résultats montrent un comportement plus équilibré. Le mélange M50-0 présente des résistances de 7,79 ; 10,17 ; 12,28 MPa, alors que l'ajout de 0,15 % de fibres (M50-0,15) améliore sensiblement les performances à long terme (13,84 MPa à 90 jours). En revanche, le mélange M50-0,3 affiche un comportement atypique avec une augmentation plus limitée (9,61 ; 10,63 ; 11,31 MPa), suggérant qu'un dosage élevé en fibres associé à une substitution partielle pourrait avoir entraîné une dispersion moins homogène ou une augmentation locale de porosité affectant la résistance en flexion. Globalement, les résultats indiquent que la résistance à la flexion est fortement influencée par le dosage en fibres de chanvre, celles-ci améliorant significativement la capacité du matériau à résister aux contraintes de traction, tandis que la substitution totale du sable siliceux par la perlite réduit les performances mécaniques en raison de l'augmentation de la porosité, bien qu'une substitution partielle combinée à un dosage optimisé en fibres permette d'obtenir un compromis satisfaisant entre légèreté et propriétés mécaniques.

Masse volumique :

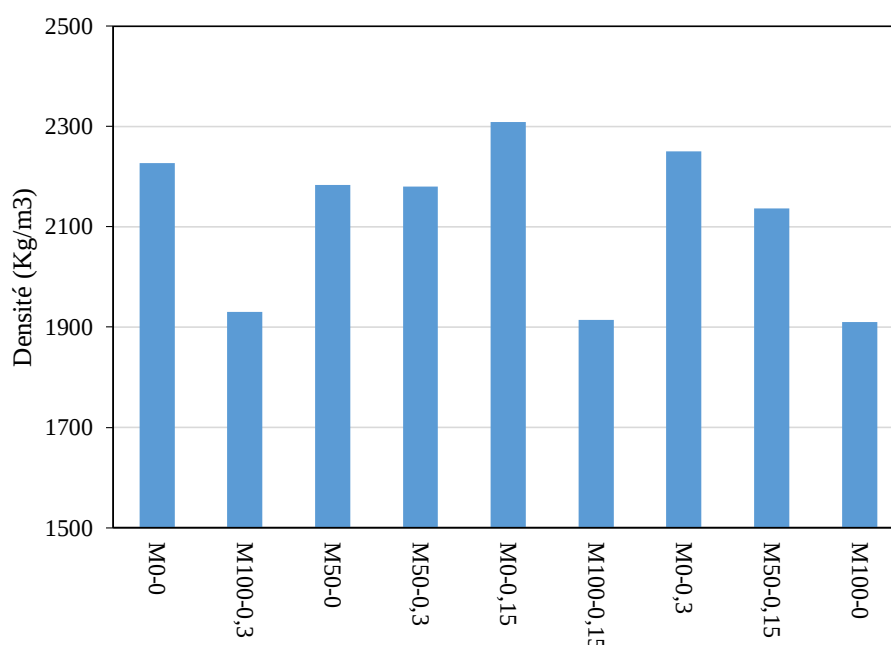


Figure 29 : Variation de la masse volumique à l'état sec des géopolymères en fonction du taux de substitution du sable siliceux par la perlite et de l'ajout de fibres de chanvre.

La figure de la masse volumique à l'état sec des différents géopolymères met clairement en évidence l'influence des substitutions du sable siliceux par la perlite ainsi que l'effet des ajouts de fibres de chanvre sur la compacité globale des matériaux. Le mélange de référence M0-0 (100 % laitier et 100 % sable siliceux) présente une masse volumique de 2226,56, servant de base de comparaison. Lorsque le sable est totalement remplacé par la perlite (M100-0), on observe une diminution nette de la masse volumique à 1910,16, soit une réduction d'environ 14 %, ce qui confirme l'effet allégeant très marqué de la perlite en raison de sa faible densité et de sa structure poreuse. Une tendance similaire est observée pour les formulations avec 0,15 % et 0,3 % de fibres de chanvre associées à 100 % de substitution (M100-0,15 et M100-0,3), avec des valeurs respectives de 1914,26 et 1929,96, montrant que l'introduction des fibres n'augmente que légèrement la masse volumique par rapport au mélange sans fibres, probablement en raison d'un effet de réarrangement granulométrique et d'un léger comblement des vides. Pour les formulations à substitution partielle (50 % de perlite), les masses volumiques (2183,59 pour M50-0, 2179,69 pour M50-0,3 et 2136,37 pour M50-0,15) restent proches de celle du témoin, ce qui indique que le remplacement partiel conserve une structure relativement dense, tout en introduisant une légère tendance à la diminution lorsque la teneur en fibres augmente. Enfin, les formulations sans perlite mais avec fibres (M0-0,15 et M0-0,3) montrent un comportement légèrement différent avec une

augmentation de la masse volumique par rapport au témoin, atteignant respectivement 2308,59 et 2250, ce qui suggère que de faibles dosages de fibres peuvent améliorer le compactage de la matrice ou réduire la porosité apparente par un effet de pontage interne. Globalement, les résultats traduisent une hiérarchie claire des effets : la perlite est le facteur dominant de réduction de masse volumique, tandis que les fibres de chanvre jouent un rôle secondaire, modulant légèrement la compacité selon leur dosage et leur interaction avec la matrice géopolymère.

Porosité :

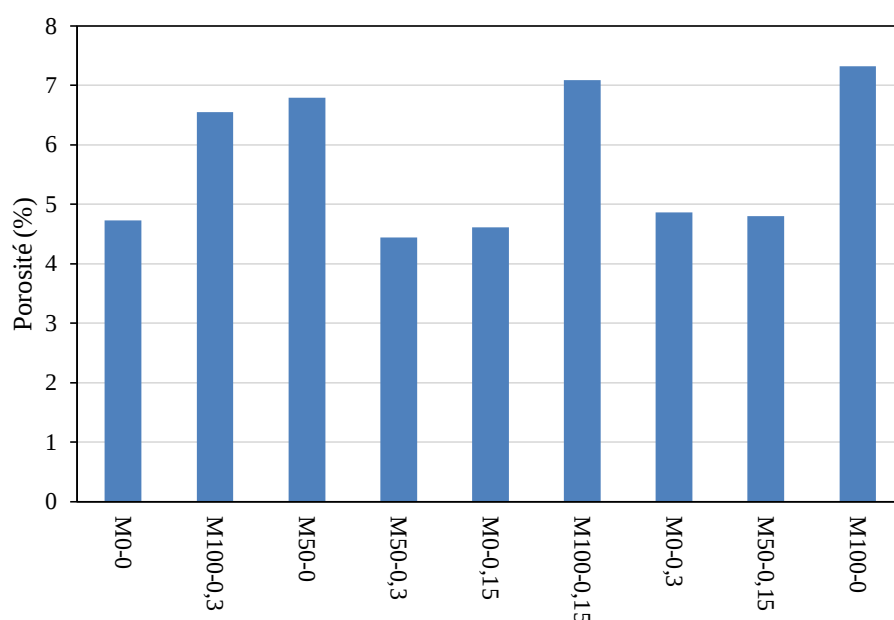


Figure 30 : Influence de la substitution du sable siliceux par la perlite et des fibres de chanvre sur la porosité accessible à l'eau des géopolymères

L'analyse des résultats de la porosité accessible à l'eau met en évidence l'influence significative de la substitution du sable siliceux par la perlite ainsi que l'effet modulateur des fibres de chanvre sur la structure poreuse des géopolymères. Le mélange de référence M0-0, constitué de 100 % laitier et 100 % sable siliceux, présente une porosité accessible à l'eau de 4,72 %, indiquant une matrice relativement dense et peu perméable. Lorsque le sable siliceux est totalement substitué par la perlite sans ajout de fibres (M100-0), la porosité augmente fortement pour atteindre 7,32 %, soit une hausse d'environ 55 % par rapport au témoin, ce qui confirme le caractère très poreux de la perlite lié à sa structure alvéolaire et à sa forte capacité

d'absorption d'eau. Cette augmentation de porosité demeure élevée pour les formulations contenant des fibres de chanvre avec substitution totale, atteignant 7,09 % pour M100-0,15 et 6,55 % pour M100-0,3, ce qui suggère que l'ajout progressif de fibres tend à réduire légèrement la porosité du composite allégé, probablement grâce à un effet de redistribution des contraintes internes et à une meilleure cohésion de la matrice autour des granulats légers. Dans le cas des formulations à 50 % de substitution par la perlite, les résultats révèlent un comportement plus contrasté : M50-0 affiche une porosité élevée de 6,79 %, proche des formulations à 100 % perlite, tandis que l'introduction de fibres réduit sensiblement cette valeur à 4,80 % pour M50-0,15 et même à 4,44 % pour M50-0,3, soit une diminution d'environ 35 % par rapport à M50-0, traduisant un effet bénéfique notable des fibres de chanvre sur la limitation des pores accessibles à l'eau, probablement par un meilleur ancrage interne et un effet de pontage limitant la propagation des microvides. En revanche, pour les formulations sans perlite (M0-0,15 et M0-0,3), la porosité reste relativement stable, avec des valeurs de 4,61 % et 4,86 %, très proches du témoin, indiquant que les fibres seules n'altèrent pas significativement la microstructure lorsque le sable siliceux dense est maintenu. Globalement, les résultats montrent que la substitution par la perlite constitue le principal facteur d'augmentation de la porosité accessible à l'eau, tandis que les fibres de chanvre, particulièrement à 0,3 %, exercent un effet correcteur important en améliorant la compacité de certaines formulations et en limitant l'accessibilité des pores à l'eau.

Conclusion

Les résultats obtenus au cours de ce chapitre ont permis de mettre en évidence l'influence notable de la substitution du sable siliceux par la perlite et de l'incorporation des fibres de chanvre sur les propriétés des géopolymères à base de laitier. L'analyse de l'ouvrabilité a montré que la perlite améliore significativement la fluidité des mélanges, tandis que les fibres de chanvre réduisent progressivement l'étalement en raison de leur capacité d'absorption d'eau et de leur effet de cohésion interne. Sur le plan mécanique, une augmentation générale des résistances à la compression et à la flexion avec l'âge de cure a été observée pour toutes les formulations, traduisant la poursuite des réactions de géopolymérisation. Toutefois, une substitution totale du sable siliceux par la perlite a entraîné une diminution des performances mécaniques en raison de l'augmentation de la porosité et de la réduction de la compacité du matériau. En revanche, une substitution partielle de 50 % associée à un dosage adapté en fibres, notamment 0,3 % de chanvre, a permis d'obtenir un compromis particulièrement

intéressant entre allègement et résistance mécanique, avec des performances proches, voire supérieures dans certains cas, à celles du mélange de référence. Les résultats de masse volumique et de porosité ont également confirmé le rôle déterminant de la perlite dans la réduction de la densité du matériau, bien qu'elle favorise une augmentation de la porosité accessible à l'eau. Les fibres de chanvre ont montré un effet correcteur dans certaines formulations en améliorant la cohésion interne et en limitant partiellement l'accessibilité des pores. Globalement, cette étude démontre qu'une optimisation du taux de substitution en perlite et du dosage en fibres végétales permet de concevoir des géopolymères allégés présentant des propriétés physiques et mécaniques satisfaisantes, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses pour le développement de matériaux de construction écologiques et performants

Conclusion generale :

Ce travail de recherche, axé sur le développement d'éco-matériaux de construction durables et à faible empreinte carbone, a permis de caractériser rigoureusement l'impact de l'incorporation combinée de la perlite et des fibres de chanvre au sein d'une matrice géopolymérique à base de laitier de haut fourneau activé alcalinement. L'investigation expérimentale montre qu'à l'état frais, la substitution du sable siliceux par la perlite augmente considérablement l'ouvrabilité et la fluidité des mélanges en raison de sa morphologie, tandis que l'introduction des fibres de chanvre tend à réduire l'étalement par sa forte capacité d'absorption d'eau. À l'état durci, l'intégration de la perlite remplit efficacement son rôle d'allègement en abaissant la masse volumique sèche des composites, bien qu'une substitution totale à 100 % induise une porosité ouverte accrue qui pénalise les propriétés mécaniques. Néanmoins, l'ajout judicieux de fibres de chanvre agit comme un agent correcteur majeur en limitant la propagation des microfissures grâce à un mécanisme de pontage performant qui renforce la cohésion interne. L'analyse globale révèle qu'une synergie optimale est obtenue avec la formulation combinant 50 % de perlite et 0,3 % de fibres de chanvre, qui atteint des résistances remarquables à la compression allant jusqu'à 60 MPa à 90 jours de cure. En définitive, ce composite hybride représente un excellent compromis pour l'éco-construction en Algérie, unissant gain de poids, potentiel d'isolation thermique et hautes performances structurelles, tout en ouvrant de prometteuses perspectives sur l'évaluation de sa durabilité à long terme et l'optimisation des traitements de surface de ses fibres végétales

Références :

- [1] Agashua, L. O., et al. (2024). A systematic review of geopolymer materials.
- [2] Sierra, K., et al. (2024). Geopolymer binder as a grouting material.
- [3] Wang, P., et al. (2025). Research hotspots in metakaolin-based geopolymers.

- [4] Bondar, D., et al. (2024). *Alternative Binders and Sustainable Concrete: A Review of Geopolymer Materials*. Journal of Sustainable Cement-Based Materials. (Une synthèse actualisée sur l'usage des laitiers et des cendres).

- [5] Lahoti, M., et al. (2023). *Metakaolin-based geopolymers: Influence of synthesis parameters on microstructure*. Construction and Building Materials, Vol. 365. (Étude spécifique sur la réactivité du méta-kaolin).

- [6] Singh, B., et al. (2024). *Geopolymer concrete: A review of some recent developments*. Case Studies in Construction Materials. (Focus sur les cendres volantes et la réduction de l'empreinte carbone).

- [7] Zhang, P., et al. (2023). *Effect of alkaline activators on the properties of geopolymer: A comprehensive review*. Journal of Cleaner Production. (Analyse comparative entre NaOH et silicates).

- [8] Amran, M., et al. (2022). *Alkali-activated materials: A review of raw materials and activators*. Materials Today: Proceedings. (Détails sur la chimie des solutions activatrices).

- [9] Davidovits, J. (2023). *Geopolymer Chemistry and Applications*. 6th Edition, Institut Géopolymère. (L'ouvrage de référence actualisé sur les ratios chimiques et la polymérisation).

- [10] Hassan, A., et al. (2024). *Impact of chemical composition on the microstructural evolution of alkali-activated binders*. Journal of Building Engineering, Vol. 82. (Étude sur l'influence des oxydes et du calcium).

[11] Mejia, J., et al. (2023). *Effect of curing temperature on the long-term properties of fly ash-based geopolymers*. Construction and Building Materials. (Analyse des cycles thermiques).

[12] Nguyen, L., et al. (2024). *Curing conditions and their influence on the shrinkage and durability of geopolymers*. Cement and Concrete Research. (Recherche sur l'humidité et la durabilité).

[13] Zhuang, X., et al. (2023). *Optimization of Si/Al and Na/Al molar ratios for high-strength metakaolin geopolymers*. Materials Today Communications. (Analyse précise des rapports molaires optimaux).

file:///C:/Users/hp/Downloads/F1_4_BENAMEUR_RANDA%20(1).pdf[14].

[15] Habert, G., & Ouellet-Plamondon, C. (2021). *Recent updates on the environmental impact of geopolymer concrete*. Journal of Cleaner Production, vol. 294, 126235.

[16] Al-Majidi, K., et al. (2022). *Development of geopolymer mortar as a repair material for reinforced concrete beams*. Construction and Building Materials, vol. 315, 125712.

[17] Zhang, M., et al. (2023). *Sustainability of geopolymer technology in soil stabilization: A comprehensive review*. Transportation Geotechnics, vol. 38, 100913.

[18] Lahoti, M., et al. (2020). *Behavior of geopolymer fly ash concrete at elevated temperatures: A critical review*. Cement and Concrete Composites, vol. 113, 103650.

[19] Davidovits, J. (2022). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute, 6th edition. (Livre de référence pour les fondements techniques).

[20] Gay, D. (2014). *Matériaux composites*. 6ème édition, Lavoisier, Paris.
(Ouvrage de référence sur les concepts fondamentaux et la mise en œuvre).

[21] Berthelot, J. M. (2012). *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures*. 5ème édition, Tec & Doc.

(Se concentre sur les interactions entre matrice et renfort).

[22] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Science et génie des matériaux*. 10ème édition, Wiley (Traduction française disponible).

(Explication détaillée de la science des matériaux et des structures composites).

[23] Agassant, J. F., & al. (2014). *La mise en forme des matières plastiques*. Lavoisier.

(Source technique sur les types de matrices et les procédés industriels)

[24] Hassan, A., & al. (2024). *Advances in Geopolymer Science: Microstructural Development and Mechanical Properties*. Journal of Building Engineering.

[25] Zhuang, X. Y., & al. (2023). *The filler effect of mineral fines on the hydration and strength of alkali-activated slag/fly ash systems*. Construction and Building Materials, Vol. 365.

[26] Amran, M., & al. (2022). *Properties and applications of geopolymer composites: A review*. Reviews on Advanced Materials Science, 61(1).

[27] Singh, B., & al. (2021). *Role of ultra-fine particles in the geopolymerization process and mechanical strength enhancement*. Cement and Concrete Composites.

[28] Lahoti, M., & al. (2020). *Influence of filler characteristics on the performance of geopolymer mortars*. Journal of Cleaner Production.

[29] Hassan, A., & al. (2025). *Influence of aggregate grading on the long-term performance of alkali-activated mortars*. Construction and Building Materials, Vol. 450.

[30] Amran, M., & al. (2024). *Shrinkage behavior of geopolymer composites: The role of fine and coarse sand fillers*. Journal of Building Engineering.

[31] Zhang, P., & al. (2023). *Mechanical properties of geopolymer concrete with different sand-to-binder ratios*. Cement and Concrete Composites.

[32] Singh, B., & al. (2022). *Microstructural analysis of the interface between natural sand and geopolymer matrix*. Materials Today: Proceedings

- [33] Lahoti, M., & al. (2023). *Optimization of sand content in sustainable alkali-activated materials for structural applications*. Journal of Cleaner Production.
- [34] Chandra, S., & Berntsson, L. (2021). *Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications*. 2nd Edition, William Andrew Publishing.
- [35] Bogas, J. A., & al. (2023). *Structural lightweight aggregate concrete: A review on the source of aggregate and its influence on concrete properties*. Construction and Building Materials, Vol. 370.
- [36] Asadi, I., & al. (2022). *Thermal conductivity of lightweight aggregate concrete: A review of influential factors*. Journal of Building Engineering.
- [37] Zhang, S., & al. (2024). *Mechanical and microstructural properties of geopolymer concrete incorporating expanded clay and glass aggregates*. Cement and Concrete Composites.).
- [38] Zou, D., & al. (2020). *Influence of lightweight aggregate types on the interfacial transition zone (ITZ) of concrete*. Journal of Cleaner Production..
- [39] Balasubramanian, B., & al. (2024). *Perlite-based geopolymer composites: Thermal insulation and mechanical performance analysis*. Construction and Building Materials, Vol. 412.
- [40] Kazemi, M., & al. (2023). *Performance of lightweight concrete containing perlite aggregate: A comprehensive review*. Journal of Building Engineering.).
- [41] Ibrahim, M., & al. (2022). *Influence of expanded perlite on the microstructural and physical properties of alkali-activated materials*. Cement and Concrete Composites.
- [42] Rashad, A. M. (2021). *The functional use of perlite in chemical admixtures and construction materials - A review*. Journal of Cleaner Production.
- [43] Vavro, M., & al. (2020). *Physical and chemical properties of perlite and its use in sustainable construction*. Materials Science Forum.

- [44] Kabay, N., & al. (2024). *Advanced Thermal Insulation Materials: The Role of Expanded Perlite in Green Construction*. Construction and Building Materials, 415.
- [45] Al-Mashhadani, M. M., & al. (2023). *Microstructural Characterization of Geopolymer Paste Incorporating Perlite Powder*. Case Studies in Construction Materials.
- [46] Topal, A., & al. (2022). *Bond strength between perlite aggregate and alkali-activated matrices: An SEM study*. Cement and Concrete Composites.
- [47] Joudi-Bahri, M., & al. (2021). *Thermal and mechanical properties of perlite-based geopolymer mortars: Effect of aggregate size*. Journal of Building Engineering.
- [48] Celik, A. G., & al. (2020). *Investigation of fire resistance of geopolymer composites containing expanded perlite*. Fire and Materials.
- [49] Ardanuy, M., & al. (2025). *Vegetable Fiber Reinforced Geopolymer Composites: A Review of Mechanical and Durability Properties*. Cement and Concrete Composites, Vol. 145.
- [50] Senthil, K., & al. (2023). *Natural fibers as sustainable reinforcements in cementitious and alkali-activated mixtures*. Journal of Cleaner Production.
- [51] Ferreira, S. R., & al. (2022). *Interface and durability of vegetable fiber reinforced geopolymer composites*. Construction and Building Materials.
- [52] Ranjbar, N., & Kuenzel, C. (2020). *Fiber-reinforced geopolymer composites: A review*. Cement and Concrete Composites.
- [53] Yan, L., & al. (2021). *Plant fiber reinforced alkali-activated composites: A state-of-the-art review*. Journal of Materials Science.
- [54] Mémoire de rayane boukhetala et chahrazede madadi universiti BBA
- [55] Balasubramanian, B., & al. (2024). *Synergetic effect of perlite and natural fibers on the thermal insulation of geopolymer composites*. Construction and Building Materials, Vol. 412.

[56] Kazemi, M., & al. (2025). *Mechanical performance and durability of lightweight fiber-reinforced geopolymer concrete: A review*. Journal of Building Engineering, Vol. 82..

[57] Hassan, A., & al. (2023). *Microstructural development of perlite-based geopolymer reinforced with hybrid fibers*. Cement and Concrete Composites.

[58] Zhang, S., & al. (2024). *Interfacial bond strength in lightweight aggregate geopolymer composites: Role of mineral fines and fibers*. Materials & Design.

[59] Amran, M., & al. (2022). *Thermal conductivity of geopolymer composites: A review of influential factors and light-weight aggregates*. Fuel, Vol. 310.

[60] Balasubramanian, B., & al. (2024). *Advances in Lightweight Geopolymer Composites: A Review of Thermal and Mechanical Performance*. Construction and Building Materials, Vol. 412.

[61] Amran, M., & al. (2022). *Developments in Foamed Geopolymer Concrete: A State-of-the-Art Review*. Journal of Building Engineering.

[62] Kazemi, M., & al. (2025). *Lightweight Aggregate Geopolymers: From Microstructure to Macro-properties*. Cement and Concrete Composites, Vol. 85.

[63] Hassan, A., & al. (2024). *Synergy between Perlite and Natural Fibers in Alkali-Activated Materials*. Materials & Design.

[64] Zhang, S., & al. (2023). *Recent Progress in Interfacial Engineering of Geopolymer Composites*. Journal of Materials Science.