

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université du 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de : Génie Civil & Hydraulique
Spécialité : Génie Civil
Option : Structures

Présenté par : ABU METTLEQ Belal Zeyad Mohammed
MIQDAD Qasem Riyad Abdalqader

Thème : Incorporation des fibres naturelles dans les composites géopolymères et leur impact sur la microstructure et durabilité des matériaux composites : Etat de l'art

Sous la direction de : Dr. BENZANNACHE Naziha

Juin 2024



Remerciements

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté et la persévérance nécessaires pour élaborer ce travail.

Dans un premier temps, on tient à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur *Dr BENZANNACHE Naziha*, pour son soutien indéfectible, ses conseils judicieux, sa disponibilité et sa patience tout au long de ce projet. Ses précieux enseignements et son expertise ont été pour nous une source inestimable de motivation et de perfectionnement.

Un grand Merci à *Dr MAIZI Salah Eddine* qui grâce à lui, on a pu disposer d'une base de données solide sur laquelle on pouvait s'appuyer pour mener à bien notre démarche de recherche et d'analyse.

Nous profitons également de cette occasion pour exprimer notre gratitude envers les membres du jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'avoir apporté les critiques nécessaires à la rédaction de cet ouvrage.

Nos sincères remerciements vont également à tous nos enseignants, qui ont partagé avec nous leur savoir et leur passion tout au long de notre formation. Leur dévouement à l'enseignement et leur encouragement ont joué un rôle crucial dans notre développement académique et personnel.

A la fin on souhaite également remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Qasem & Belal

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents en signe de reconnaissance pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de ma vie. Votre soutien indéfectible, votre amour inconditionnel et vos encouragements constants ont été les piliers de ma réussite.

À mon père, ma source d'inspiration dans cette vie, qui est toujours avec moi malgré mon éloignement.

À ma mère, qui m'a encouragé tout au long de mes études et sans qui ma réussite n'aurait pas été obtenue.

À l'âme de mon frère martyr et de tous nos justes martyrs. Votre sacrifice ne sera jamais oublié. Vous avez donné votre vie pour défendre notre liberté et notre dignité. Votre courage et votre résilience face à l'adversité sont des témoins de la force et de la détermination de notre peuple.

À mes frères et sœurs qui sont mon soutien dans cette vie ainsi que Toute la famille :
Miqdad.

À tous ceux qui m'ont enseigné et aidé à mener à bien mon parcours universitaire et principalement mon encadre Dr. Naziha Benzannache.

À mes amis et compagnons. Merci pour votre amitié et pour être toujours là, dans les bons comme dans les mauvais moments.

MIQDAD QASEM

إهداءات

لله أولاً ثم الذين يعطوننا بغير مقابل أبي وأمي قرة العين والفؤاد هناك في غزة حيث الصومود والاحتساب، إلى السماء حيث عرج إليها أخي محمود شهيدا ، إلى من قال فيهم رب العزة سنشهد عضدك بأخيك اخوتي واخواتي الاحباء على قلبي الثابتين في غزة: حمزة، تامر ، عمر ، لنا ، هيلانا ، آلاء ، إلى منة الله علي من بيني وبينها كتاب الله والقدر.
-عائلة أبو مطلق جميعاً

أما هنا إلى من لم يدخروا جهداً لتذليل كافة العقبات أثناء دراستنا أساتذتنا الأعزاء وعلى الخصوص مشرفتي الأستاذة بن زناش نزيهه

إلى اصدقاءنا الاعزاء وزملاء الدراسة دفعة 2023-2024

لكم جميعاً اهدي هذه المذكرة المتواضعة

وأخيراً الجهد منا والتوفيق من الله ورضا الوالدين

Dédicaces

À Dieu d'abord, puis à ceux qui nous donnent sans contrepartie, mes chers parents lumières de mes yeux et de mon cœur là-bas à Gaza, où la résistance et les sacrifices, où mon frère Mahmoud est monté en martyr vers le ciel, vers le Tout-Puissant.

À Mes chers frères et sœurs qui résistent fermement à Gaza en espérant des jours meilleurs et une rencontre très proche Inchaa Allah.

À ceux qui n'ont ménagé aucun effort pour surmonter tous les obstacles pendant nos études, nos chers professeurs et notamment mon encadreur, l'honorable Dr. Naziha Benzannache.

À mes chers amis et camarades de classe de la promotion 2023-2024, je dédie humblement à tous ce travail.

"Enfin, l'effort vient de nous, la réussite vient de Dieu, et puis de la satisfaction des parents."

ABU METTLEQ BELAL

Résumé

Les composites géopolymères renforcés par des fibres naturelles, traitées et non traitées, offrent une alternative écologique et performante aux matériaux traditionnels. Les fibres traitées améliorent considérablement les propriétés mécaniques et la durabilité des composites. L'analyse scientométrique révèle un intérêt croissant et une collaboration internationale dynamique, soulignant l'importance de cette technologie pour un développement durable dans le secteur des matériaux de construction. Cette synthèse présente une vue d'ensemble de l'importance et des avantages des fibres naturelles dans les composites géopolymères, ainsi que l'apport de l'analyse scientométrique pour comprendre et évaluer la recherche dans ce domaine.

Mots-clés : Composite géopolymère, fibres naturelles, propriétés mécaniques, traitement chimique, analyse scientométrique, résistance à la compression.

ملخص

توفر مركبات الجيوبوليمر المعززة بالألياف الطبيعية، المعالجة وغير المعالجة، بديلاً بيئياً وعالي الأداء للمواد التقليدية. تعمل الألياف المعالجة على تحسين الخواص الميكانيكية ومتانة المواد المركبة بشكل كبير. يكشف التحليل السينتومتري عن اهتمام متزايد وتعاون دولي ديناميكي، مما يسلب الضوء على أهمية هذه التكنولوجيا للتنمية المستدامة في قطاع مواد البناء. تقدم هذه المراجعة لمحة عامة عن أهمية وفوائد الألياف الطبيعية في مركبات الجيوبوليمر، بالإضافة إلى مساهمة التحليل السينتومتري في فهم وتقييم الأبحاث في هذا المجال

الكلمات المفتاحية: مركب الجيوبوليمر، الألياف الطبيعية، الخواص الميكانيكية، المعالجة الكيميائية، التحليل السينتومتري، مقاومة الضغط

Abstract

Geopolymer composites reinforced with natural fibers, treated and untreated, offer an ecological and high-performance alternative to traditional materials. Treated fibers significantly improve the mechanical properties and durability of composites. Scientometric analysis reveals growing interest and dynamic international collaboration, highlighting the importance of this technology for sustainable development in the construction materials sector. This review presents an overview of the importance and benefits of natural fibers in geopolymer composites, as well as the contribution of scientometric analysis to understanding and evaluating research in this area.

Keywords: Geopolymer composite, natural fibers, mechanical properties, chemical treatment, scientometric analysis, compressive strength.

Liste des figures

Figure 1-1 : Les pyramides en Égypte.....	4
Figure 1-2 : Nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si /Al.....	5
Figure 1-3 : Les cendres volantes.....	6
Figure 1-4 : Tas de laitier de haut fourneau.....	7
Figure 1-5 : Bloc de pierre de taillée.....	7
Figure 1-6 : Le carbure de silicium	8
Figure 1-7 : Formulation de géopolymère.....	9
Figure 1-8 : Aéroport de « Brisbane West Wellcamp » en Australie réalisé avec un béton géopolymère.....	13
Figure 1-9 : Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994.....	13
Figure 1-10 : Réalisation d'un institut à l'université du Queensland, Australie (2013)	14
Figure 2-1 : Schéma illustratif d'un matériau composite.....	16
Figure 2-2 : Schéma des types de fibres naturelles.....	19
Figure 2-3 : Structure d'une fibre végétale.....	20
Figure 2-4 : Fibre naturelle lignocellulosique.....	20
Figure 2-5 : Schéma des types des fibres végétales.....	21
Figure 2-6 : Fibre d'ananas : (a) plante, (b) feuilles, (c) fibre brute, (d) solution de traitement NaOH à 1 % et (e) fibres traitées.....	25
Figure 2-7 : Acétylation avec ou sans catalyseur acide.....	26
Figure 3-1 : Interface graphique de l'application biblioshiny.....	30
Figure 3- 2: Etapes d'importation de fichiers. bib dans biblioshiny.....	30
Figure 3- 3: Résultats de l'analyse bibliographiques.....	31
Figure 3- 4: Exemple de visualisation des résultats bibliographiques.....	31
Figure 3- 5: Nombre d'articles publiés chaque année.....	33

Figure 3- 6: Revues Top 10 ayant le plus d'articles dans le domaine des CGRFN : a) Scopus ; b) WOS	34
Figure 3- 7: Les articles les plus cités.....	35
Figure 3- 8: Tendances et fréquence des mots clés.....	36
Figure 3- 9: Fibres naturelles les plus utilisées dans le renforcement des CGRFN.....	36
Figure 3-1 0: (a & b) Réseau de collaboration.....	37
Figure 3-11 : Evolution des publications par pays.....	38
Figure 4-1 :Résistance en compression du composite en fonction du % de fibres de coton.....	40
Figure 4-2 :Résistance à la compression des composites géopolymères en fonction de la fibre contenu.....	40
Figure 4-3 :Résistance à la compression des composites géopolymères en fonction de la teneur en tissu.....	41
Figure 4-4 :Résistance à la compression au 7 ^{ème} jour des éprouvettes renforcées : a) avec du jute ; b) : avec des fibres de sisal.....	42
Figure 4-5 :Influence du dosage des fibres de bagasse sur la résistance à la compression.....	43
Figure 4-6 :Schéma montrant l'orientation des tissus de coton par rapport à la charge appliquée.....	44
Figure 4-7 : Résistance à la flexion des composites géopolymères en fonction de la teneur en fibres.....	45
Figure 4-8 :Résistance à la flexion des composites à base de géopolymères.....	47
Figure 4-9 :Résistance à la flexion des mortiers géopolymères.....	48
Figure 4-10 : Résistance à la compression.....	49
Figure 4-11 : Résistance à la compression.....	50
Figure 4-12 : Résistance à la compression de (a) les GFC avec différentes teneurs en KF/TKF/TKF-CaCl ₂ et (b) le mode de rupture des GFC avec un géopolymère pur, (c) TKF- CaCl ₂ -5% en poids, (d) TKF CaCl ₂ -10 % en poids, et (e) TKF-CaCl ₂ -15wt %.....	51

Figure 4-13 :Résistance à la compression des échantillons à différentes teneurs en fibres de coco testés après 28 jours.....	52
Figure 4-14 :Molarité et résistance à la flexion.....	53
Figure 4-15 :résistance à la flexion.....	54
Figure 4-16 : Résistance à la flexion des matériaux étudiés.....	55
Figure 4-17 :Résistance à la flexion en fonction du poids des fibres (%)	55

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Différents traitements proposés pour les fibres végétales.....	24
Tableau 3.1: Informations essentielles sur les données de SCOPUS et WOS.....	32
Tableau 4.1 : Test de résistance à la compression après 28 jours.....	42
Tableau 4.2 : propriétés mécaniques des composites renforcés de lin.....	44
Tableau 4.3 : Test de résistance à la flexion après 28 jours.....	46

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
Chapitre I : Les Géopolymères	3
1.Introduction	3
1.1 Historique :	3
1.2 Définition :	4
1.3 Types de géopolymère :	5
1.3.1 Géopolymères à base de cendres volantes	6
1.3.2 Géopolymères à base de laitier	6
1.3.3 Géopolymères à base de roche	7
1.3.4 Ferrosialates de géopolymères	8
1.3.5 Le ciment géopolymère	8
1.4 Technologie de fabrication des liants géopolymères :	10
1.5 Propriétés des géopolymères :	11
1.6 Applications récentes des géopolymères :	12
1.7 Conclusion :	14
Chapitre II : Les composites géopolymères renforcés de fibres naturelles	15
2.1 Introduction	15
2.2 Généralités sur les composites	15
2.3 Les composites géopolymères	16
2.3.1 Matrice	17
2.3.2 Renforts	17
2.4 Composites géopolymères renforcés avec les fibres naturelles	18
2.4.1 Les fibres végétales	19
2.4.2 Méthodes de traitement des fibres naturelles	22
Conclusion	26

CHAPITRE III : Analyse Scientométrique	27
3.1 Introduction	27
3.2 But de l'analyse Scientométrique	27
3.3 Principales sources de données bibliométriques	28
3.4 Méthodologie	29
<i>3.4.1 Base de données et mots clés</i>	29
<i>3.4.2 Analyse des données</i>	29
3.5 Résultats et discussion	32
<i>3.5.1 Tendances des publications et des citations</i>	33
<i>3.5.2 Mots clés</i>	35
<i>3.5.3 Fibres naturelles les plus utilisées dans les CGRFN</i>	36
<i>3.5.4 Réseaux de collaboration</i>	37
<i>3.5.5 Evolution des productions scientifiques des pays dans le domaine des CGRFN</i>	38
Conclusion	38
Chapitre IV : Propriétés Mécaniques des géopolymères renforcés avec les fibres naturelles	39
Introduction :	39
4.1 Propriétés mécaniques des géopolymères renforcés par les fibres naturelles non traitées	39
<i>4.1.1 Résistance à la compression :</i>	39
<i>4.1. 2 Résistance à la flexion :</i>	43
4.2 Propriétés mécaniques des composites géopolymères renforcés avec les fibres naturelles traitées	48
4.2.1 Résistance à la compression	48
4.2.2 Résistances à la flexion	52
Conclusion	56
Conclusion Générale	57
Références	59

Introduction Générale

La recherche scientifique sur les nouveaux matériaux de construction s'oriente ces dernières années vers le développement de nouveaux matériaux économiques et écologiques, à partir de matières premières locales et de sous-produits industriels, dans le but de réduire les matériaux polluants. Le ciment occupe une place prépondérante dans le secteur du génie civil et des travaux publics. Il joue un rôle crucial dans la production de divers types de mortier et de béton. Sa fabrication à l'usine demande des énergies considérables et des infrastructures industrielles massives qui ont un impact sur l'environnement. Cette industrie est le plus important consommateur de ressources naturelles au monde.

La production de ciment a connu des hausses significatives et devrait continuer à augmenter en raison de l'expansion massive des infrastructures et de l'industrialisation à travers le monde. On sait que la production de clinker est coûteuse et est également nocive pour l'environnement, car les émissions générées par les productions de ciment Portland sont parmi les principaux responsables de l'effet de serre.

Selon des estimations récentes, la production de ciment a entraîné une production de 377 millions de tonnes de carbone, ce qui suggère que les émissions ont plus que doublé depuis une dizaine d'années en raison de cette production. Toutefois, il est possible de prendre des mesures pour diminuer la production de dioxyde de carbone à partir des fours à ciment. Cependant, les émissions de dioxyde de carbone sont toujours d'environ 600 kg par tonne de ciment, dont 400 kg proviennent de la calcination du calcaire.

À la différence du béton et du mortier, le géopolymère, un matériau polymère inorganique, ne renferme aucun ciment Portland. Il s'agit d'un produit fabriqué à partir de matériaux de base en ajoutant des sous-produits tels que les cendres volantes. Cette réaction chimique entre les cendres volantes et une solution d'activation d'hydroxyde de sodium et de silicate de sodium produit un polymère inorganique d'aluminosilicate. Ce processus chimique est effectué à des températures ambiantes.

En raison des réglementations gouvernementales visant à réguler l'élimination des cendres volantes, les coûts d'élimination des cendres volantes sont très élevés. Cependant, le développement du béton géopolymère a permis une utilisation étendue du recyclage des cendres

volantes, ce qui a permis de réduire considérablement la quantité de cendres volantes stockées à long terme, tout en favorisant une réduction de carbone

Grâce à cette fabrication du nouveau matériau de construction, il est possible de substituer rapidement les ciments portland, tout en prévenant les attaques chimiques ou en réparant différentes structures en béton armé. Ils sont adaptés aux divers secteurs de la construction, de l'industrie et de l'énergie renouvelable. Les propriétés chimiques et mécaniques des géopolymères offrent la possibilité de diminuer les dépenses de production et de réduire les émissions de dioxyde de carbone CO₂ en accord avec les nouvelles exigences environnementales.

L'objectif principal de ce travail de recherche bibliographique est une analyse approfondie de l'état actuel de la recherche sur les géopolymères renforcés par des fibres naturelles et sur l'impact du traitement chimique de ces fibres sur leurs propriétés et leur comportement dans la matrice géopolymère. Le manuscrit de ce mémoire sera organisé en 4 chapitres comme suit :

Le premier chapitre sera consacré d'une part à la compréhension des fondements c'est à dire l'analyser de la composition chimique, les mécanismes de formation, et les propriétés intrinsèques des géopolymères. D'autre part l'exploration des diverses applications des géopolymères dans le secteur de la construction et des matériaux composites.

Le deuxième chapitre présentera les composites géopolymères constitués en général d'une matrice inorganique et de renforts. L'accent sera mis sur les composites géopolymères renforcés de fibres naturelles ainsi que sur leur identification (jute, chanvre, cellulose, etc.) et aussi des méthodes de traitement.

Quant au troisième chapitre, il se consacrera à l'analyse scientométrique appelée aussi analyse bibliométrique, qui est une méthodologie quantitative qui vise à étudier la production, la diffusion et l'impact de la recherche scientifique à travers l'analyse des données bibliographiques

Enfin le quatrième chapitre présentera une synthèse des travaux consacrée à l'effet de l'incorporation de fibres naturelles traitées et non traitées dans un composite géopolymère sur les propriétés mécaniques notamment la résistance à la compression et à la flexion.

Chapitre I : Les Géopolymères

1.Introduction

Le géopolymère est un nouveau matériau cimentaire respectueux de l'environnement, et le développement des géopolymères peut réduire les émissions de dioxyde de carbone causées par le développement du ciment industriel. Les matériaux géopolymères n'ont pas seulement d'excellentes propriétés mécaniques, mais aussi d'avoir une série d'excellentes propriétés telles que la résistance au feu et la résistance à la corrosion. La plupart des déchets industriels solides et les mâchefers d'incinération qui s'entassent à volonté ont un impact négatif sur l'environnement. Pour les recycler, ils peuvent être utilisés comme matières premières pour la préparation de géopolymères. Cette partie propose une description générale des matériaux géopolymères et principalement le mécanisme de géopolymérisation ainsi que leur structure [1].

1.1 Historique :

Victor Glukhovsky et par la suite Pavel Krivenko ont développé dans les années 1950 en Ukraine des systèmes activés par des alcalis, contenant des phases hydratées de silicate de calcium Ca_2SiO_4 et aluminosilicates, qui ont été utilisés pour construire un grand immeuble en Russie. Glukhovsky a été le premier à supposer que, puisque le processus géologique de transformation de certaines roches volcaniques en zéolithes a lieu lors de la formation des roches sédimentaires à basse température et pression, elle pourrait être donc modélisée et réalisée dans des systèmes cimentaires.

En 1972, Dévidoirs a nommé « géopolymères » les aluminosilicates tridimensionnels qui sont formés à basse température et à court terme par des aluminosilicates naturels (Davidovits, 1988). Ikeda (1998) a également déclaré que trois sources sont nécessaires pour la synthèse des géopolymères, à savoir les matières premières, la charge inactive et la liqueur géopolymère. Les matières premières peuvent être des minéraux naturels (aluminosilicates) ou des déchets industriels tels que les cendres volantes, les scories et les déchets de verre et charge inactive par exemple la kaolinite ou de la métakaolinite.

Après 1970, divers projets ont été mis en œuvre pour prouver la théorie de Davidovits selon laquelle les pyramides en Égypte ont été construites par coulée en place et ont permis de mettre en place une roche zéolite artificielle.



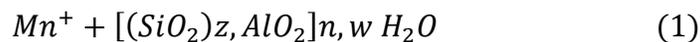
Fig. 1.1 : Les pyramides en Égypte [2]

Entre 1979 et 1995, de nombreux articles ont été publiés et des brevets ont été délivrés par Davidovits et son équipe sur la géopolymérisation. Ces brevets comprennent le développement d'un polymère minéral silico-aluminate qui se forme à des températures allant jusqu'à environ 120 °C sous forme de solution solide [3].

1.2 Définition :

Un géopolymère est un matériau solide à base d'aluminosilicate généralement formé par l'activation d'hydroxyde alcalin ou de silicate alcalin d'un précurseur solide tel que les cendres volantes de charbon, l'argile calcinée et/ou les scories métallurgiques. Aujourd'hui, la principale application de la technologie des géopolymères est le développement de matériaux de construction à faible émission de CO₂ comme alternative aux ciments à base de Portland [4].

- Les géopolymères sont de formule générale :



z : rapport molaire Si /Al

n : degré de polymérisation

w : la quantité de l'eau dans le matériau

Mn+ : cation métallique [5]

Les géopolymères sont des chaînes ou des réseaux de molécules minérales liées par des **liaisons covalentes**. Ils comprennent les unités moléculaires suivantes (ou les groupes chimiques) :

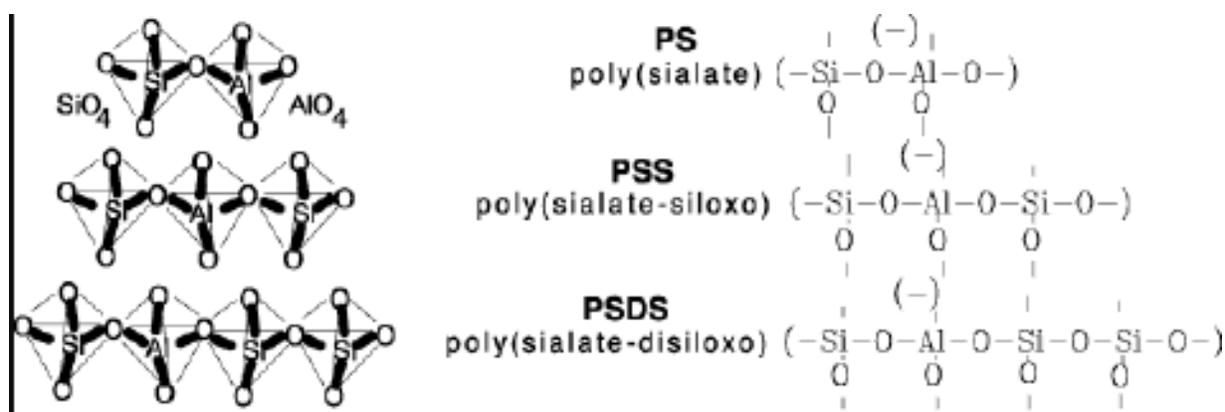


Fig. 1.2 : nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si /Al [6]

1.3 Types de géopolymère :

Les géopolymères peuvent être classés en deux grands groupes : les géopolymères inorganiques purs et les géopolymères contenant des matières organiques, analogues synthétiques de macromolécules naturelles.

Les polymères sont soit des matières organiques, c'est-à-dire à base de carbone, soit des polymères inorganiques, par exemple à base de silicium. Les polymères organiques comprennent les classes de polymères naturels (caoutchouc, cellulose), de polymères organiques synthétiques (fibres textiles, plastiques, films, élastomères, etc.)

Les matières premières utilisées dans la synthèse des polymères à base de silicium sont principalement des minéraux formant des roches d'origine géologique, d'où le nom géopolymère [7].

1.3.1 Géopolymères à base de cendres volantes

Ce type de géopolymère est fabriqué à partir de cendres volantes, qui est un déchet produit par les centrales électriques au charbon. Les cendres volantes sont une source riche en alumine et en silice, ce qui en fait un matériau idéal pour la fabrication de géopolymères.

Ces cendres sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les gaz de fumée des chaudières [8].



Fig.1.3 : Les cendres volantes

1.3.2 Géopolymères à base de laitier

Les géopolymères à base de laitier sont fabriqués à partir de laitier, qui est un sous-produit de la production de fer et d'acier. Le laitier est riche en calcium et en alumine, ce qui en fait un matériau idéal pour la fabrication de géopolymères. et son utilisation dans la fabrication de géopolymères offre une alternative durable à l'enfouissement ou à la mise en décharge [9].



Fig. 1.4 : Tas de laitier de haut fourneau [10]

1.3.3 Géopolymères à base de roche

Les géopolymères à base de roche sont fabriqués à partir de roches naturelles riches en alumine et en silice, telles que le kaolin, la bauxite et le basalte [11].



Fig. 1.5 : Bloc de pierre de taillée [12]

1.3.4 Ferrosialates de géopolymères

Les géopolymères ferrosialates sont un type de géopolymère qui contient du fer. Ils sont fabriqués à partir de sources de silice et d'alumine, ainsi que d'une source de fer, telle que la limaille de fer ou le sulfate de fer. Les géopolymères ferrosialates présentent une résistance et une durabilité accrues par rapport aux autres types de géopolymères [13].



Fig. 1.6 : Le carbure de silicium [14]

1.3.5 Le ciment géopolymère

Il y a souvent confusion entre la signification des deux termes (ciment géopolymère) et (béton géopolymère). Un ciment est un liant alors que le béton est le matériau composite résultant de l'addition de ciment à des agrégats. En d'autres termes, pour produire un béton, on achète un ciment (généralement du ciment Portland ou du ciment géopolymère) et on l'ajoute à la gâchée de béton. La comparaison entre la chimie du Portland et celle du géopolymère montre de profondes différences, expliquant leurs propriétés. Le durcissement du Portland se fait par simple hydratation, les silicates tricalcique C3S et bicalcique C2S donnent du silicate monocalcique hydraté CSH, ainsi que de la chaux libre Ca(OH)_2 alors que la prise du ciment géopolymère s'effectue par polycondensation d'oligo-(sialate-siloxo) de potassium ou de sodium en poly(sialate-siloxo).

Pour fabriquer un ciment géopolymère, on emploie :

- Une matière première aluminosilicate : argiles calcinées MK-750, roches calcinées ou non, cendres volantes, laitier de haut fourneau ;
- Un réactif alcalin inoffensif (silicates solubles de sodium ou de potassium avec un rapport molaire $SiO_2 : M_2O > 1,45 M$ (étant Na ou K))
- De l'eau.

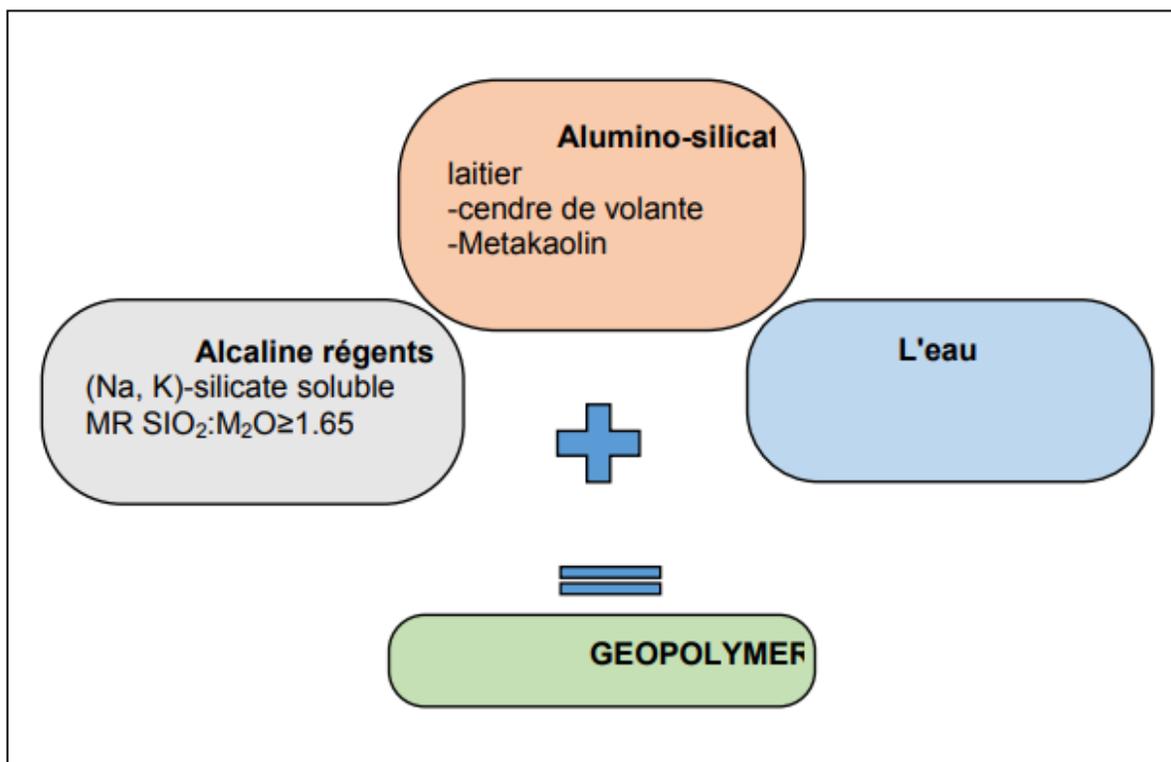


Fig.1.7 : formulation de géopolymère

❖ *Catégories des ciments géopolymères faisant l'objet d'utilisation courante :*

- Le ciment géopolymère à base de laitier/MK-750 : matrice (K Na, Ca)-poly(sialate- siloxo) Si:Al=2
- Le ciment géopolymère à base de laitier/roches : matrice (K.Na,Ca)-poly(sialate- disiloxo) Si:Al=3

- Le ciment géopolymère à base de laitier/cendres volantes classe F: matrice (K,Na,Ca)-poly(sialate-siloxo) Si:Al=2
- Le ciment géopolymère à base de laitier/ferrosialates (en développement). [15]

1.4 Technologie de fabrication des liants géopolymères :

La technologie de fabrication des liants géopolymères implique généralement la réaction de précurseurs inorganiques riches en alumine et en silice avec un activateur alcalin pour former un réseau polymérique tridimensionnel. Voici les étapes générales de fabrication des liants géopolymères :

1. Sélection des matières premières : Les matières premières typiques utilisées dans la fabrication des liants géopolymères comprennent les cendres volantes, le méta kaolin, les scories, les cendres de biomasse, et d'autres matériaux riches en aluminosilicates. Ces matériaux sont sélectionnés en fonction de leur composition chimique et de leurs propriétés réactives [16].
2. Mélange des précurseurs : Les précurseurs inorganiques sont mélangés selon des proportions spécifiques pour obtenir la composition souhaitée du liant géopolymère. Le mélange peut inclure des additifs tels que des activateurs alcalins, des agents de réticulation, des charges, etc., en fonction des propriétés désirées du produit final [17].
3. Activation alcaline : Les précurseurs inorganiques mélangés sont activés par l'ajout d'une solution alcaline, généralement une solution de silicate de sodium ou d'hydroxyde de sodium. Cette étape déclenche la polymérisation des précurseurs pour former le réseau polymérique géopolymère [18].
4. Durcissement : Une fois activés, les mélanges sont coulés dans des moules ou appliqués sur des substrats, puis laissés à durcir à température ambiante ou soumis à une cure thermique pour accélérer le durcissement. Ce processus permet au liant géopolymère de former une structure solide [19].

5. Caractérisation et contrôle de la qualité : Une fois durcis, les liants géopolymères sont soumis à des tests de caractérisation pour évaluer leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques. Ces tests aident à garantir la conformité aux normes de qualité et à optimiser les formulations pour des applications spécifiques [20].

1.5 Propriétés des géopolymères :

Les géopolymères présentent un large éventail de propriétés qui en font des matériaux attrayants pour diverses applications. Voici quelques-unes des propriétés importantes des géopolymères :

- 1- Résistance mécanique élevée : Les géopolymères peuvent présenter une résistance mécanique élevée, comparable voire supérieure à celle des matériaux traditionnels tels que le ciment Portland. Cette résistance mécanique peut être ajustée en modifiant la formulation des géopolymères et les conditions de durcissement [21].
- 2- Résistance aux produits chimiques : Les géopolymères sont souvent résistants aux attaques chimiques, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des environnements corrosifs ou en contact avec des substances chimiques agressives. Cette propriété est particulièrement utile dans les applications industrielles et environnementales [22].
- 3- Faible porosité : Les géopolymères peuvent présenter une porosité réduite par rapport au ciment Portland, ce qui les rend moins perméables aux liquides et aux gaz. Cette faible porosité contribue à améliorer la durabilité et la résistance aux intempéries des géopolymères [23].
- 4- Le ciment géopolymère durcit rapidement à température ambiante et offre des résistances à la compression de l'ordre de 20 MPa, après seulement 4 heures à 20°C, lorsqu'il est testé conformément aux normes appliquées aux mortiers de liant hydrauliques. La force de compression finale sur 28 jours est de l'ordre de 70 à 100 MPa [24].

- 5- Les émissions de carbone sont également plus faibles dans les géopolymères où la réduction de 80% et 70% du carbone L'émission est réalisée pour les géopolymères à base de roche et à base de scories respectivement [25].
- 6- Faible retrait au séchage : Les géopolymères présentent généralement un faible retrait au séchage par rapport au ciment Portland, ce qui réduit les risques de fissuration et améliore la durabilité des structures en géopolymères [26].

1.6 Applications récentes des géopolymères :

Les géopolymères ont été de plus en plus utilisés dans le domaine de la construction et du génie civil en raison de leurs propriétés améliorées par rapport aux matériaux traditionnels tels que le ciment Portland. L'utilisation de composites géopolymères et de ciments géopolymères dans la construction de pistes d'atterrissage d'aéroports présente plusieurs avantages, notamment une durabilité accrue, une résistance élevée aux charges lourdes et une résistance aux conditions environnementales adverses.

En Australie, Le Brisbane West Wellcamp Airport (BWWA), Toowoomba, Queensland, est le premier aéroport australien réalisé depuis plus de 48 ans. Ce projet représente une étape significative en génie civil, car c'est le plus grand chantier réalisé en ciment géopolymère et béton géopolymère. L'aéroport BWWA contient environ 40 000 m³ de béton géopolymère, ce qui fait de lui le plus grand chantier de travaux publics dans le monde utilisant cette nouvelle classe de matériaux mise au point par la société australienne Wagners sous le nom de [Earth Friendly Concrete (EFC)] ; le béton géopolymère EFC possède des caractéristiques idéales pour cette application : résistance à la flexion élevée, faible retrait et excellente mise en place. Tarmac, bout de piste, taxiways, ont une épaisseur de 435 mm et sont bien adaptés au lourd trafic [27].



Fig.1.8 : Aéroport de « Brisbane West Wellcamp » en Australie réalisé avec un béton géopolymère

Concernant le domaine de génie civil, l'utilisation de matériaux géopolymères à une échelle pratique peut être divisée en trois catégories : Construction de bâtiments, d'éléments préfabriqués pour un ouvrages d'art et production d'élément de maçonnerie (blocs, pavés, corps creux, etc..) construction de routes et de canalisations dans les travaux publics.



Fig. 1.9 : Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994

Par exemple en (2013), la société australienne Wagner a utilisé le béton géopolymère à base de laitier et de cendres volantes comme moyen de réaliser un institut (Global change Institute) à l'université du Queensland, Australie.



Fig. 1.10 : Réalisation d'un institut à l'université du Queensland, Australie (2013).

1.7 Conclusion :

En conclusion, les géopolymères représentent une classe de matériaux prometteurs avec un large éventail d'applications dans divers domaines tels que la construction, l'ingénierie civile, l'industrie chimique, l'industrie minière, et bien d'autres. Leur formulation à base de précurseurs inorganiques activés d'alcalisation offre des avantages significatifs par rapport aux matériaux traditionnels tels que le ciment Portland, notamment en termes de performances mécaniques, de durabilité, de résistance chimique, et d'empreinte carbone réduite. Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les géopolymères présentent également des défis tels que la nécessité de mieux comprendre leur comportement à long terme, leur adhérence aux substrats, et leur réponse aux environnements extrêmes. Des recherches continues sont nécessaires pour améliorer leurs applications spécifiques, et promouvoir leur adoption à grande échelle dans l'industrie.

Chapitre II : Les composites géopolymères renforcés de fibres naturelles

2.1 Introduction

Les industriels s'intéressent de plus en plus au renforcement des géopolymères par des fibres naturelles pour, généralement, réduire les impacts environnementaux. La sélection de ce type de renfort n'est pas simple, ce terme correspondant à des fibres d'origine végétale.

Ce chapitre vise à fournir un aperçu approfondi des composants clés des composites géopolymères. Les composites géopolymères, en tant que matériaux avancés, offrent un large éventail d'applications potentielles dans des domaines tels que la construction et comprendre ça c'est essentiel pour exploiter pleinement leur potentiel dans divers contextes d'ingénierie.

2.2 Généralités sur les composites

Le terme "composite" désigne généralement un matériau formé par la combinaison de deux substances ou plus, qui ne sont pas nécessairement miscibles entre elles. Dans les matériaux composites, une ou plusieurs phases discontinues sont dispersées dans une phase continue appelée matrice. La phase discontinue, également connue sous le nom de renfort ou matériau renforçant, confère au composite ses propriétés mécaniques, tandis que la matrice a pour fonction de transmettre les contraintes mécaniques externes aux fibres et de les protéger contre les agressions extérieures. En résumé, les composites tirent leurs caractéristiques de la combinaison synergique entre renfort et matrice, offrant ainsi des performances améliorées par rapport aux matériaux constitutifs individuels [28].

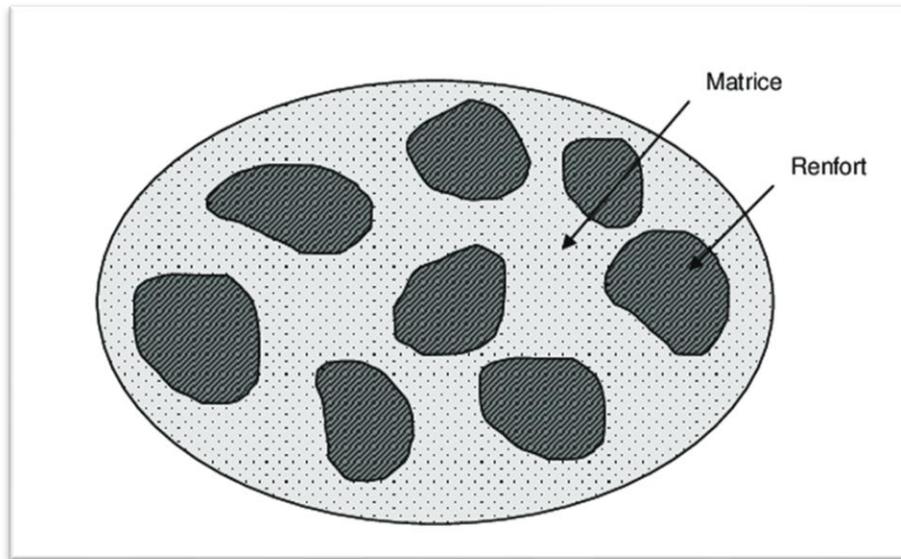


Fig. 2.1 : Schéma illustratif d'un matériau composite [29]

2.3 Les composites géopolymères

Les composites géopolymères sont récemment devenus une alternative écologique prometteuse aux matériaux cimentaires traditionnels. Ils sont économiques, respectueux de l'environnement et leur production nécessite une quantité d'énergie relativement faible. Ils ont également une bonne résistance à la compression, une bonne durabilité et des propriétés thermiques très résistantes aux flammes et à la chaleur [30].

Les liants géopolymères, tout comme les matériaux cimentaires, sont généralement caractérisés par une résistance en traction relativement faible et une fragilité en cas de rupture. Afin de pallier cette limitation, de nombreuses recherches se sont focalisées sur l'intégration de divers types de renforts pour améliorer les performances, en proposant ainsi un concept de matériau composite [31].

2.3.1 Matrice

La matrice dans le contexte des composites géopolymères fait référence à la phase continue du matériau, dans laquelle les renforts sont incorporés. Dans le cas des composites géopolymères, la matrice est principalement constituée de géopolymères, qui sont des polymères inorganiques à base d'aluminosilicates. Cette matrice joue un rôle crucial dans les propriétés globales du composite [32].

Caractéristiques de la matrice des composites géopolymères :

- **Composition** : La matrice est formée par la polymérisation des aluminosilicates activés par une solution alcaline silicatée, créant un réseau tridimensionnel de liaisons covalentes.
- **Rigidité et résistance** : Les géopolymères offrent une bonne résistance mécanique et une faible porosité, ce qui contribue à la durabilité et à la résistance des composites.
- **Adhérence aux renforts** : Une bonne adhérence entre la matrice géopolymère et les renforts est essentielle pour assurer le transfert efficace des contraintes et optimiser les propriétés mécaniques du composite.
- **Durcissement** : La matrice géopolymère durcit à température ambiante, offrant des avantages en termes de temps de prise par rapport à d'autres matériaux cimentaires.

2.3.2 Renforts

Les renforts sont les matériaux qui sont incorporés dans la matrice géopolymère dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques du composite. Les renforts peuvent être de différentes formes, telles que des fibres, des particules ou des plaques, et peuvent être fabriqués à partir de matériaux naturels ou synthétiques [32].

Caractéristiques des renforts des composites géopolymères :

- **Fibres naturelles** : Les fibres naturelles, telles que le lin, le chanvre ou la paille, sont souvent utilisées comme renforts dans les composites géopolymères en raison de leur faible coût, de leur légèreté et de leur biodégradabilité.

- Fibres synthétiques : Les fibres synthétiques, telles que les fibres de verre, de carbone ou d'aramide, sont également utilisées comme renforts dans les composites géopolymères en raison de leur résistance mécanique élevée et de leur faible poids.
- Particules : Les particules, telles que les cendres volantes ou les nanoparticules, peuvent également être utilisées comme renforts dans les composites géopolymères pour améliorer les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion.
- Adhérence : Une bonne adhérence entre les renforts et la matrice géopolymère est essentielle pour assurer le transfert efficace des contraintes et optimiser les propriétés mécaniques du composite.
- Orientation : L'orientation des renforts dans la matrice géopolymère peut avoir un impact significatif sur les propriétés mécaniques du composite, telles que la résistance à la traction, la flexion et la compression [32].

2.4 Composites géopolymères renforcés avec les fibres naturelles

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie pour [33] :

- Valoriser une ressource locale dans des pays peu industrialisés ;
- Développer des matériaux et des technologies permettant de réduire les impacts sur l'environnement ;
- Utiliser des ressources renouvelables.

Les renforts les plus couramment utilisés dans les composites géopolymères sont les fibres naturelles on peut les subdiviser en trois grands groupes selon leur origine :

- ❖ Les fibres végétales.
- ❖ Les fibres animales.
- ❖ Les fibres minérales.

Le travail proposé sera orienté vers les composites géopolymères renforcés par des fibres végétales.

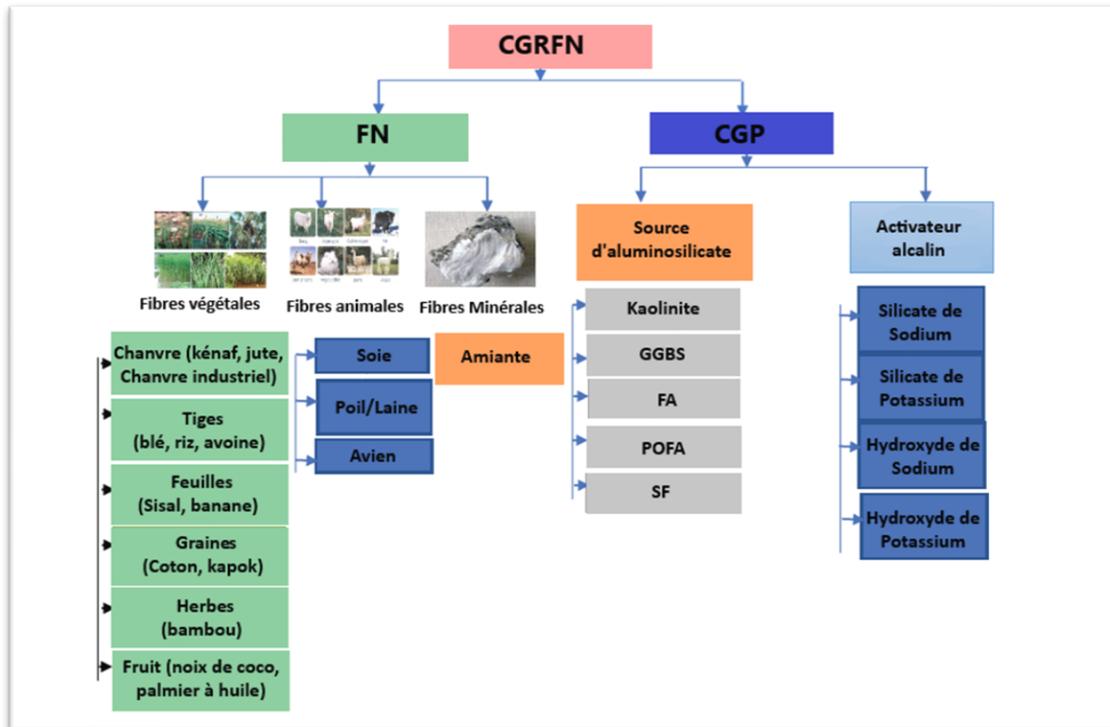


Fig.2 2: Schéma des types de fibres naturelles [34]

2.4.1 Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des matériaux naturels qui sont souvent utilisées dans la fabrication de géopolymères, des matériaux inorganiques à base de silicates et d'aluminates, pour renforcer la structure et améliorer les propriétés mécaniques du matériau final. Ce sont des structures naturelles composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, formant des fibrilles. Elles renferment également des quantités relativement faibles d'éléments tels que des composés non azotés, des protéines, des lipides et des minéraux. La proportion de ces constituants varie selon l'espèce végétale, son stade de développement et les parties de la plante concernées.

La composition lignocellulosique de diverses fibres végétales est illustrée sur la figure (2.3) et. La composition lignocellulosique de la biomasse végétale contient principalement de la lignine $[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0.9-1.7}]_x$, cellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$, et hémicellulose $(C_5H_8O_4)_m$

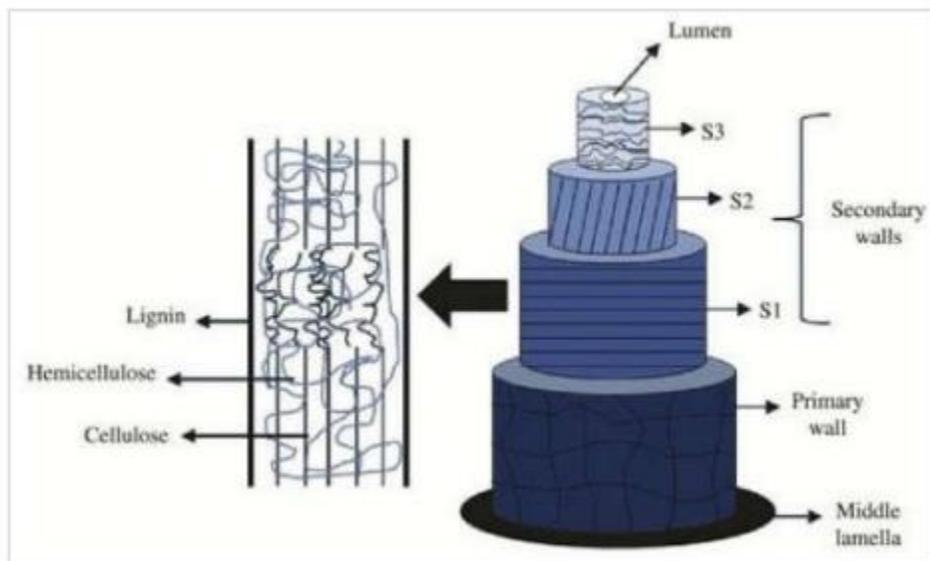


Fig. 2.3 : Structure d'une fibre végétale [35]

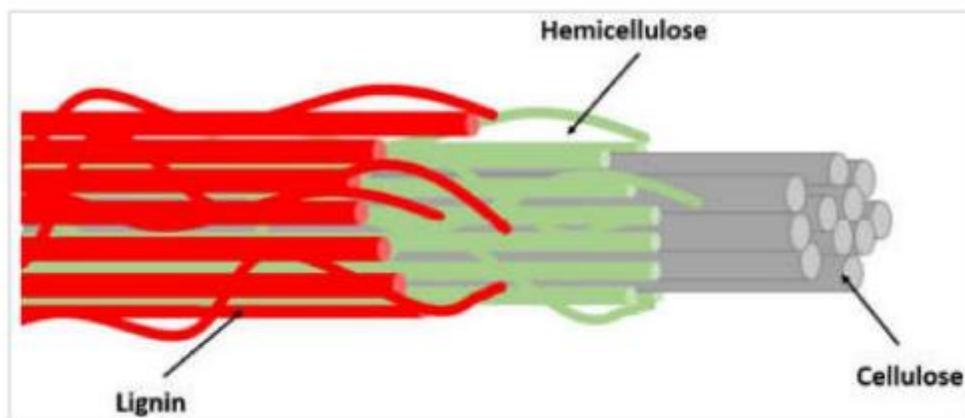


Fig. 2.4: Fibre naturelle lignocellulosique [35]

2.4.1.1 Exemples de fibres végétales

Ces fibres proviennent de plusieurs sources végétales qui sont :

- ❖ Fruits : on peut citer comme exemple la noix de coco.
- ❖ Graines : on peut citer comme exemple coton et kapok.
- ❖ Feuilles : on peut citer comme exemple ananas pina, bananier abaca, raphia et sisal agave.
- ❖ Tige : on peut citer comme exemple chanvre, lin, jute, ramie/ortie et genêt kenaf.
- ❖ Sève : on peut citer comme exemple caoutchouc latex.

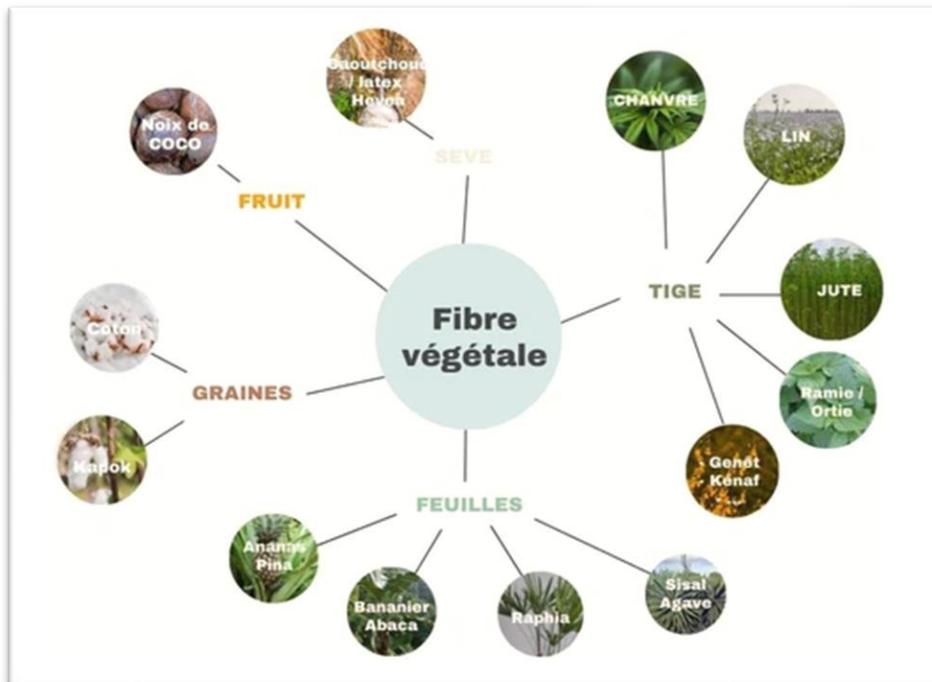


Fig. 2.5 Schéma des types des fibres végétales [36]

2.4.1.2 Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres naturelles utilisées comme renfort dans les composites géopolymères présentent des avantages et des inconvénients [32], [36]

➤ **Avantages**

- Disponibilité : Les fibres végétales sont largement disponibles et renouvelables ;
- Faible coût : Les fibres végétales sont généralement moins chères que les fibres synthétiques ;
- Légèreté : Les fibres végétales sont légères, ce qui peut réduire le poids des composites géopolymères et les rendent plus accessibles ;
- Propriétés mécaniques : Les fibres végétales peuvent offrir des propriétés mécaniques intéressantes, telles qu'une résistance à la traction élevée.

➤ **Inconvénients**

- Sensibilité à l'humidité : Les fibres végétales sont sensibles à l'hydratation, ce qui peut réduire leur résistance et leur durabilité dans les composites géopolymères ;
- Faible résistance à la chaleur : Les fibres végétales ont souvent une faible résistance à la chaleur, ce qui peut limiter leur utilisation dans des applications à haute température ;
- Compatibilité avec la matrice : Les fibres végétales peuvent avoir une compatibilité limitée avec certaines matrices géopolymères, ce qui peut réduire l'adhérence entre les fibres et la matrice ;
- Traitement préalable : Les fibres végétales doivent souvent subir un traitement pour améliorer leur adhérence à la matrice et leur durabilité dans les composites géopolymères.[37]

2.4.2 Méthodes de traitement des fibres naturelles

En plus d'améliorer les propriétés mécaniques des composites grâce à l'incorporation de fibres végétales, il est important de considérer leur durabilité en raison du caractère biodégradable de ces fibres. Les composites renforcés de fibres végétales présentent souvent des défauts en termes de durabilité, principalement en raison de leur nature organique. Des facteurs tels que la

minéralisation des fibres et les attaques alcalines dans différentes conditions climatiques peuvent conduire à une dégradation [38]. L'hétérogénéité microstructurale complexe et la forte absorption d'eau des fibres végétales ont également un impact sur les propriétés de leurs composites. De plus, la présence de pectine et de cires dans les parois cellulaires des fibres végétales empêche un bon emboîtement au sein de la matrice, ce qui entraîne une mauvaise adhérence, de faibles propriétés de résistance et une dispersion de force inadéquate [39]. La composition des fibres végétales, notamment la lignine, la cellulose, l'hémicellulose, la cire et la pectine, peut avoir un effet instable en raison de l'humidité et de la faible adhésion avec la matrice environnante. Il est donc nécessaire d'améliorer les propriétés des fibres végétales pour remédier à ces carences. Diverses techniques, telles que des traitements chimiques, biologiques et physiques, ont été proposées pour modifier les fibres végétales et améliorer leurs propriétés. Les traitements chimiques visent à améliorer les fibres en modifiant leur microstructure, leur morphologie de surface, leurs groupes chimiques, leur résistance à la traction et leur mouillabilité. Le tableau 2.1 représente les différents traitements, tels que le chlorure de benzoyle, les alcalis, l'anhydride acétique, le permanganate de potassium, l'acide acétique, le silane et les peroxydes, acide stéarique sont utilisés pour traiter les fibres végétales dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques en modifiant leur cristallinité et en éliminant les composants les plus faibles comme les graisses, la lignine et la pectine des surfaces des fibres [40]. Ce processus aboutit à une structure fibreuse rugueuse et propre, améliorant l'adhérence entre la fibre et la matrice et améliorant finalement les propriétés mécaniques du composite.

Tableau 2.1. Différents traitements proposés pour les fibres végétales [35]

Fibres végétales	Techniques de traitement
Bambou	Acétylation, permanganate de potassium, hybridation de fibres
La bagasse de la canne à sucre	Acétylation, alcali, acide stéarique, hybridation de fibres, peroxyde d'hydrogène
Chanvre	Permanganate de potassium, greffage de nanoparticules
Kenaf	Alcali, greffage de nanoparticules, hybridation de fibres
Jute	Alcali, benzylation, bicarbonate de sodium, hybridation de fibres, immersion dans l'eau, greffage de nanoparticules
Ramie	Jet de vapeur, greffage de nanoparticules, silane
Lin	Silane, greffage de nanoparticules, hybridation de fibres
Sisal	Alcali, acétylation, greffage de nanoparticules, immersion dans l'eau
Coco	Alcali, permanganate, hybridation de fibres, immersion dans l'eau
Ananas	Alcali, hybridation de fibres
Coton	Silane, fibrillation de surface, greffage de nanoparticules
La paille de blé	Alcali, ébullition, hybridation de fibres, immersion dans l'eau, greffage de nanoparticules

2.4.2.1 : Traitement alcalin :

L'utilisation de substances alcalines telles que le NaOH réduit la sensibilité à l'humidité des fibres en diminuant les groupes OH de la cellulose et en formant des groupes -O- Na^+ entre les chaînes moléculaires de la cellulose. Ce processus nettoie la surface des fibres, réduit leur diamètre et améliore le rapport longueur/diamètre, favorisant ainsi une meilleure adhérence avec la matrice géopolymère [33]. Par exemple, le traitement alcalin des fibres de palmier avec une solution de NaOH à 4% pendant 7 heures a entraîné une augmentation significative de la résistance à la flexion et à la compression, jusqu'à 60% par rapport aux fibres non traitées [41]. La figure (2.5) illustre

l'extraction des fibres d'ananas sous forme brute et traitée chimiquement, comme l'ont démontré Putra & al.[42]. Ces modifications des fibres végétales visent à altérer leurs propriétés chimiques, physiques ou morphologiques pour assurer une meilleure liaison avec la matrice environnante et pallier les carences liées aux fibres hydrophiles naturelles.

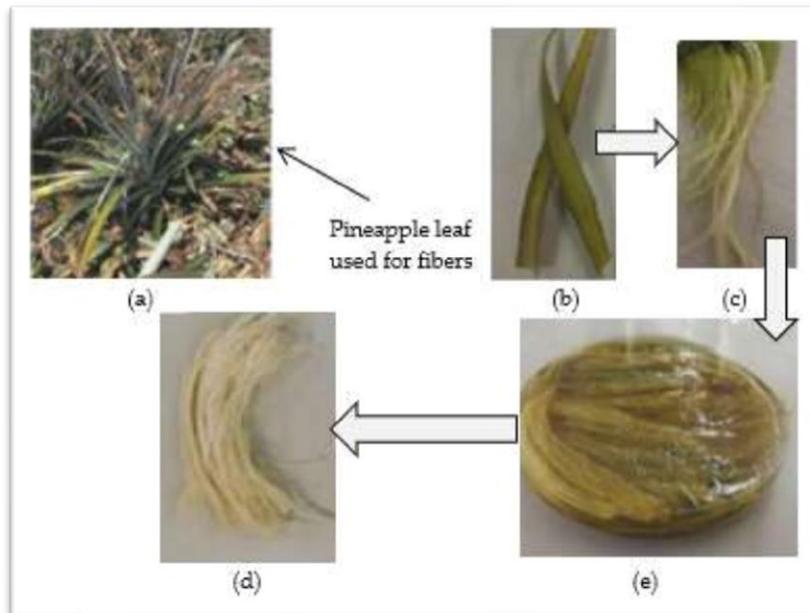


Fig. 2.6 : Fibre d’ananas : (a) plante, (b) feuilles, (c) fibre brute, (d) solution de traitement NaOH à 1 % et (e) fibres traitées. [35]

Le permanganate de potassium (KMnO_4) est l’une des méthodes de traitement chimique des fibres naturelles visant à améliorer les propriétés des composites renforcés par ces fibres, Ce traitement permet de modifier les propriétés physico-chimiques des fibres naturelles, comme leurs propriétés mécaniques et leur adhérence avec la matrice polymère [43].

2.4.2. 2 : Acétylation

L’acétylation est une technique d’estérification des fibres naturelles. Les fibres sont acétylées avec l’acide acétique ou l’anhydride acétique en présence ou non d’un catalyseur acide pour greffer des

groupements acétyles sur la cellulose (Figure 2.6). Le groupement acétyle (CH₃CO) remplace le groupement hydroxyle (OH) hydrophile de la fibre. Ainsi, la nature hydrophile de la fibre diminue [44], [33].

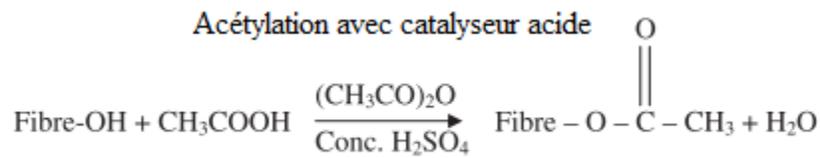


Fig. 2.7 : Acétylation avec ou sans catalyseur acide [33].

2.4.2. 3 : Traitement par acide stéarique :

Le traitement par acide stéarique est une autre technique d'estérification des fibres naturelles. L'acide stéarique de formule CH₃(CH₂)₁₆COOH est utilisé pour modifier la surface des fibres. Le groupement carboxyle –COOH de l'acide stéarique réagit avec les groupements hydroxyles hydrophiles de la fibre et réduit sa sensibilité à l'humidité [42]. Ce traitement peut conférer aux fibres naturelles un caractère extrêmement hydrophobe. Cependant, il élimine certains constituants de la structure de la fibre (pectine, huile de cire, etc.). Par conséquent, les faisceaux de fibres se décomposent et des phénomènes de défibrillation se produisent [45]. Pour des applications composites, ce traitement favorise une meilleure liaison à l'interface fibres-matrice et fournit des meilleures propriétés des composites.

Conclusion

En conclusion, l'étude des composites géopolymères et de leurs composants, tels que la matrice, les renforts et les fibres végétales, met en lumière l'importance croissante de ces matériaux dans le domaine de l'ingénierie des matériaux. Les composites géopolymères offrent des avantages significatifs en termes de durabilité, de résistance mécanique et de potentiel d'application polyvalent. L'intégration de renforts, y compris les fibres végétales, dans les composites géopolymères présente des opportunités passionnantes pour développer des matériaux plus durables et respectueux de l'environnement.

CHAPITRE III : Analyse Scientométrique

3.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à L'analyse scientométrique, parfois appelée analyse bibliométrique, qui est une méthodologie quantitative qui vise à étudier la production, la diffusion et l'impact de la recherche scientifique à travers l'analyse des données bibliographiques. Elle repose sur l'utilisation de données extraites de publications académiques, telles que des articles de revues, des actes de conférences, des thèses, etc., ainsi que leurs caractéristiques bibliographiques telles que les citations, les auteurs, les mots-clés, etc.

3.2 But de l'analyse Scientométrique

Malgré l'évolution constante des méthodes d'analyse, le cœur de la bibliométrie reste le décompte des documents, de leurs informations bibliographiques associées et de leur réseau de citations [46]. Cette analyse offre une perspective quantitative sur la dynamique de la recherche scientifique, en permettant de répondre à des questions telles que :

- ❖ Production scientifique : Quelle est la quantité de publications produites dans un domaine spécifique sur une période de temps donnée ? Existe-t-il des tendances de croissance ou de déclin dans la production scientifique ?
- ❖ Citations et impact : Combien de fois les publications sont-elles citées par d'autres travaux ? Quel est l'impact des chercheurs, des revues ou des institutions dans leur domaine ? Ces indicateurs permettent d'évaluer l'influence et la visibilité de la recherche.
- ❖ Collaborations scientifiques : Quels sont les auteurs ou les institutions qui collaborent fréquemment entre eux ? Comment sont structurés les réseaux de collaboration ? L'analyse des co-auteurs révèle la structure sociale de la communauté scientifique.
- ❖ Tendances de recherche : Quels sont les principaux sujets de recherche dans un domaine spécifique ? Comment évoluent-ils au fil du temps ? L'analyse de la co-occurrence des mots-clés permet de détecter les tendances émergentes et les changements de paradigmes.
- ❖ Évaluation des politiques scientifiques : Comment évaluer l'efficacité des politiques scientifiques et des programmes de financement ? L'analyse scientométrique fournit des

outils pour mesurer la productivité et l'impact de la recherche, ainsi que pour identifier les domaines émergents ou sous-financés.

3.3 Principales sources de données bibliométriques

Il existe des sources bibliométriques qui proposent des liens entre les citations dans leurs données bibliographiques. Les plus importants sont les éléments suivants [46] :

✓ ***Web of Science (WOS):***

Propriété de Clarivate Analytics, WOS est une très grande base de données multidisciplinaire composée de plusieurs indices auxquels une institution peut s'abonner de manière sélective. Ces indices sont constitués d'une liste organisée de revues et de publications qui sont examinées par rapport aux normes de qualité pour être incluses.

✓ ***Scopus:***

Propriété d'Elsevier, Scopus est aussi une très grande base de données multidisciplinaire composée en grande partie d'une liste organisée de revues et de publications, qui sont examinées par rapport aux normes de qualité pour l'inclusion. Les domaines couverts sont toujours fortement axés sur les sciences, avec environ 27 % (en avril 2022) de son contenu sur les sciences sociales (qui comprennent les arts, les sciences humaines, les affaires, l'économie, les sciences de la décision et la psychologie ; Scopus 2022).

✓ ***Dimensions:***

Propriété de Digital Science, Dimensions est une très grande base de données multidisciplinaire qui ingère des métadonnées provenant de sources en ligne disponibles gratuitement telles que Crossref, PubMed et PubMed Central, puis complète la base de données avec du contenu sous licence directement auprès des éditeurs

✓ ***Crossref:***

Propriété de la Publishers International Linking Association, Crossref est un service de métadonnées à but non lucratif qui permet à ses membres, composés d'éditeurs, d'institutions, d'agences de financement et d'agences gouvernementales, d'enregistrer leur contenu et de créer

des DOI à des fins de référence mise en relation. Il offre un accès gratuit à leurs métadonnées et encourage l'ingestion dans des systèmes externes pour une utilisation généralisée.

3.4 Méthodologie

3.4.1 Base de données et mots clés

Dans cette étude, une analyse scientométrique de la littérature sur les composites géopolymères renforcés de fibres végétales est réalisée. Les données de cette recherche ont été obtenues à partir de WOS et SCOPUS. Les mots clés utilisés dans cette étude sont 'natural fibers', 'geopolymer composites', 'natural fibers reinforced geopolymer composites'. Des techniques de raffinement des données ont également été utilisées. Dans le menu spécifique se rapportant au type de document, les options « Revues », « Articles » ont été sélectionnées en plus pour « langue » l'anglais a été choisie. Les publications qui ont été considérées sont pour une période s'étendant de 2008 à 2024.

3.4.2 Analyse des données

Cette recherche a été menée avec l'outil « bibliometrix » basé sur un flux de travail bibliométrique logique et construit à l'aide du langage de programmation d'analyse des données R. L'analyse bibliométrique peut être effectuée avec de nombreux logiciels ou progiciels tel que CitNetExplorer [47], SciMAT [48], Bibexcel [49], BiblioMaps [50], Biblioshiny [51], CiteSpace [52], VOSviewer [53].

3.3.2.1 Méthode d'utilisation de Bibliometrix

Voici les étapes générales pour utiliser Bibliometrix :

1. Installation du langage R et de l'outil d'analyse des données RStudio : Avant d'utiliser Bibliometrix, assurez-vous d'avoir installé R (<https://www.r-project.org/>) et RStudio (<https://www.rstudio.com/>), car Bibliometrix est un package de RStudio ;
2. Installation de Bibliometrix : Une fois R et RStudio installés, Ouvrez RStudio est installé la bibliothèque de bibliometrix en utilisant la console du programme.
3. Une fois bibliometrix installé, entrez la commande library ('bibliometrix') et biblioshiny (' ') pour ouvrir l'application Biblioshiny qui est une interface visuelle de Bibliometrix (voir Figure 3.1).

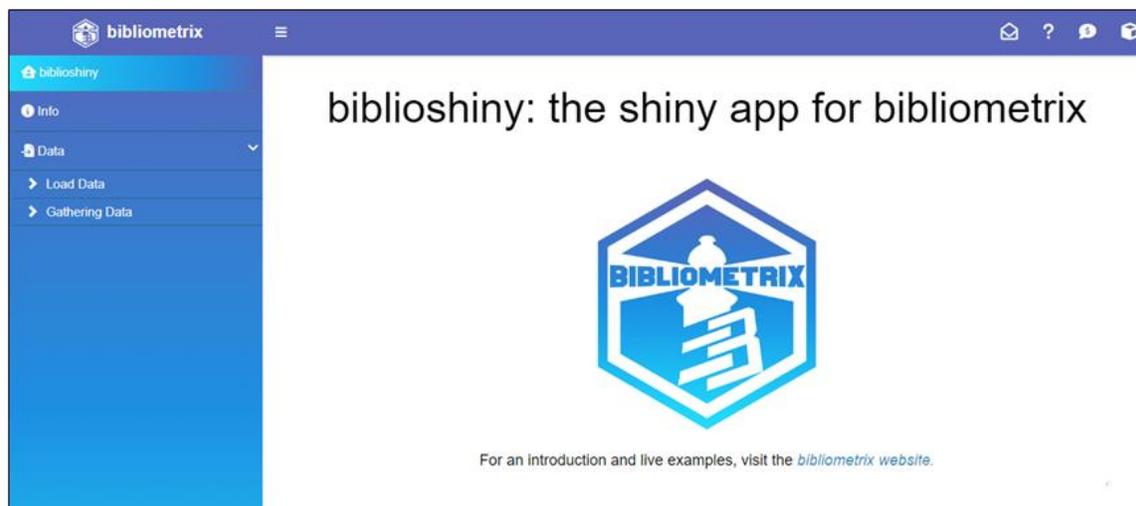


Fig. 3.1 : Interface graphique de l'application biblioshiny.

4. Importation des données bibliographiques : Vous pouvez importer vos données bibliographiques à partir de vos fichiers de PC (Voir Figure 3.2), ces fichiers doivent être télécharger en formats BibTeX à partir de base de données comme Scopus, WOS ou Dimension.

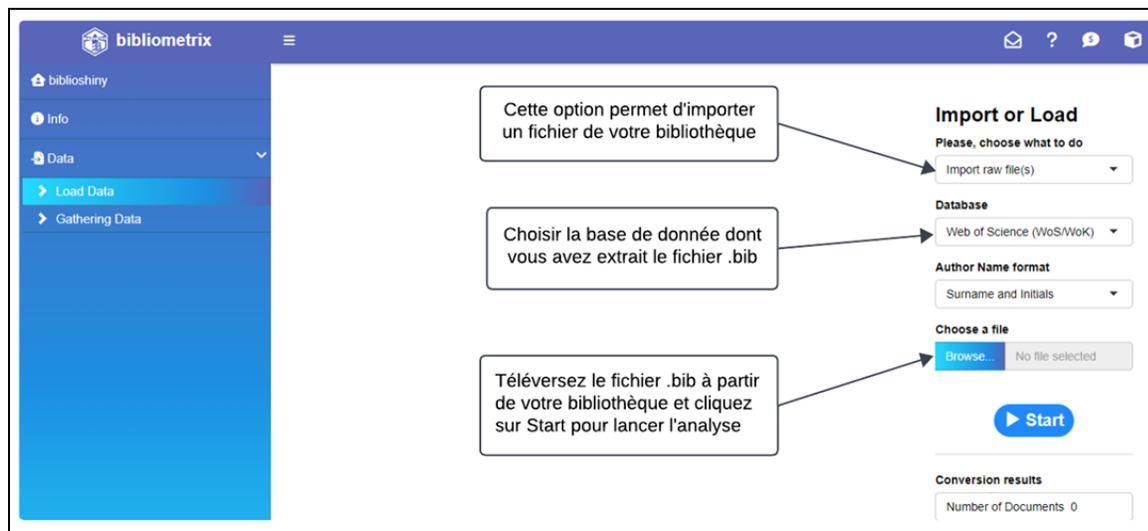


Fig. 3.2 : Etapes d'importation de fichiers .bib dans biblioshiny.

5. Nettoyage et prétraitement des données : Après avoir lancer l'analyse, vous devrez peut-être les nettoyer et les prétraiter. Bibliometrix propose des fonctions pour nettoyer les données, supprimer les doublons, corriger les erreurs, etc.

- Analyse bibliométrique : Une fois vos données préparées, vous pouvez effectuer diverses analyses bibliométriques telles que les informations générales sur votre bibliographie (voir Figure 3.3), l'analyse de co-citation, l'analyse de co-auteur, ou l'analyse de mots-clés, ces métriques bibliographiques sont situées dans la partie gauche de l'interface graphique (Figure 3.3).

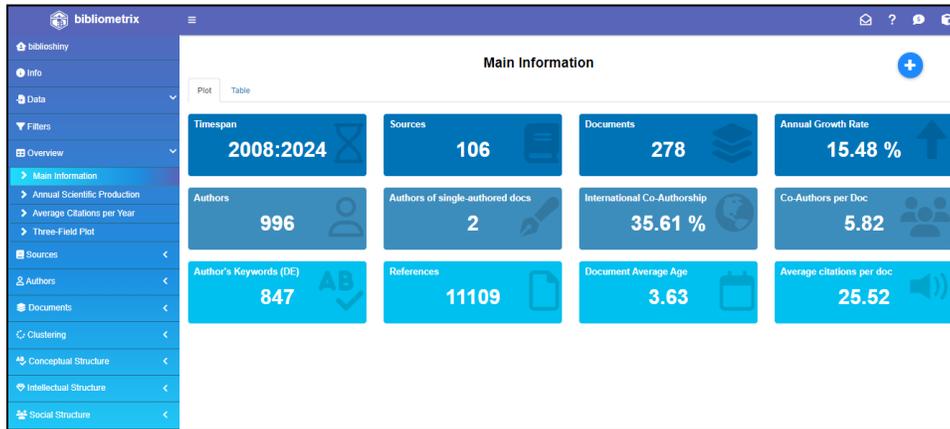


Figure 3.3 : Résultats de l'analyse bibliographiques.

- Visualisation des résultats : Bibliometrix offre également des fonctions pour visualiser les résultats de vos analyses sous forme de graphiques, de cartes de chaleur, de nuages de mots, comme montré dans la Figure (3.4) ;

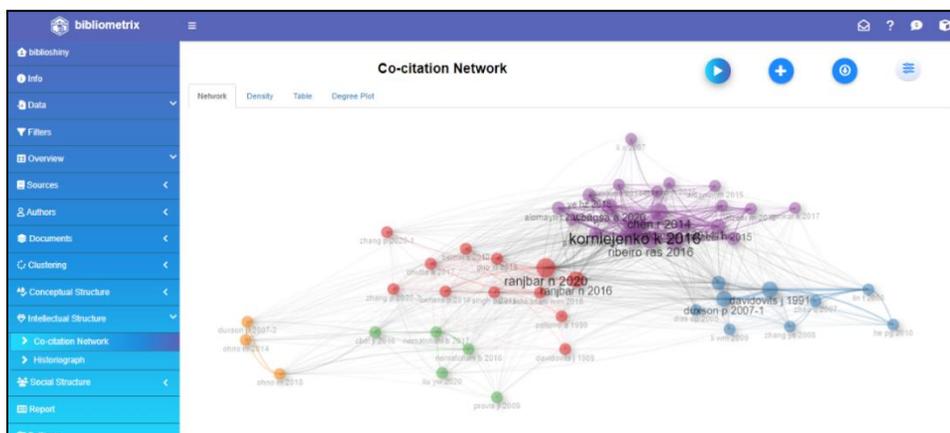


Figure 3.4 : Exemple de visualisation des résultats bibliographiques.

8. Biblioshiony nous permet de créer un rapport comportant tous les résultats bibliographiques sélectionnées, sous forme de fichier .xlsx, afin d'effectuer des études statistiques avancé. Comme il sera bien détaillé à la suite de ce chapitre dans notre cas d'étude.

3.5 Résultats et discussion

Tableau 1 : Informations essentielles sur les données de SCOPUS et WOS

	SCOPUS	WOS
PRINCIPALES INFORMATIONS SUR LES DONNÉES		
Durée	2008 :2024	2008 :2024
Sources (Journal, Livre, etc)	276	106
Documents	700	278
Taux de croissance annuel %	26.5	15.48
Citations moyennes par document	17.63	3.63
Références	46983	11109
CONTENU DU DOCUMENT		
Mots-clés de l'auteur	1745	847
AUTEURS		
Auteurs	2495	1137
Auteurs uniques par doc	22	2
COLLABORATION DES AUTEURS		
Documents rédigés par un seul auteur	30	2
Co-auteurs par Doc	4.56	5.82
Co-auteurs internationaux %	32.71	35.61
TYPES DE DOCUMENT		
Article	426	208
Livre	2	1
Chapitre de livre	53	1
Papier de conférence	96	32
Conférence review	8	1
Review	113	35

Le tableau 1 ci-dessus donne un aperçu des principales informations sur les documents analysés, offrant une vision globale des données.

3.5.1 Tendances des publications et des citations

La figure (3.5) montre une augmentation progressive du nombre de publications concernant l'utilisation de fibres végétales dans les composites géopolymères pour la période s'étendant de 2008 au début de l'année 2024. Il faut remarquer que le plus grand nombre de publications étant trouvé dans la base de données Scopus avec 157 publications contre 73 pour WOS en 2022.

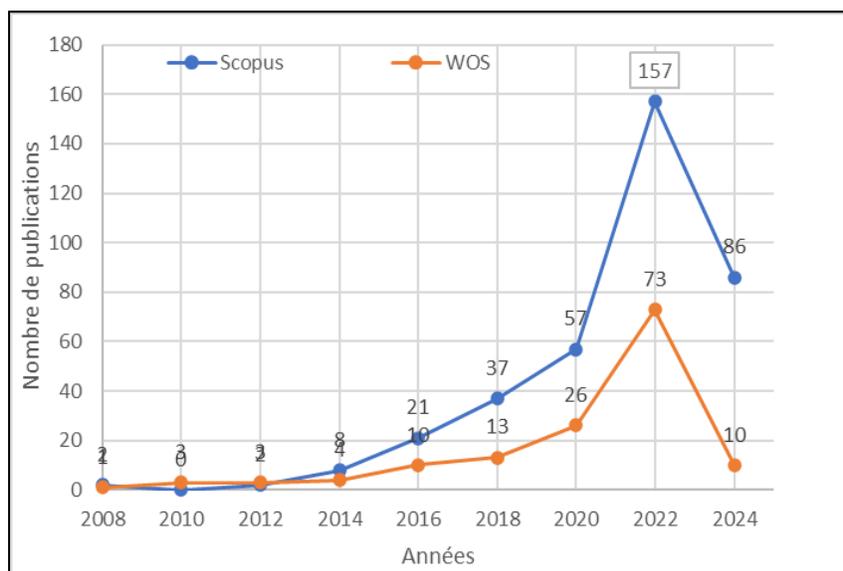


Fig.3.5 : Nombre d'articles publiés chaque année.

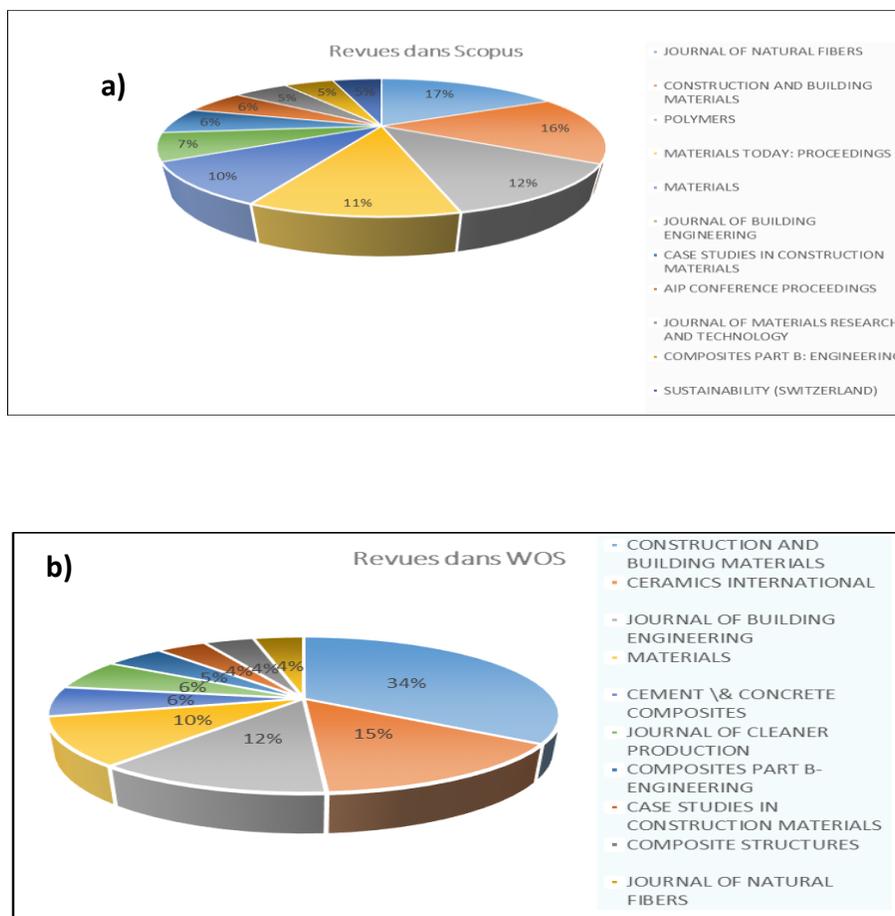


Fig.3.6 : Revues Top 10 ayant le plus d’articles dans le domaine des CGRFN :

a) Scopus ; b) WOS

La figure (3.6) représente les revues ayant publié le plus d’articles relatant à ce sujet. En ce qui concerne Scopus, la revue « Journal of natural fibers » a représenté le plus grand nombre d’articles soit 17% suivi par la revue « Construction and Building Materials » avec 16% et en troisième position la revue « Polymers ». Pour la base de données WOS, les revues ayant publié le plus d’articles sont « Construction and Building Materials » avec 34% suivi par « Ceramics international » avec 15% et en troisième position « Journal of building engineering avec 12%. Il faut ici remarquer qu’en combinant les résultats des deux bases de données, la revue « Construction and Building Materials » représente à elle seul 25% et vient en première position.

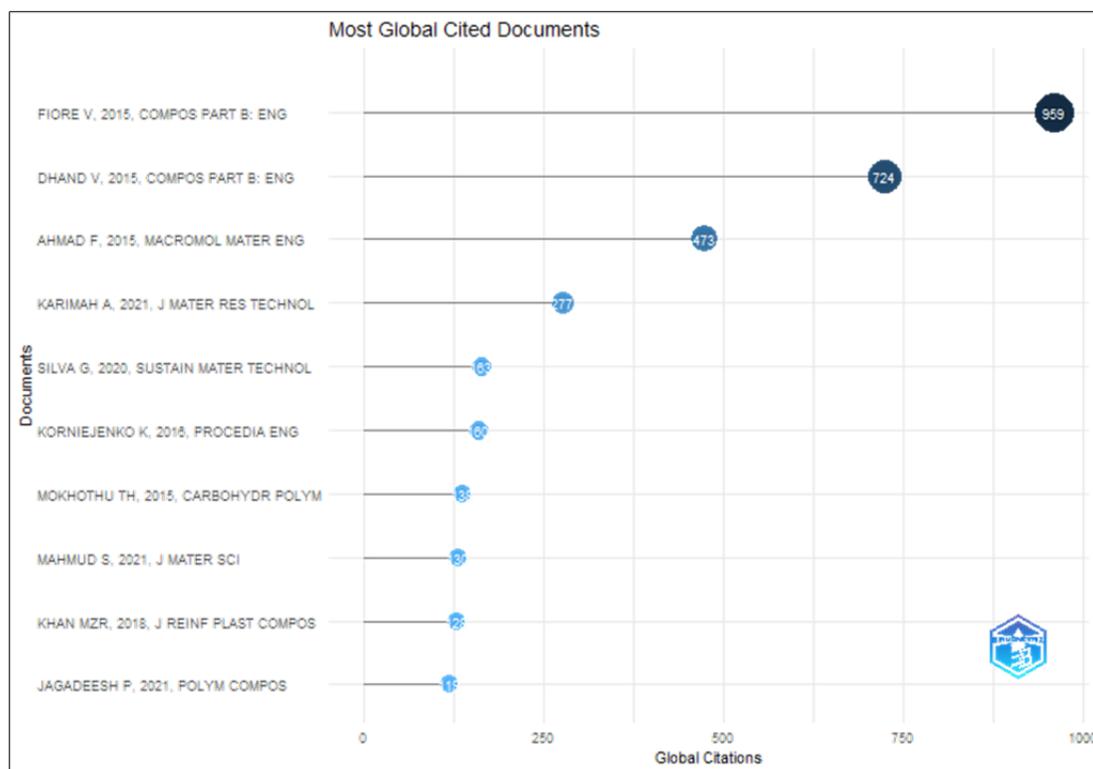


Fig.3.7 : Les articles les plus cités

La figure (3.7) représente les articles les plus cités dans Scopus. Il faut remarquer que FIORE V. 2015. Composite Part B: Engineering a été cité 959 fois pour l'article "The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites", il sera suivi par DHAND V. 2015 Composite Part B: Engineering et a été cité 724 fois pour l'article "A short review on basalt fiber reinforced polymer composites".

3.5.2 Mots clés

Les principaux éléments d'un domaine de recherche spécifique sont principalement représentés et indiqués par des mots-clés. Les mots-clés les plus fréquemment utilisés dans la présente étude ont été abordés à la section 3.3.1. La figure (3.8) représente la fréquence des mots clés utilisés dans ce thème de recherche. Dans les bases de données Scopus et WOS combinées, on remarque que le mot clé le plus cité est « natural fibers » avec 326 fois suivi par « renforcement » avec 183 fois et au troisième rang « tensile streingth » avec 183 fois respectivement et enfin en dernière position la fibre de chanvre « hemp » avec 75 fois.

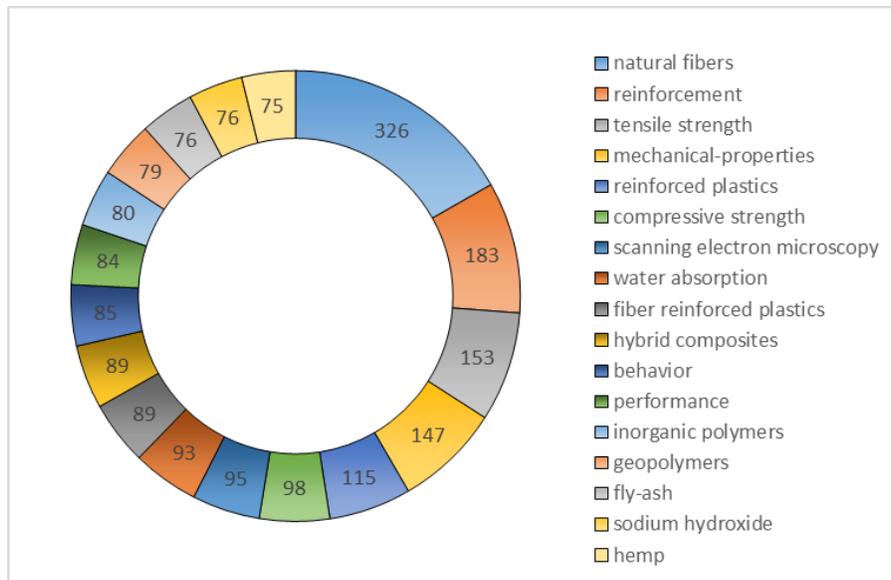


Fig.3.8 : Tendence et fréquence des mots clés

3.5.3 Fibres naturelles les plus utilisées dans les CGRFN

La figure (3.9) représente les fibres naturelles les plus utilisées dans les composites géopolymères. La fibre de cellulose se trouve en première place avec 22% suivie par le jute avec 17% et en dernière position la fibre de PVA

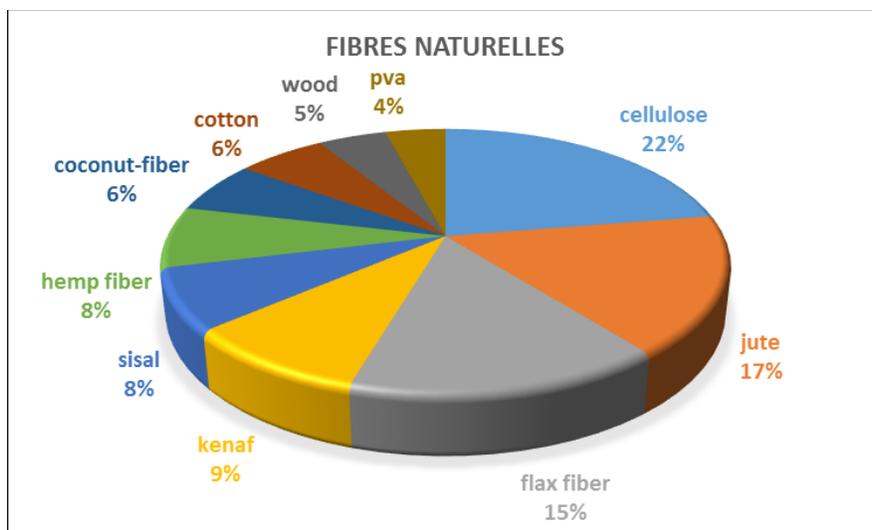


Fig.3.9 : Fibres naturelles les plus utilisées dans le renforcement des CGRFN

3.5.4 Réseaux de collaboration

Les figures (3.10 a & b) représentent les réseaux de collaboration internationaux qui sont de plus en plus importants. Les co-auteurs provenant de différentes institutions et pays montrent une tendance croissante vers des collaborations interdisciplinaires et transnationales, enrichissant ainsi la qualité et la diversité des recherches.

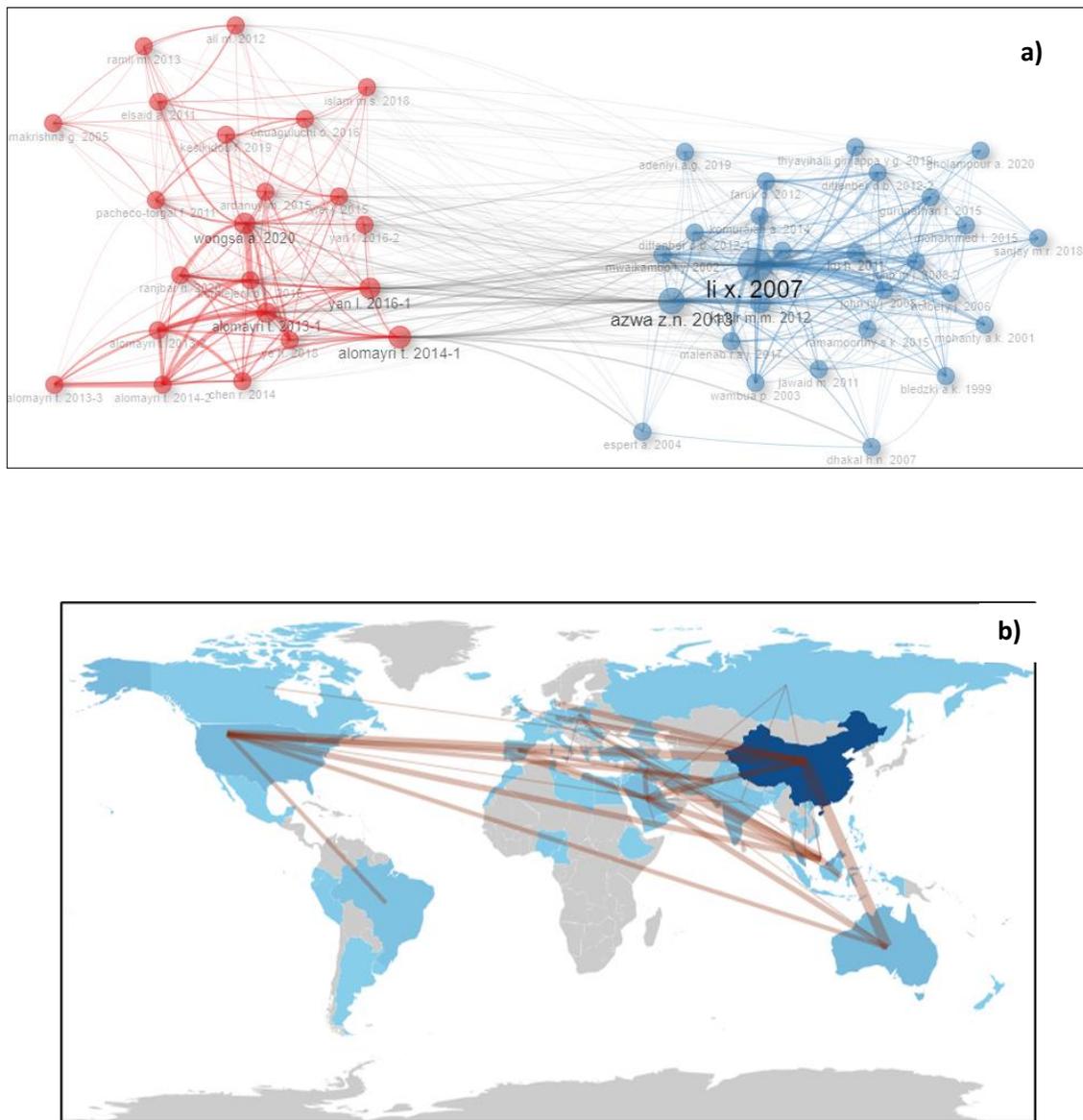


Fig.3.10 : Réseau de collaboration

3.5.5 Evolution des productions scientifiques des pays dans le domaine des CGRFN

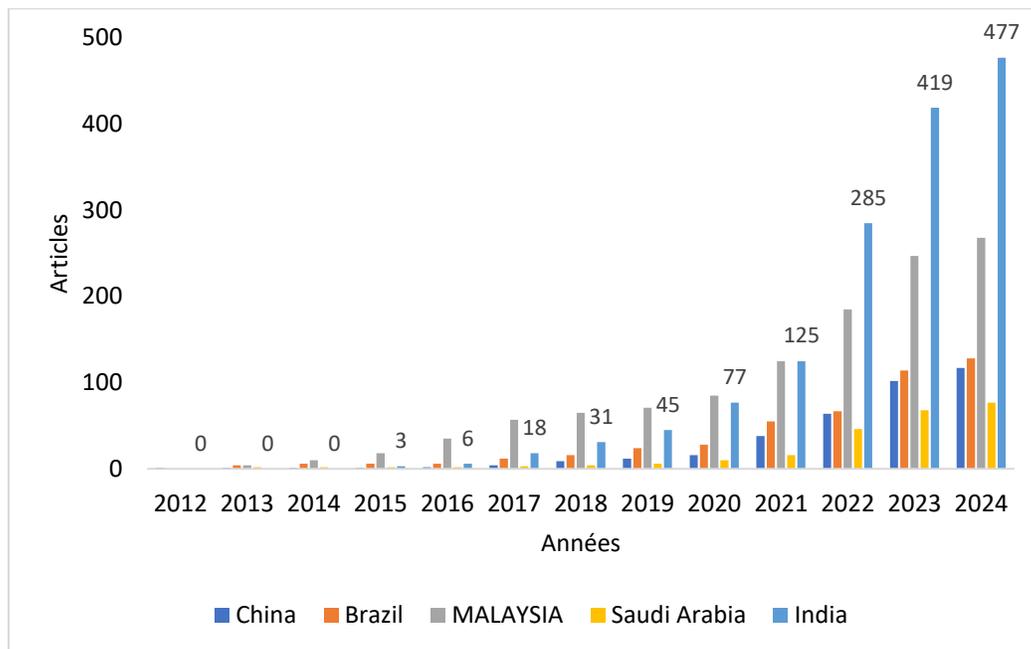


Fig.3.11 : Evolution des publications par pays

La figure (3.11) représente l'évolution de la recherche dans le domaine des CGRFN. On remarque une croissance considérable au fil des années (2013-2024), par exemple pour l'année 2024 l'Inde vient en première position avec 477 articles suivi par la Malaisie avec 268 articles puis le Brésil avec 128 publications, puis la Chine et enfin l'Arabie Saoudite.

Conclusion

L'analyse scientométrique menée offre une vision approfondie de la dynamique de la recherche dans le domaine CGRFN. La production scientifique dans le domaine a montré une croissance constante au cours des dernières décennies, avec une augmentation significative du nombre de publications annuelles. Cette tendance reflète l'importance croissante et l'intérêt accru des chercheurs pour ce domaine.

Chapitre IV : Propriétés Mécaniques des géopolymères renforcés avec les fibres naturelles

Introduction :

L'introduction des fibres naturelles dans les géopolymères peut avoir un impact significatif sur leurs propriétés mécaniques. Les fibres naturelles, telles que la fibre de coco, la fibre de jute, la fibre de lin, et d'autres, sont souvent utilisées comme renforts dans les matériaux composites pour améliorer leur résistance et leur durabilité. Lorsqu'elles sont incorporées dans les géopolymères, ces fibres peuvent influencer plusieurs aspects des propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la ténacité. Nous mettrons toute notre attention sur l'effet de l'incorporation de fibres naturelles traitées et non traitées dans un composite géopolymère vis-à-vis de leurs résistances à la compression et à la flexion.

4.1 Propriétés mécaniques des géopolymères renforcées par les fibres naturelles non traitées

4.1.1 Résistance à la compression :

Dans cet article Alomayri & al. (2013) [54] ont étudiés le renforcement des composites géopolymères par les fibres de coton avec un taux variant de 0 à 1% en poids et leur effet sur les caractéristiques mécaniques. On peut constater que la résistance à la compression la plus élevée a été trouvée pour le composite géopolymère renforcé avec 0,5% de fibres de coton voire figure 4.1. Ceci peut être attribué à une bonne dispersion des fibres de coton dans toute la matrice augmentant ainsi la force de liaison entre la fibre et la matrice.

Dans une autre étude Alomayri et al. (2014) [55] ont travaillé sur l'effet de l'orientation du tissu de coton (horizontale ou verticale) par rapport à la charge appliquée sur la résistance à la compression. Les résultats ont montré que les résistances à la compression sont significativement affectées par la direction du tissu. La résistance à la compression des composites est plus élevée dans le cas d'un tissu orienté horizontalement par rapport à celui posé dans le sens vertical, Comme le montre la figure 4.2. Cela peut être dû à la capacité du tissu de coton posé horizontalement à absorber et à répartir directement la charge uniformément sur toute la section transversale. En outre cette résistance augmente avec l'augmentation du nombre de couche de tissu de coton.

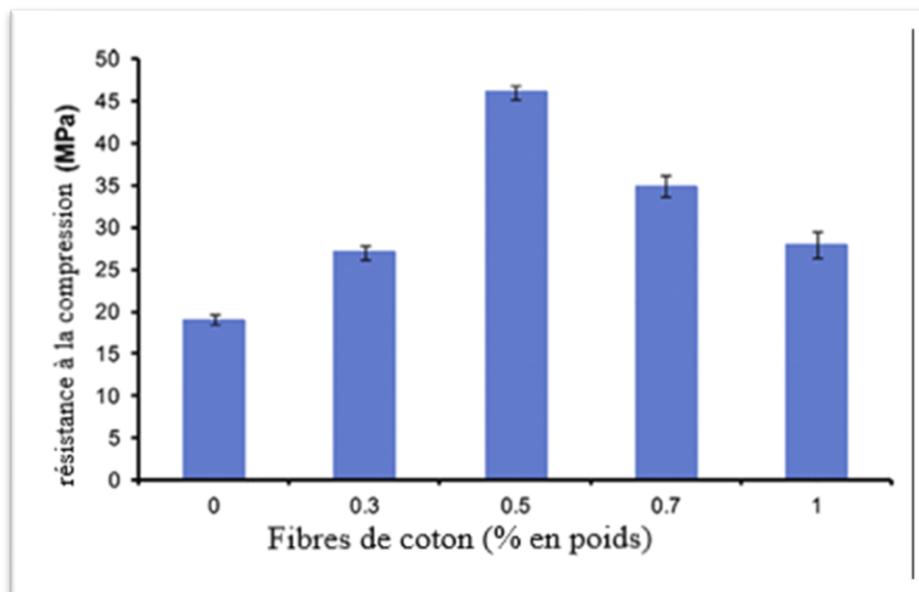


Fig. 4.1 : Résistance en compression du composite en fonction du % de fibres de coton

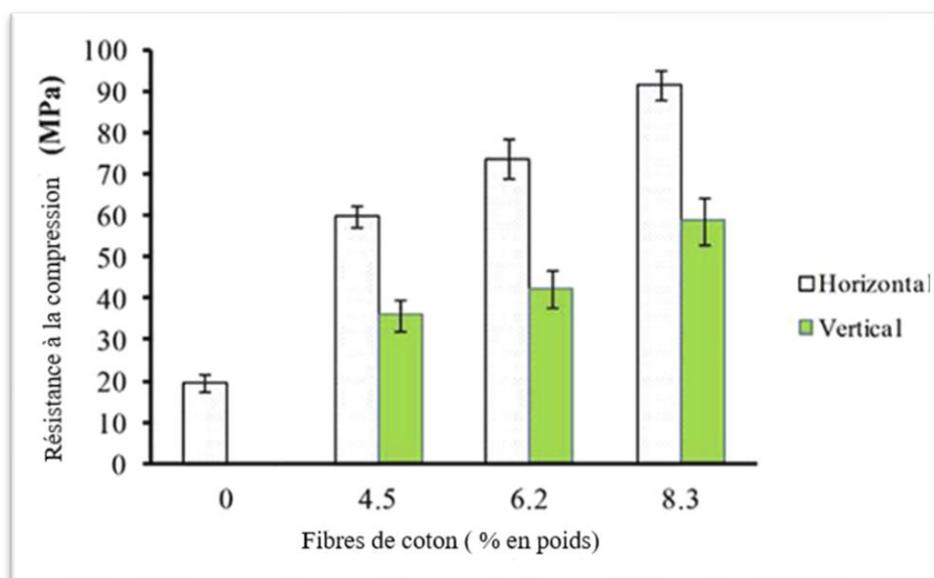


Fig. 4.2 : Résistance à la compression des composites géopolymères en fonction de la fibre contenu.

Assaedi & al. (2015) [56], ont également étudié les propriétés mécaniques des géopolymères à base de cendres volantes renforcées de couches de tissu de lin superposées avec un taux de 2.4, 3 et 4.1 % en poids. Ils ont observé que l'ajout du tissu de lin augmentait considérablement la résistance à la compression du géopolymère et cela d'une façon croissante de la teneur des fibres. Comme le montre la figure 4.3, la résistance à la compression de la matrice géopolymère non renforcée est passée de 19,4 MPa à 91 MPa après l'ajout de 4,1 % en poids de fibres de lin.

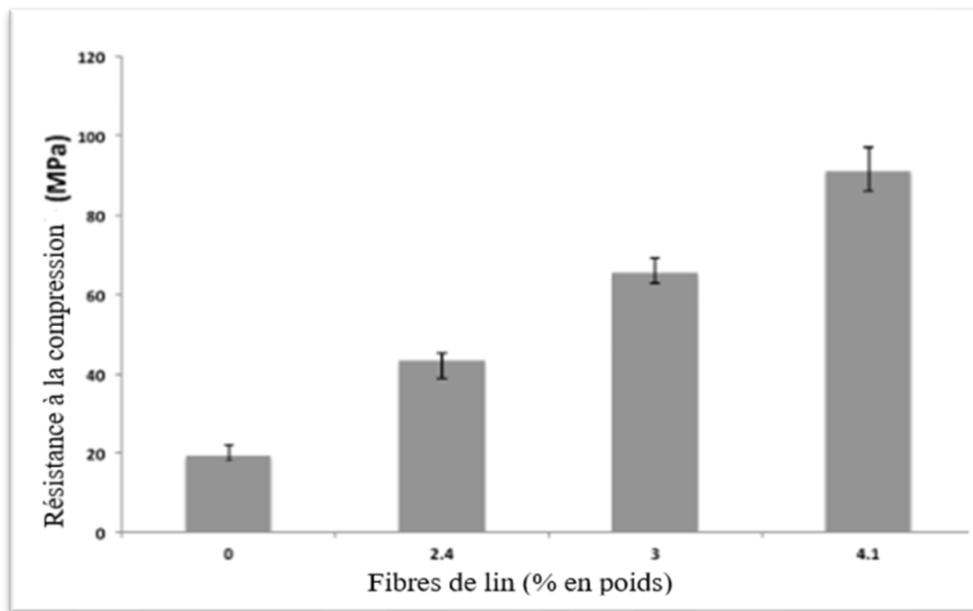


Fig. 4.3 : Résistance à la compression des composites géopolymères en fonction de la teneur en tissu

Korniejenko & al. (2016) [57] ont élaboré des géopolymères à base de cendres volantes et renforcés de fibres naturelles courtes telles que le coton, le sisal, le raphia et la noix de coco. L'étude avait pour but d'analyser l'influence de l'ajout de ces fibres sur les propriétés mécaniques du géopolymère. Les résultats des tests à la compression pour des échantillons de 28 jours ont montré voir tableau 4.1 que l'ajout de ces fibres avec un taux de 1% en poids ont donné une résistance à la compression bien supérieure à celle de la matrice géopolymère sans fibres ajoutées. Le meilleur résultat était obtenu pour celui renforcé avec les fibres de coco par contre la plus faible résistance était trouvée pour celui renforcé avec les fibres de raphia qui était même inférieure à celle de la matrice géopolymère sans fibres voire tableau 4.1 et ceci était dû probablement à la mauvaise adhérence matrice / fibre.

Tableau 4.1 : Test de résistance à la compression après 28 jours.

Échantillon	MPa	Écart type des valeurs enregistrées des forces
Géopolymère (matrice)	24.78	1.89
Géopolymère avec fibres de coco (1%)	31.36	10.10
Géopolymère avec fibres de coton (1%)	28.42	5.30
Géopolymère avec fibres de raphia (1%)	13.66	1.71
Géopolymère avec fibres de sisal (1%)	25.16	3.43

Dans cet article Guido Silva & al. (2020) [58], ont utilisé les fibres de jute et de sisal comme renforcement d'une matrice géopolymère produite à partir de résidus d'argile cuite et poudre de brique avec des teneurs en fibres variant de 0,5 à 2 % en poids. L'ajout de 1,5 % de fibres de jute à la matrice géopolymère a augmenté la résistance en compression de 64 % par rapport à la matrice géopolymère. D'un autre côté les géopolymères élaborés avec un renforcement de 2,5 % de fibres de sisal ont montré une augmentation allant jusqu'à 76 % relativement à la matrice géopolymère (voir figure 4.4).

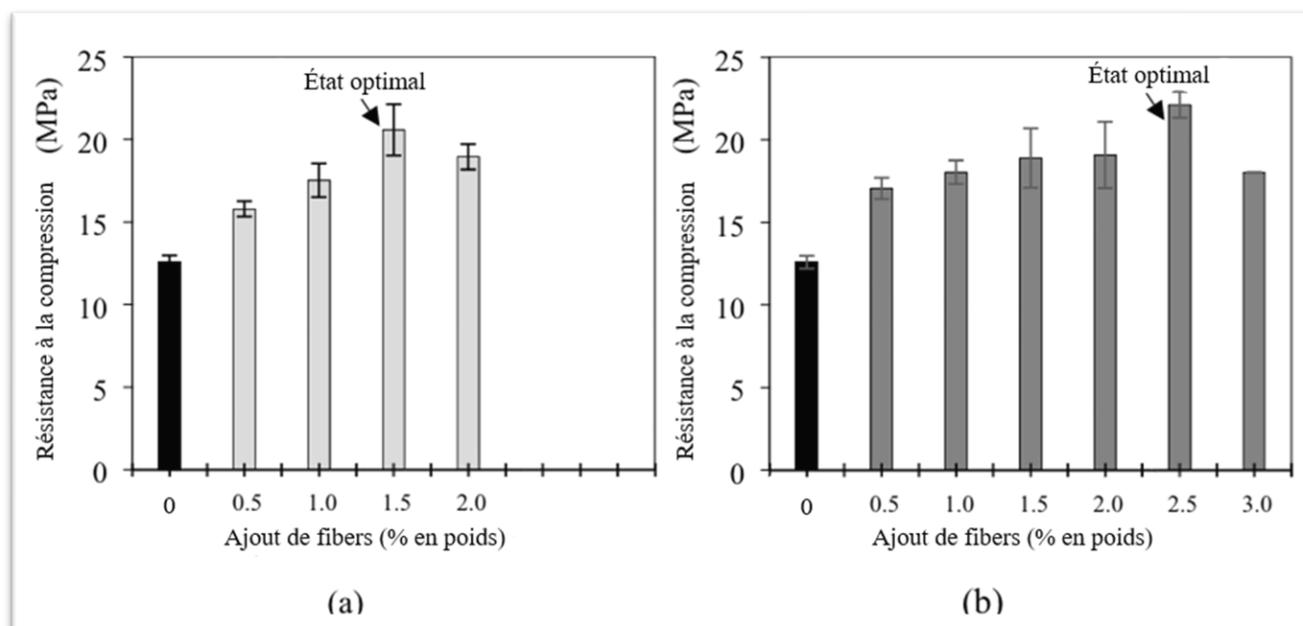


Fig. 4.4.: Résistance à la compression au 7^{ème} jour des éprouvettes renforcées : **a)** avec du jute ; **b)** : avec des fibres de sisal.

Dans cette étude Yanou & al. (2021) [59] ont utilisé les fibres de bagasse de canne à sucre comme alternative durable pour renforcer les géopolymères à base de laitier. Les résultats ont montré que la résistance à la compression a diminué de (18,3 % ; 31,8 % ; 43,1 % ; 65,9 % et 71,8 %) lorsque les géopolymères ont été renforcés avec ces fibres avec une teneur de (1,5 %, 3 %, 4,5 %, 6 % et 7,5 %) respectivement comme montré sur la figure (4.5). Cette réduction était dûe à l'augmentation de la teneur des vides créant ainsi des zones plus faibles dans la matrice géopolymère.

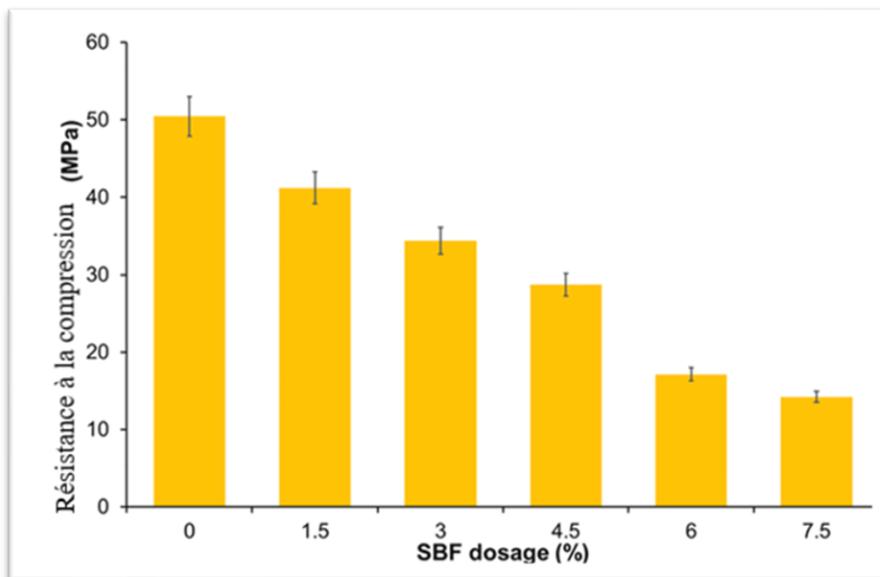


Fig. 4.5 : Influence du dosage des fibres de bagasse sur la résistance à la compression.

4.1. 2 Résistance à la flexion :

M. Alzeer et al (2013) [60] ont étudié la résistance à la flexion d'un géopolymère renforcé de 4 à 10 % en volume de fibres naturelles à base de cellulose (lin de Nouvelle-Zélande, phormium tenax). Le tableau (4.2) montre l'influence de la teneur en fibres sur la résistance à la flexion des composites obtenus, ceux contenant de fortes teneurs en fibres ont présenté une plus grande résistance à la flexion. La plus grande résistance (d'environ 6 MPa dans la matrice non renforcée à environ 70 MPa) a été obtenue avec un renforcement de 10 % en volume de fibres. Cela représente une amélioration significative de la résistance à la flexion.

Tableau 4.2 : propriétés mécaniques des composites renforcés de lin.

Échantillon	Nombre de répétitions	Teneur moyenne en fibres (% en poids)	Résistance ultime à la flexion (MPa)	Charge de pointe (N)	Module élastique (GPa)
Composite 1	10	10%	70.2 ± 7.7	204.2 ± 22.7	9.7 ± 1.2
Composite 2	5	7%	52.3 ± 3.4	171.5 ± 9.3	9.0 ± 0.6
Composite 3	5	4%	27.4 ± 6.3	100.1 ± 26.7	8.8 ± 0.4
Matrice	5	0%	5.8 ± 1.8	17.1 ± 6.0	7.9 ± 0.7

Dans la même étude citée ci-dessus Alomayri & al. (2014) [55] ont aussi étudié le comportement mécanique en flexion des composites géopolymères à base de cendres volantes renforcés par un tissu de coton avec un taux variant (0–8,3 % en poids). L'effet de l'orientation du tissu de coton (horizontale ou verticale) sur la résistance à la flexion du composite géopolymère a été étudié comme le montre la figure (4.6). Les résultats ont montré que les résistances en flexion étaient significativement affectées par la direction du tissu. La meilleure résistance des géopolymères a été trouvée pour ceux élaborés avec les tissus alignés en orientation horizontale par rapport à la charge appliquée. L'augmentation de la résistance dans les composites avec un tissu de coton posé horizontalement peut être attribuée à une meilleure uniformité dans la répartition de la charge entre les couches consécutives de tissu de coton.

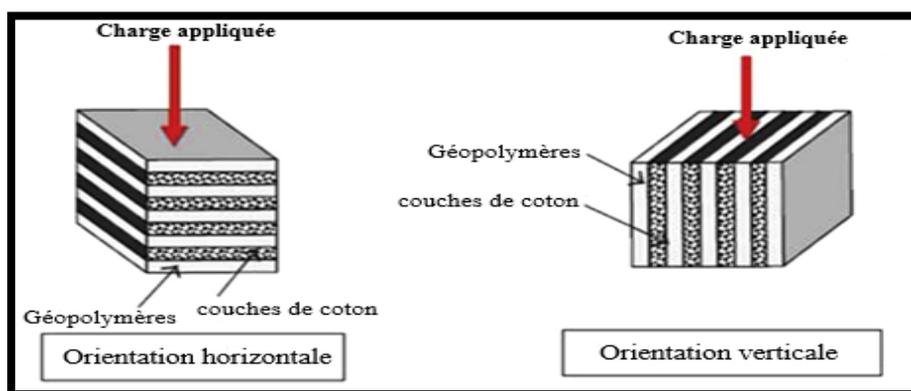


Fig. 4.6 : Schéma montrant l'orientation des tissus de coton par rapport à la charge appliquée.

On observe que l'incorporation de couches de tissu de coton a considérablement augmenté la résistance à la flexion des composites, indiquant l'avantage d'utiliser des fibres de coton pour renforcer les composites géopolymères comme le montre la figure (4.7).

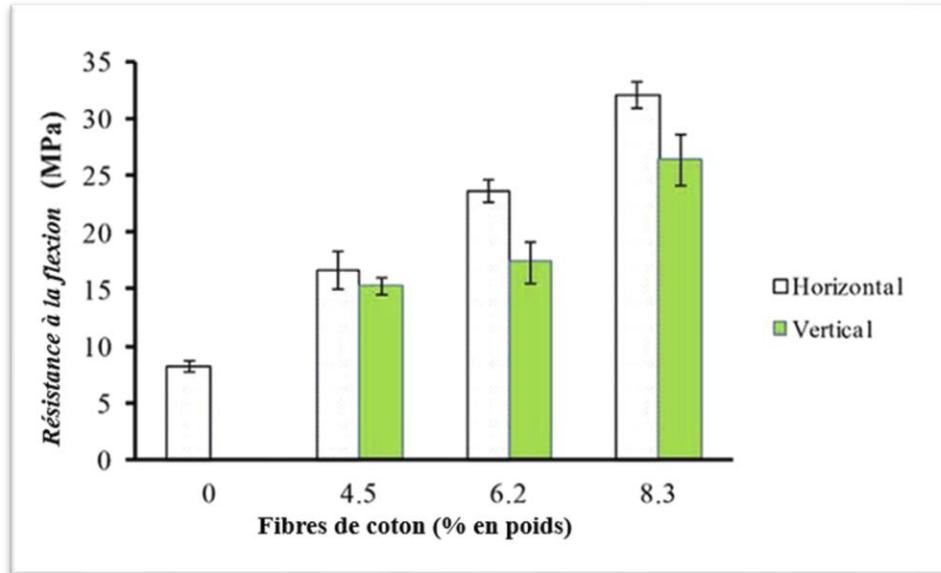


Fig. 4.7 : Résistance à la flexion des composites géopolymères en fonction de la teneur en fibres.

K Korniejenko & al. (2018) [61] ont étudié les propriétés mécaniques d'un géopolymère à base de cendres volantes renforcé par de courtes fibres naturelles de lin et de chanvre préparées avec différents types de forme avec un taux de 1% en masse du composite

Les meilleurs résultats de résistance à la flexion ont été trouvés pour le renforcement du géopolymère avec les fibres de chanvre (voir tableau 4.3). De plus, les résultats avec les fibres de chanvre sont légèrement meilleurs que pour la matrice géopolymère non renforcée.

Tableau 4.3 : Test de résistance à la flexion après 28 jours.

Échantillon	MPa	Écart type
Géopolymère sans fibre	5.22	0.25
Géopolymère avec fibres de lin étoupe après rosée		
Processus de rouissage (1%)	4.67	0.06
Géopolymère avec fibres de lin (1%)	5.83	0.80
Géopolymère avec fibres de lin étoupe vertes (1%)	5.12	0.37
Géopolymère avec feuilles de chanvre (1%)	5.28	0.27
Géopolymère à fibres de chanvre décortiquées (1%)	6.09	0.13
Géopolymère avec microfibrilles de chanvre (1%)	6.01	0.63

Hanzhou Ye & al. (2018) [62] ont étudié l'influence de l'incorporation de la cellulose (C), l'hémicellulose (H) et la lignine (L) qui sont les trois composants de base des fibres naturelles sur le géopolymère à base de métakaolin. Les échantillons coulés à température ambiante ont été durcis dans deux conditions différentes : température ambiante pour le groupe G et cuit à 80° C pendant 48 h pour le groupe GH (traitement de préchauffage), les échantillons ont ensuite été tous durcis pendant 7 jours à température ambiante avant le test.

La résistance à la flexion des géopolymères non renforcés (G0) est meilleure que celles de non chauffés (G) soit pour (G0) une résistance de $8,07 \pm 1,38$ MPa. La résistance maximale à la flexion a été trouvée pour de faibles ajouts de cellulose, d'hémicellulose et de lignine dans G-L5, G-C5 et GH5 soit respectivement de $10,66 \pm 0,78$ MPa, $9,00 \pm 2,00$ MPa et $9,58 \pm 1,22$ MPa (voir figure 4.8).

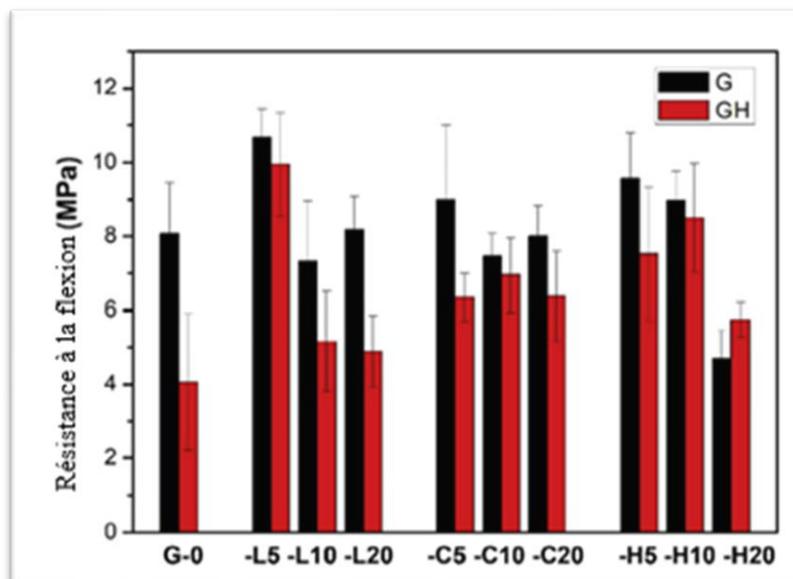


Fig. 4.8 : Résistance à la flexion des composites à base de géopolymères.

Dans cette étude Wongsu et al. (2020) [63] ont examiné les propriétés des mortiers géopolymères à haute teneur en cendres volantes contenant des fibres naturelles. Deux types de fibres naturelles, à savoir la fibre de sisal (SF) et la fibre de noix de coco (CF), ont été incorporés dans ce mortier avec des proportions variables en volume de 0,5 %, 0,75 % et 1,0 % et ont été comparés avec des composites géopolymères préparés avec des fibres synthétiques (fibre de verre) (GF) et une matrice géopolymère (0% fibre) (GPC).

Les résultats des tests ont indiqué que les résistances à la flexion des mortiers géopolymères avaient tendance à augmenter avec l'augmentation du taux des fibres. La plage des résistances à la flexion des mortiers géopolymères renforcés de fibres naturelles (SF et CF) était de 5,3 à 6,6 MPa, ce qui était supérieur à la résistance à la flexion du GPC normal (3,1 MPa), Cela était peut-être dû à la résistance à la traction et au module d'élasticité élevés de la fibre et aussi au fait que la contrainte dans les éprouvettes pouvait être transférée à la fibre à travers l'interface avec la matrice géopolymère. Tandis que le GPC contenant des fibres de verre a atteint une résistance à la flexion d'environ 3,1 à 3,7 MPa. Soit beaucoup plus faible que ceux des fibres naturelles (Voir figure 4.9).

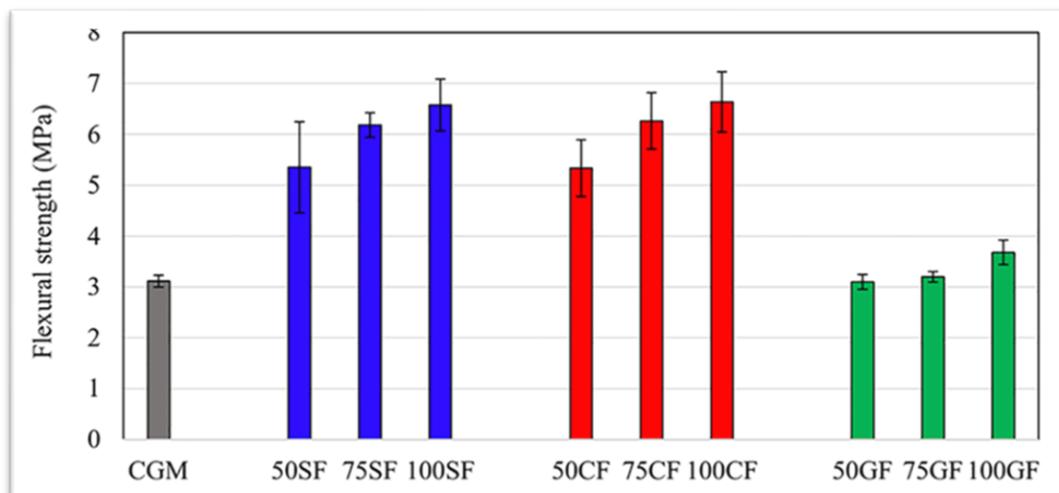


Fig. 4.9 : Résistance à la flexion des mortiers géopolymères.

4.2 Propriétés mécaniques des composites géopolymères renforcés avec les fibres naturelles traitées

4.2.1 Résistance à la compression

Dans cette étude Zulfiati & al. (2019) [64] ont utilisé un mortier géopolymère activé par du silicate de sodium et de l'hydroxyde de sodium avec deux concentrations différentes (14 M et 16 M). Ce mortier a été renforcé par les fibres d'ananas, traitées avec 5% de NaOH et coupées selon des longueurs de 10 mm, 20 mm et 30 mm. Le pourcentage de fibres utilisées représente 0,25 % et 0,50 % du poids du mortier géopolymère.

Les résultats ont indiqué que la longueur de la fibre a eu un impact très significatif sur la résistance en compression du composite pour les deux pourcentages de fibres, Les composites contenant des fibres d'ananas de 30 mm de longueur ont donné une meilleure résistance que ceux renforcés par des fibres de 10 mm et 20 mm de longueur ; soit une résistance de 41,468 MPa. (voir figure 4.12).

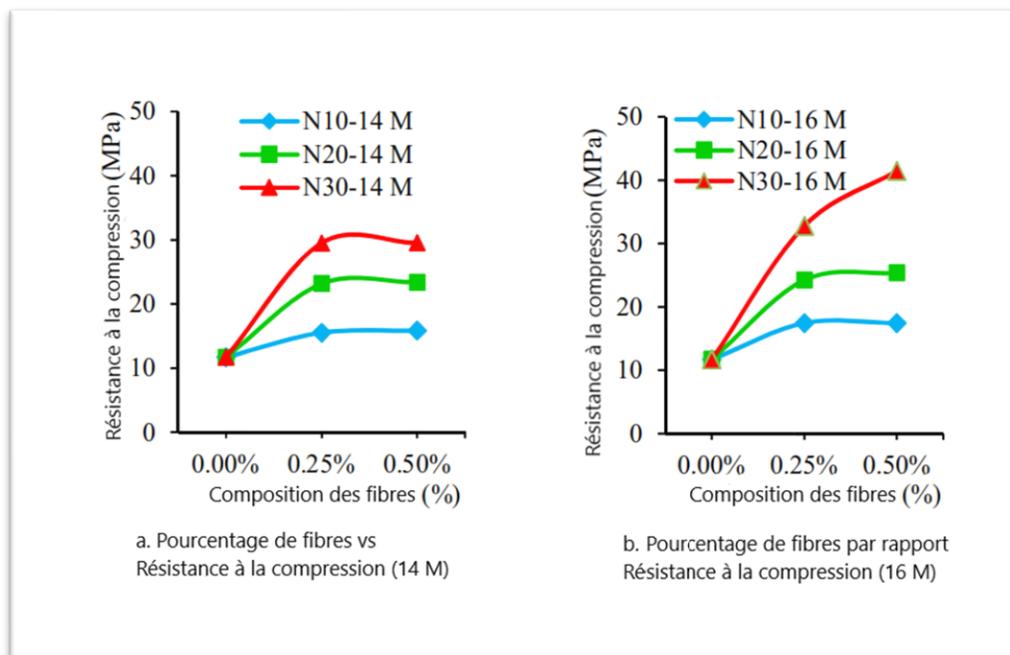


Fig. 4.10 : Résistance à la compression

Dans cette étude Phattharachai et al. (2020), [65] ont étudié les effets du traitement des fibres de chanvre au NaOH (5 %) sur les propriétés du composite géopolymère. La résistance à la compression des mortiers géopolymères est présentée sur la figure (4.13), qui montre que la résistance la plus élevée a été obtenue pour le géopolymère témoin (GP_Control) sans renforcement. Cette résistance a ensuite légèrement diminué dans le géopolymère renforcé avec fibres non traitées (GP_UT) et la plus faible a été obtenue pour celui renforcé avec fibres traitées (GP_5M). Notamment, il n'y avait pas de différence significative dans la résistance à la compression entre GP_UT et GP_5M, bien que les deux aient la même quantité de 2% de fibre de chanvre ajoutée. Cependant, les mélanges incorporant des fibres de chanvre avaient des densités inférieures à celles du mélange témoin, ce qui a entraîné des résistances à la compression inférieures.

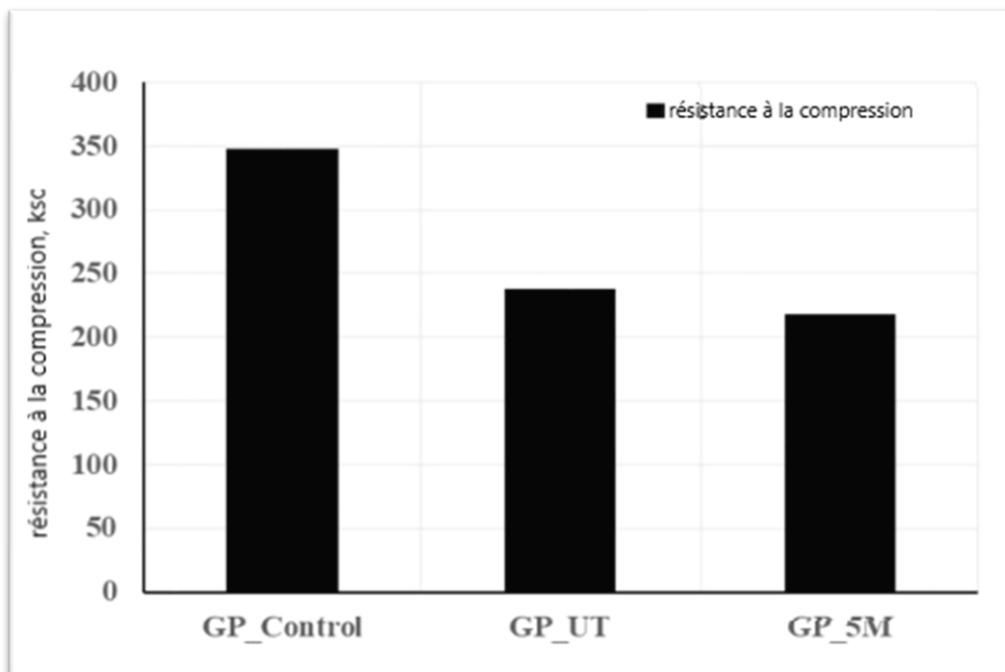


Fig. 4. 11 : Résistance à la compression

Dans cette étude Na Zhang & al. (2021), [66] ont utilisé deux types de traitement à savoir le NaOH et CaCl₂ pour les fibres de Kenaf rajoutées à la matrice géopolymère avec des taux de 5, 10 et 15% en poids. Les résultats des essais ont montrés qu'au fur et à mesure de l'augmentation du taux des fibres de kénaf (KF) ; fibres de Kenaf traitées au NaOH (TKF) et fibres de Kenaf traitées au CaCl₂ (TKF-CaCl₂), il y a eu une diminution de la résistance à la compression d'environ 10,7 %, 6,1 % et 10,6 % respectivement pour les géopolymères renforcés par des fibres de kenaf (G-KF), G-TKF et G-TKF CaCl₂. La figure (4.14) montre que les fibres traitées supportent une résistance de compression plus grande que les fibres non traitées, et que cette valeur était plus grande lorsqu'elles étaient traitées à CaCl₂. Le mode de rupture ductile était obtenu pour (G-TKF CaCl₂ – 15wt %).

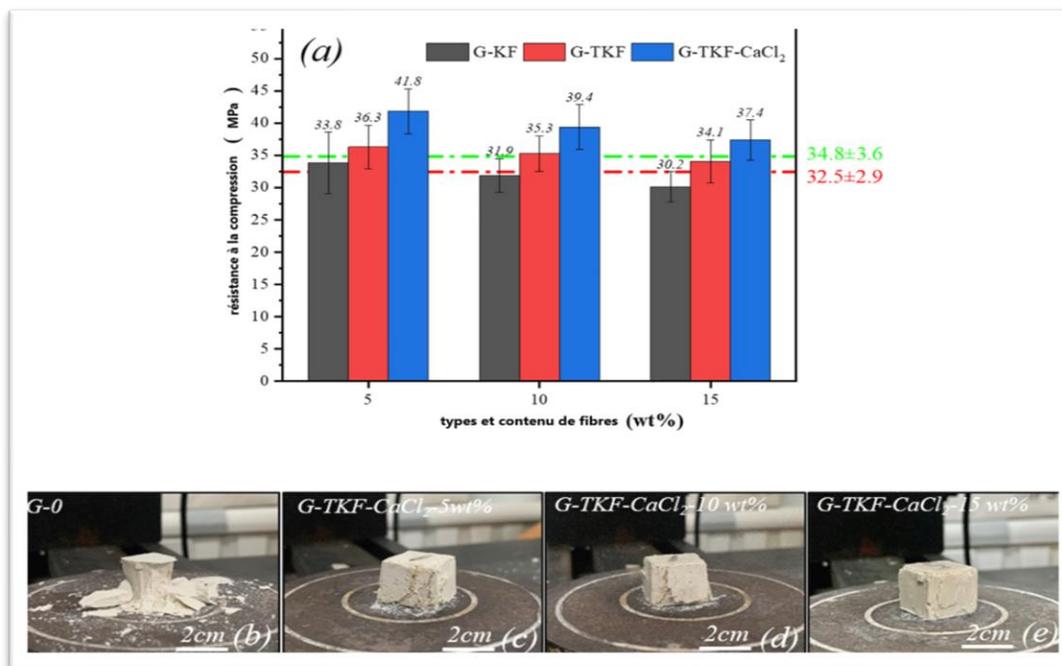


Fig. 4.12: Résistance à la compression de (a) les GFC avec différents teneurs en KF/TKF/TKF-CaCl₂ et (b) le mode de rupture des GFC avec un géopolymère pur, (c) TKF-CaCl₂-5% en poids, (d) TKF CaCl₂-10 % en poids, et (e) TKF-CaCl₂-15wt %.

Dans cet article Olugbenga & al. (2022), [67] ont étudié expérimentalement les effets de différents pourcentages en poids de fibres de coco (0,5 %, 1,0 %, 1,5 % et 2,0 %) comme renfort dans la fabrication de composites géopolymères à base de métakaolin destinés à être utilisés dans le la construction industrielle. Les fibres ont été traitées avec une solution 10M de NaOH. Les résultats ont montré que l'ajout de 0,5 % en poids de fibres de coco dans les géopolymères à base de métakaolin a donné la valeur de résistance à la compression la plus élevée de 21,25 N/mm², Comme le montre la figure (4.15) ci-dessous.

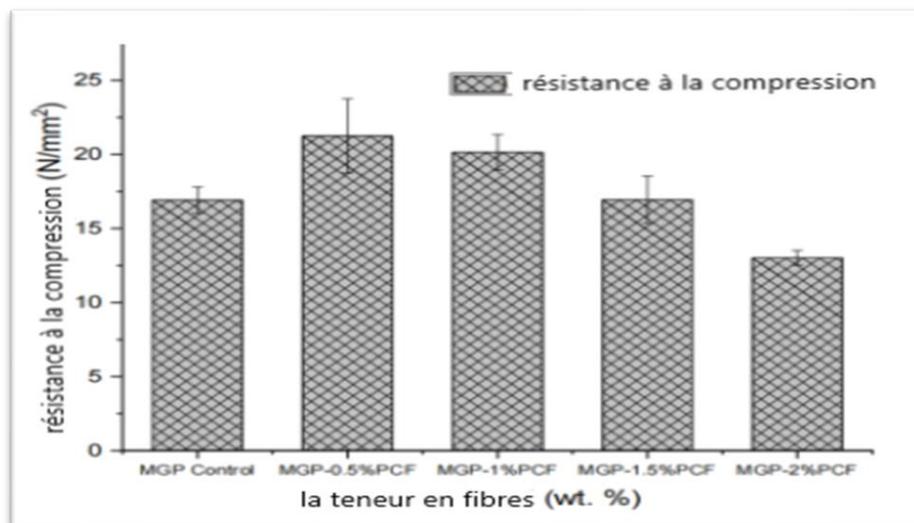


Fig. 4.13 Résistance à la compression des échantillons à différentes teneurs en fibres de coco testés après 28 jours.

4.2.2 Résistances à la flexion

Dans la même étude que précédemment Zulfiati et al. (2019), [64] ont considéré la résistance à la flexion. Les résultats ont indiqué que la longueur de la fibre a eu un impact très significatif sur la résistance du composite. Les géopolymères contenant 0,5 % des fibres d’ananas de 30 mm de longueur ont présenté la plus grande résistance de flexion du composite activé avec 16 M d’hydroxyde de sodium soit 9.209 MPa (voir la figure 4.16).

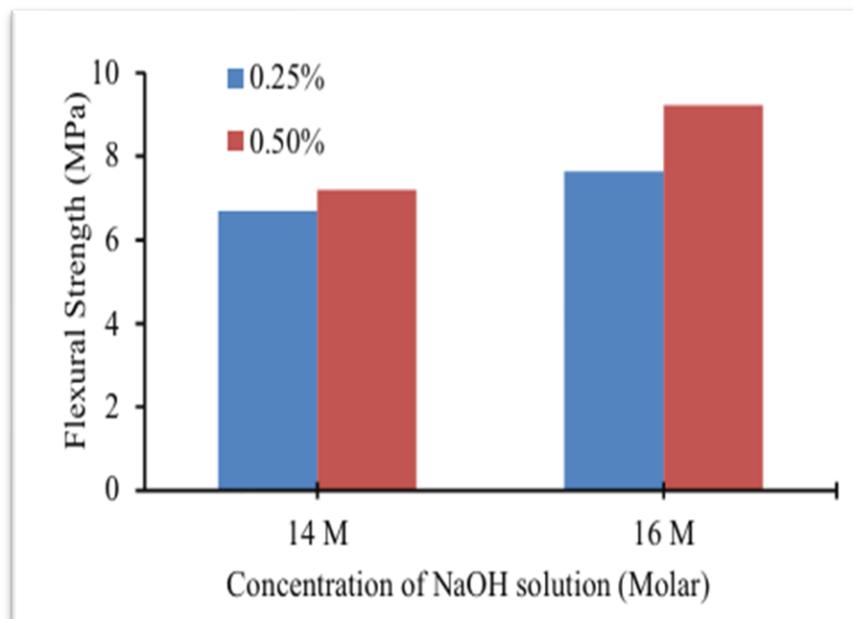


Fig. 4.14 : Molarité et résistance à la flexion

Na Zhang & al. (2021), [66] dans l'étude citée ci-dessus ont aussi étudié le géopolymère renforcé avec des fibres de kenaf non traitées (KF) et fibres de Kenaf traitées au NaOH (TKF) et fibres de Kenaf traitées au CaCl_2 (TKF- CaCl_2) en flexion. L'augmentation de la résistance à la flexion était directement proportionnelle à l'augmentation de la teneur en kenaf (KF). À mesure que la teneur en KF/TKF/TKF- CaCl_2 augmente de 5 wt% à 15 wt%, les résistances à la flexion ont augmenté respectivement d'environ 20,9 %, 23,5 % et 38,7 % pour le G-KF, le G-TKF et le G-TKF- CaCl_2 .

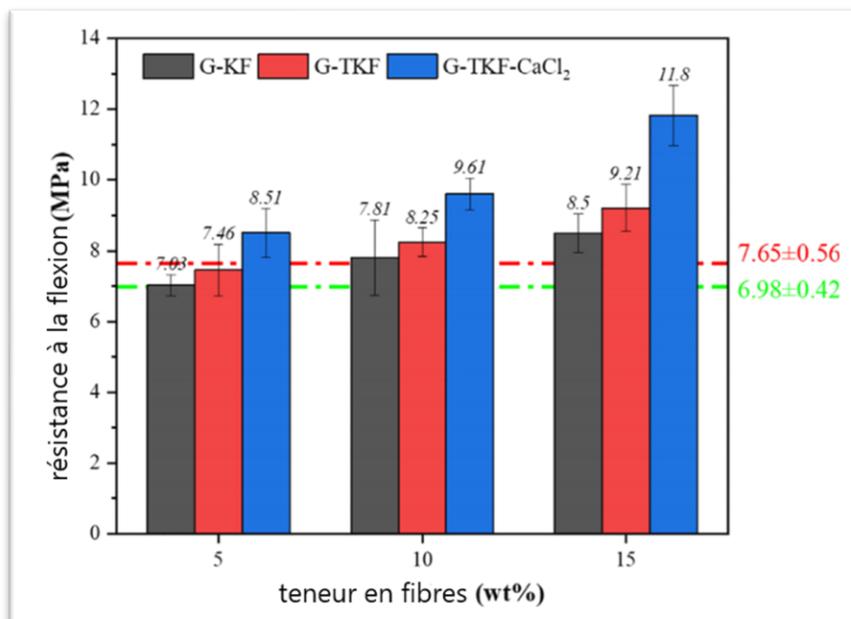


Fig. 4.15 : résistance à la flexion

Andrea & al. (2021), [68] ont utilisé trois types de fibres naturelles (chanvre, kenaf et bambou) traitées avec une solution de NaOH pour formuler des composites géopolymères à base de métakaolin activée par les alcalis. Les fibres courtes avec un taux de 3 % en poids du liant ont été dispersées de manière aléatoire dans la matrice. La figure (4.17) représente la résistance à la flexion de tous les composites étudiés. Une augmentation linéaire de la résistance est constatée pour les échantillons de bambou et de kenaf, l'effet positif étant plus fort pour les échantillons de bambou (environ 80 % pour le bambou et environ 20 % pour le kenaf à la quantité la plus élevée). Les échantillons de chanvre montrent, en revanche, une valeur presque constante avec un léger effet positif à la teneur en fibres la plus élevée (5 %).

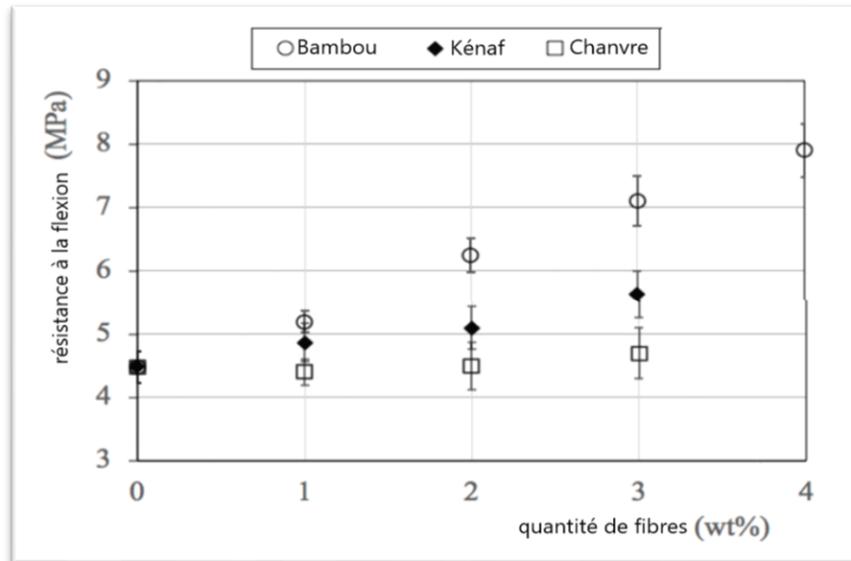


Fig. 4.16 : Résistance à la flexion des matériaux étudiés

Workiy et al. (2023), [69] ont consacré cette étude à la caractérisation à la flexion trois points de composites géopolymères à base de kaolin calciné renforcés de fibres de cellulose de tiges de maïs traitées au NaOH. Ils ont trouvé que l'ajout de 1,5 % en poids de fibres de cellulose traitée améliorent la résistance à la flexion de 2,4 fois comme le montre la figure (4.19).

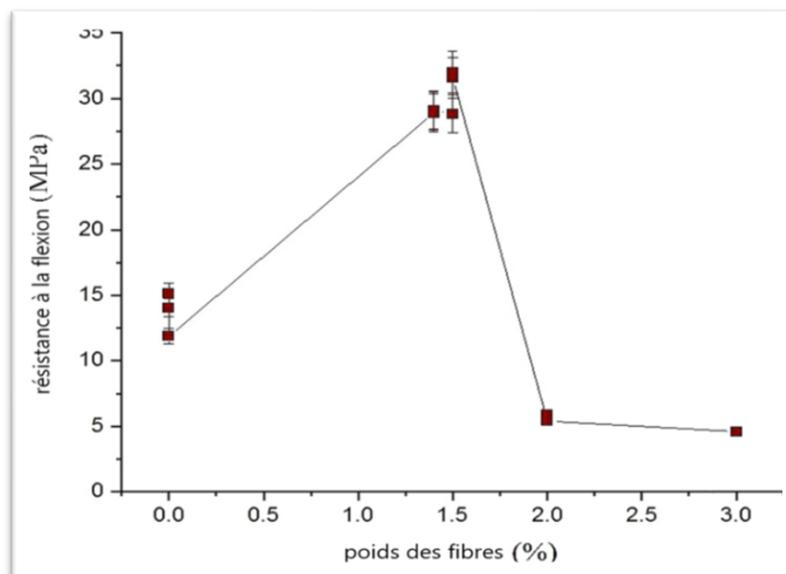


Fig. 4.17: Résistance à la flexion en fonction du poids des fibres (%)

Conclusion

Les études examinées indiquent que l'incorporation de fibres naturelles dans les composites géopolymères peut conduire à des améliorations notables des résistances à la compression et à la flexion, démontrant le potentiel des composites géopolymères renforcés de fibres naturelles en tant que matériau de construction durable. Dans l'ensemble, l'utilisation de fibres naturelles comme renforcement pour les composites géopolymères offre une alternative durable et respectueuse de l'environnement avec des propriétés mécaniques améliorées notamment quand ces fibres sont préalablement traitées améliorant ainsi l'adhérence matrice / fibres.

Conclusion Générale

Cette recherche s'est attachée à explorer l'univers des géopolymères, des composites géopolymères renforcés de fibres naturelles, et l'importance du traitement de ces fibres. Le parcours de cette étude s'est déroulé en plusieurs étapes clés, chacune apportant une contribution essentielle à la compréhension globale de ce domaine innovant et prometteur.

Les géopolymères se distinguent par leurs propriétés écologiques et durables, faisant d'eux une alternative intéressante aux matériaux traditionnels à base de ciment. Leur faible empreinte carbone et leur capacité à incorporer des déchets industriels en font des matériaux de choix pour une construction plus durable.

L'incorporation de fibres naturelles dans les matrices géopolymères vise à améliorer les propriétés mécaniques et physiques de ces matériaux. Les fibres telles que le jute, le chanvre et la cellulose offrent non seulement des avantages environnementaux mais également des performances mécaniques accrues lorsqu'elles sont bien intégrées à la matrice. Le traitement des fibres naturelles est crucial pour optimiser leur compatibilité avec la matrice géopolymère. Les traitements chimiques éliminent les impuretés, augmentent la rugosité de surface, et améliorent l'adhésion fibre-matrice. Ces modifications conduisent à des composites avec de meilleures propriétés mécaniques, tels que la résistance à la traction et à la flexion.

L'analyse scientométrique effectuée dans cette recherche a révélé une croissance significative de la recherche dans ce domaine, avec une augmentation progressive du nombre de publications depuis 2008. Les revues et les articles les plus influents ont été identifiés, mettant en lumière les tendances de recherche et les collaborations les plus fructueuses.

L'examen approfondi des travaux de plusieurs articles a montré que les composites géopolymères renforcés de fibres naturelles traitées présentent des performances mécaniques nettement supérieures à celles des composites avec des fibres non traitées. Le traitement des fibres s'est avéré essentiel pour maximiser les propriétés mécaniques et la durabilité des composites.

Ces conclusions ouvrent la voie à des applications pratiques et à de futures recherches pour optimiser et promouvoir l'utilisation des composites géopolymères renforcés de fibres naturelles dans diverses industries.

Cette synthèse démontre le potentiel de ces matériaux pour répondre aux exigences modernes de durabilité et de performance dans le secteur de la construction, tout en favorisant une approche plus respectueuse de l'environnement.

Références

- [1] “Advances in geopolymer materials,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, doi: 10.1016/j.jtte.2021.03.004.
- [2] *Les pyramides en Égypte*. [Online]. Available : <https://latterdaysaintmag.com/born-when-the-light-begins-to-return-a-birthday-letter-to-joseph-smith/>
- [3] “A review and prospects for the minerals industry,” *Geopolymerisation*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011> (accessed Jun. 05, 2024).
- [4] “Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications. Elsevier,,” *stanford.edu*. Accessed: Jun. 05, 2024. [Online]. Available: <https://searchworks.stanford.edu/view/9707383>
- [5] P. Rovnaník, “Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer,” *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1176–1183, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023.
- [6] “nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si /Al.” <https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9opolym%C3%A8re> (accessed Jun. 05, 2024).
- [7] “Geopolymer,” *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Geopolymer> (accessed Jun. 05, 2024).
- [8] “Les cendres volantes - ACPresse.” <https://www.acpresse.fr/les-cendres-volantes/> (accessed Jun. 05, 2024).
- [9] A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, and M. Criado “Alkali-activated fly ash: a cement for the future,” *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 9, pp. 1323–1330, 2007.
- [10] *Tas de laitier de haut fourneau*. [Online]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Laitier_\(m%C3%A9tallurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Laitier_(m%C3%A9tallurgie))
- [11] M. Khalifeh, A. Saasen, H. Hodne, and H. B. Motra, “Laboratory evaluation of rock-based geopolymers for zonal isolation and permanent P&A applications,” *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 175, pp. 352–362, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2018.12.065.

- [12] *Bloc de pierre de taillée.* [Online]. Available: <https://www.bca-materiauxanciens.com/produits/parement-pierre-taille-moellons/pierre-de-taille/bloc-de-pierre-de-taille/>
- [13] E. Kamseu, C. R. Kaze, J. N. N. Fekoua, U. C. Melo, and C. Leonelli, “Ferrisilicates formation during the geopolymerization of natural Fe-rich aluminosilicate precursors,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 240, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.122062.
- [14] *Morceau gris d’alliage de silicium de H C en métal de sable ferro de diamant pour la sidérurgie.* [Online]. Available: <https://french.ferroalloymetal.com/sale-12290720-h-c-silicon-ferro-alloy-metal-diamond-sand-gray-lump-for-steel-making.html>
- [15] “Ciments géopolymères,” *Techniques De L’Ingénieur.* <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/surfaces-et-structures-fonctionnelles-42534210/ciments-geopolymeres-n3301/>
- [16] J. Davidovits “Géopolymères : Nouveaux matériaux polymères inorganiques,” *Journal D’analyse Thermique*, vol. 41, no. 3, pp. 331–346, 1994, doi: 10.1007/BF02546910.
- [17] J. Provis and J. S. J. Van Deventer “Géopolymères : structures, procédés, propriétés et applications industrielles,” *Série Woodhead Publishing En Génie Civil Et Structurel*, 2014, doi: 10.1533/9780857098772.
- [18] A. Palomo, M. T. Blanco-Varela, M. L. Granizo, and F. Puertas “Cendres volantes activées par des alcalis : du ciment pour l’avenir,” *Recherche Sur Le Ciment Et Le Béton*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00158-4.
- [19] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Luke, and J. S. J. Van Deventer, “La technologie des géopolymères : l’état actuel de l’art,” *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [20] A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, and A. Fernández-Jiménez, “Un examen des liants à base de ciment activés par alcali pour les applications de génie civil,” *Construction Et Matériaux De Construction*, vol. 55, pp. 310–323, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.080.

- [21] J. L. Provis and J. S. J. Van Deventer, *Géopolymères : structures, procédés, propriétés et applications industrielles. Série Woodhead Publishing en génie civil et structurel*. 2014. [Online]. doi :10.1533/9780857098772
- [22] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, “Alkali-activated fly ashes: A cement for the future,” *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, Aug. 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- [23] T. Bakharev, “Resistance of geopolymer materials to acid attack,” *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 4, pp. 658–670, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.
- [24] J. Davidovits, “Properties of geopolymer cements,” *geopolymer.org*. Accessed: 1994. [Online]. Available: <https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/KIEV.pdf>
- [25] J. Davidovits, “Geopolymer Chemistry and Applications 5th edition,” *Institut Géopolymère*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/265076752_Geopolymer_Chemistry_and_Applications
- [26] V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, and Thaumaturgo. C, “Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers,” *International Journal of Inorganic Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 309–317, Sep. 2000, doi: 10.1016/S1466-6049(00)00041-6.
- [27] “Visite aux ouvrages en béton géopolymère: aéroport et éco-bâtiment,” *Institut Géopolymère*. <https://www.geopolymer.org/fr/news/video-visite-aux-ouvrages-en-beton-geopolymere-aeroport-et-eco-batiment/>
- [28] I. Nanou and H. Yousfi, “ETUDE COMPARATIVE SUR LES COMPOSITES A FIBRES DU PALMIER DATTIER,” 2020. <https://dspace.univ-msila.dz/items/e8a70cb7-fd90-4359-8496-5de839339aa8>
- [29] OUAHBI. Tariq (2008) : Modélisation du couplage hydro-mécanique en milieu fibreux déformable : application aux procédés d’infusion, UNIVERSITÉ DU HAVRE. Thèse de doctorat, 186 pages.
- [30] Neghar.F, (2020) : Etude des propriétés thermiques d’un matériau composite à matrice polymère. Mémoire de fin d’études Université de Mohamed Seddik Ben Yahia Jijel, 64 pages.

- [31] K. Korniejenko, E. Frączek, E. Pytlak, and M. Adamski, “Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers,” *Procedia Engineering*, vol. 151, pp. 388–393, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.395.
- [32] Archez J., (2020) : Formulation de composites à base de liants à basse température type géopolymère à base d’argilites et de différents renforts : réalisation d’une pièce par fabrication additive. Thèse de doctorat Université de Limoges, 181 pages.
- [33] Raymond Hajj, (2018) : Procédés de Modification des Fibres naturelles. Thèse de doctorat Ecole Doctorale des Sciences et de Technologie Beyrouth, 217 pages.
- [34] N. A. Al-Ghazali, F. N. A. A. Aziz, K. Abdan, and N. A. M. Nasir, “Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced Geopolymer Composites: A Review,” *Pertanika Journal of Science & Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 2053–2069, Apr. 2022, doi: 10.47836/pjst.30.3.16.
- [35] M. N. Amin, W. Ahmad, K. Khan, and A. Ahmad, “A Comprehensive Review of Types, Properties, Treatment Methods and Application of Plant Fibers in Construction and Building Materials,” *Materials*, vol. 15, no. 12, p. 4362, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15124362.
- [36] V. Youmiwi, “Une fibre naturelle, c’est quoi en fait ?,” *youmiwi*, Mar. 16, 2022. <https://youmiwi.com/blogs/youmiwi/une-fibre-naturelle-c-est-quoi>
- [37] A. Benyahia, A. Merrouche, Z. E. A. Rahmouni, M. Rokbi, W. Serge, and Z. Kouadri, “Study of the alkali treatment effect on the mechanical behavior of the composite unsaturated polyester-Alfa fibers,” *Mechanics & Industry*, vol. 15, no. 1, pp. 69–73, Jan. 2014, doi: 10.1051/meca/2013082.
- [38] J. Wei, C. Meyer, Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. *Cem. Concrete Res.* 2015, 73, 1–16.
- [39] L. Yan, S. Su, Chou, N. Microstructure, flexural properties and durability of coir fiber reinforced concrete beams externally strengthened with flax FRP composites. *Compos. Part B Eng.* 2015, 80, 343–354.
- [40] S. O. Amiamdhamen, M. Meincken, L. Tyhoda, Natural Fiber Modification and Its Influence on Fiber-matrix Interfacial Properties in Biocomposite Materials. *Polym. Fibers* 2020, 21, 677–689.

[41] M. BECKERS « Etude des fibres naturelles courtes pour composites » CELABOR (Centre de Services Scientifiques et Techniques), (2014).

[42] A. Putra, K. H. Or, M. Z. Selamat, M. J. M. Nor, M. H. Hassan, and I. Prasetyo, “Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres,” *Applied Acoustics*, vol. 136, pp. 9–15, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.01.029.

[43] Yasmine Mahmoud, (2022) : Valorisation de déchets (coquilles de noix et d'abricots) dans l'élaboration de biocomposites biodégradables à base d'acide poly lactique : Application à l'étage de Bologhine Alger. Thèse de doctorat en sciences, Alger, 183 pages.

[44] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant- based natural fiber reinforced polymer composites: An overview,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, Oct. 2012.

[45] S. A. Paul, K. Joseph, G. D. G. Mathew, L. A. Pothan, and S. Thomas, “Influence of polarity parameters on the mechanical properties of composites from polypropylene fiber and short banana fiber,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no.10, pp. 1380–1387, 2010.

[46] M. S. Visser, N. J. Van Eck, and L. Waltman, “Large-scale comparison of bibliographic data sources: Scopus, Web of Science, Dimensions, Crossref, and Microsoft Academic,” *Quantitative Science Studies*, vol. 2, no. 1, pp. 20–41, Jan. 2021, doi: 10.1162/qss_a_00112.

[47] Y. Ding, R. Rousseau, and D. Wolfram, *Measuring Scholarly Impact*. Springer, 2014.

[Online]. Available: http://books.google.ie/books?id=oP05BQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Measuring+Scholarly+Impact&hl=&cd=1&source=gbs_api

[48] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, “SciMAT: A new science mapping analysis software tool,” *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 63, no. 8, pp. 1609–1630, Jul. 2012, doi: 10.1002/asi.22688.

[49] O. Persson, R. Danell, and J. W. Schneider, “How to use Bibexcel for various types of bibliometric analysis,” *ResearchGate*, Jan. 2009, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/285473885_How_to_use_Bibexcel_for_various_types_of_bibliometric_analysis

- [50] S. Grauwin and I. Sperano, “Bibliomaps - a software to create web-based interactive maps of science: The case of UX map,” *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 815–816, Jan. 2018, doi: 10.1002/pra2.2018.14505501129.
- [51] M. Aria and C. Cuccurullo, “bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis,” *Journal of Informetrics*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- [52] C. Chen, “CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature,” *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 359–377, Dec. 2005, doi: 10.1002/asi.20317.
- [53] N. J. Van Eck and L. Waltman, “Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping,” *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, Dec. 2009, doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.
- [54] T. Alomayri and I.M. Low, “synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites,” *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 1, no. 1, pp. 30–34, 2013, doi: 10.1016/j.jascer.2013.01.002.
- [55] T. Alomayri, F.U.A. Shaikh, and I.M. Low, “Effect of fabric orientation on mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites,” *Materials & Design*, vol. 57, pp. 360–365, May 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.036.
- [56] H. Assaedi, T. Alomayri, F. U. A. Shaikh, and I.-M. Low, “Characterisation of mechanical and thermal properties in flax fabric reinforced geopolymer composites,” *Journal of Advanced Ceramics*, vol. 4, no. 4, pp. 272–281, Sep. 2015, doi: 10.1007/s40145-015-0161-1.
- [57] K. Korniejenko, E. Frączek, E. Pytlak, and M. Adamski, “Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers,” *Procedia Engineering*, vol. 151, pp. 388–393, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.395.
- [58] G. Silva, S. Kim, B. Bertolotti, J. Nakamatsu, and R. Aguilar, “Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes,” *Construction and Building Materials*, vol. 258, Art. no. 119697, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119697.

- [59] R. N. Yanou, R. C. KAZE, A. Adesina, J. G. D. Nemaleu, S. B. K. Jiofack, and J. N. Y. Djobo, "Performance of laterite-based geopolymers reinforced with sugarcane bagasse fibers," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, Art. no. e00762, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00762.
- [60] M. Alzeer and K. MacKenzie, "Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax)," *Applied Clay Science*, vol. 75–76, pp. 148–152, May 2013, doi: 10.1016/j.clay.2013.03.010.
- [61] K. Korniejenko, M. Lach, M. Hebdowska-Krupa, and J. Mikula, "The mechanical properties of flax and hemp fibres Reinforced Geopolymer Composites," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 379, May 2018, doi: 10.1088/1757-899X/379/1/012023.
- [62] H. Ye, Y. Zhang, Z. Yu, and J. Mu, "Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 10–16, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.028.
- [63] A. Wongsu, R. Kunthawatwong, S. Naenudon, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 241, Art. no. 118143, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118143.ss
- [64] R. Zulfiati, N. Saloma, and Y. Idris, "Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer with Natural Fiber," *Journal of Physics. Conference Series*, vol. 1198, no. 8, p. 082021, Apr. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1198/8/082021.
- [65] P. Maichin, T. Suwan, P. Jitsangiam, and P. Chindaprasirt, "Hemp Fiber Reinforced Geopolymer Composites: Effects of NaOH Concentration on Fiber Pre-Treatment Process," *Key Engineering Materials*, vol. 841, pp. 166–170, May 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.841.166.
- [66] N. Zhang, H. Ye, D. Pan, and Y. Zhang, "Effects of alkali-treated kenaf fiber on environmentally friendly geopolymer-kenaf composites: Black liquid as the regenerated activator of the geopolymer," *Construction & Building Materials*, vol. 297, p. 123787, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123787.

[67] O. Ayeni *et al.*, “Effect of Coir Fiber Reinforcement on Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Composite,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, p. 5478, May 2022, doi: 10.3390/app12115478.

[68] A. Saccani, L. Molari, G. Totaro, and S. Manzi, “Geopolymers Reinforced with Natural Fibers: A Comparison among Different Sources,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 22, p. 11026, Nov. 2021, doi: 10.3390/app112211026.

[69] N. A. Workiye and N. E. Woldesenbet, “Flexural Strength and Porosity of NaOH-Treated Maize Stalk Cellulose-Fibers-Reinforced Geopolymer Composites,” *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, vol. 25, pp. 44–53, Aug. 2023, doi: 10.46604/peti.2023.10285.