

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 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil et d'Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

Boukour Hocine

**Thème : Propriétés mécaniques des mortiers géopolymères
composé de fibres naturelles**

Sous la direction de : Dr **Bendjaiche Robila**

Juin 2025

REMERCIEMENT

Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont à Dieu le Tout Puissant qui nous a permis d'apprendre à lire et à connaître le vrai sens de la vie, et qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté de mener à terme ce projet.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promotrice Madame Roubila Bendjaiche de nous avoir encadrés ainsi que leurs disponibilités, orientations, et précieux conseil avec lequel ils ont suivi et guidé ce travail

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur d'accepté de lire et d'examiner ce modeste travail.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui ont contribué à notre formation d'ingénieur d'état en Génie Civil.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude

Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU
De m'avoir donné la force et le courage de mener
à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail à :
A ma tendre mère FATIMA ZOHRA et mon très cher père
MOHAMED SEGHIR*

A mes sœurs et mes Frères

*A ma petites famille ma fille et mes deux fils et ma
femme*

*A toute la promotion 2025, et à tous mes amis sans
exception.*

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

HOCINE

SOMMAIRE

Résumé, abstract, ملخص	
Sommaire Liste des figures Liste des tableaux	
Introduction Générale	01
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Géopolymère.....	03
I.2.1 Définition.....	03
I.2.2 Structure du matériau géopolymère.....	04
I.2.3 Historique des Géopolymères	05
I.2.4 Mécanisme de la géopolymérisation	06
I.3 Différents types de géopolymères.....	09
I.3.1 Géopolymère à base de laitier	09
I.3.2 Géopolymère à base des roches volcaniques.....	10
I.3.3 Ciment géopolymère à base de cendres volantes.....	10
I.4 Matières premières employées pour l'élaboration des géopolymères.....	10
I.5 Types de matières premières alumino-silicates.....	11
I.5.1 Métakaolin.....	12
I.5.2 Laitier granulé.....	13
I.5.3 Cendres volantes.....	14

I.5.4 Poudre de verre.....	15
I.6 Solution alcaline.....	15
I.6.1 Hydroxyde de sodium.....	15
I.6.2 Silicate de sodium.....	16
I.6.3 Carbonate de sodium.....	16
I.7 Facteurs influant sur les propriétés des géopolymères	16
I.8 Application des géopolymères.....	19
I.9 Applications du géopolymère dans le domaine de la construction.....	20
I.10 Béton géopolymère	22
I.11 Les activateurs utilisés lors de formulation des bétons géopolymères.....	22
I.12 Avantages et inconvénients des géopolymère.....	23
I.13 Intérêt des géopolymère dans le génie civil.....	22
Chapitre II : LES MATERIAUX GEOPOLYMERES COMPOSITES	
II.1 Introduction.....	25
II.2 Définition et historique de composite.....	25
II.3 Classement d'un matériau composite.....	27
II.3.1 Matrice.....	27
II.3.2 Renfort	27
II.4 Critères de choix d'un bon couple fibre-matrice.....	28
II.4.1 Critères mécaniques.....	28
II.4.2 Critères chimiques.....	29
II.4.3 Critères économiques.....	30
II.5 Les fibres naturelles.....	30
II.5.1 Définition.....	30
II.5.2 Les applications des fibres naturelles.....	30

II.5.3 Classification des fibres naturelles.....	31
II.6 Le rôle des fibres dans le béton :.....	43
II.7 Utilisation des Fibres dans la Construction.....	44
II.8 Composition chimique des fibres végétales.....	45
II.9 Avantages et inconvénients des fibres végétales	49
II.10 Traitement des fibres.....	50
II.10.1 Traitement chimique	50
II.10.2 Traitement thermique	53
CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES	
III.1 Introduction.....	55
III.2. Propriétés mécaniques des géopolymères renforcées par les fibres naturelles	55
III.2.1. Résistance à la compression	56
III.2.2. Résistance à la flexion	66
Conclusion Générale	76

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES	
Figure I.1: Structure des géopolymères proposée par Barbosa	03
Figure I.2: Nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si/Al	05
Figure I.3: Mécanisme de géopolymérisation proposé par Duxson	07
Figure I.4 Modèle de mécanisme de géopolymérisation proposé par Provis	08
Figure I.5: Diagramme ternaire CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ des matières premières de géopolymère et d'autres liants traditionnels	11
Figure I.6: Diffractogramme de rayon x de la poudre du métakaolin	13
Figure I.7: Diffractogramme de rayon x de la poudre du laitier granulé	14
Figure I.8: Première structure en béton géopolymère a été construite en 1994 à Lipetsk, en Russie.	20
Figure I.9: L'institut GCI (The Global Change Institue) à l'Université du Queensland Australie.....	21
Figure I.10 : Parpaings fabriqués à base d'un béton géopolymère	21
CHAPITRE II : LES MATERIAUX GEOPOLYMERES COMPOSITES	
Figure II.1: Composition d'un matériau composite	25
Figure II.2: Mur en torchis	26
Figure II.3: Arc sino-mongol	26
Figure II.4: Les types de fibres naturelles	31
Figure II.5: Les sortes de la laine.....	33

Figure II.6: Les sortes du poil	33
Figure II.7: Vue microscopique de fibres d’amiante	35
Figure II.8: Fibre de verre.....	36
Figure II.9: Classification des fibres végétales.....	37
Figure II.10: Chanvre.....	38
Figure II.11: Image de lin.....	38
Figure II.12: La fibre de jute.....	39
Figure II.13: La fibre de kenaf.....	39
Figure II.14: Sisal et la fibre de sisal.....	40
Figure II.15: Illustrations de la plante d’Alfa à l’état brut.....	41
Figure II.16: Herbe de Diss.....	41
Figure II.17: Tige de Diss	41
Figure II. 18: Torche de palmier.....	42
Figure II.19 : la plante de coco.....	43
Figure II.20 : Molécule de la cellulose.....	46
Figure II.21 : Structure d’un type de xyloglucane.....	46
Figure II.22: Vue en trois dimensions du complexe glucidique de la lignine dans la cellule végétale.....	47
Figure II.23. Représentation de la molécule de pectine.....	48
Figure II.24 : Structure typique de la fibre (i) non traitée et (ii) traité.....	51
CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES	
Figure III.1: Résistance à la compression du mortier géopolymère avec fibres de balle de riz à 7 et 28 ans de durcissement	57
Figure III.2: Résultats de résistance à la compression.....	58

Figure III.3: Influence du dosage des fibres de bagasse sur la résistance à la compression.....	59
Figure III.4: Résistance à la compression au 7ème jour des éprouvettes renforcées : a) avec du jute ; b) : avec des fibres de sisal	59
Figure III.5: Impact des différentes longueurs et fractions volumiques des fibres sur le développement de la résistance à la compression du béton : (a) 15 mm (b) 25 mm (c) 35mm....	62
Figure III.6: Résistance à la compression des échantillons à différentes teneurs en fibres de coco testées après 28 jours.....	63
Figure III.7: Résistance à la compression du géopolymère renforcé par des fibres de paille de maïs	64
Figure III.8: Résistance à la compression des composites géopolymères en fonction de la fibre contenu.....	66
Figure III.9: Relation entre la résistance à la compression et la teneur en fibre de basalte dans la série de géopolymères	66
Figure III.10: Résistance à la flexion du composite géopolymère en fonction de la teneur en fibres	67
Figure III.11: Effet de la teneur en fibres de lin sur la résistance à la flexion	68
Figure III.12: Résistance à la flexion des échantillons à différentes teneurs en fibres de coco testées après 28 jours.....	69
Figure III.13: Résistance à la flexion en fonction de fibres de sisal	70
Figure III.14: Résistance à la flexion des composites à base de géopolymères	71
Figure III.15: Effet de la teneur en fibres sur la résistance à la flexion de la pâte géopolymère...	72
Figure III.16: la relation entre la composition de la fibre 14 M et la résistance à la flexion.....	74
Figure III.17 : la relation entre la composition de la fibre 16 M et la résistance à la flexion.....	74

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II : LES MATERIAUX GEOPOLYMERES COMPOSITES	
Tableau II.1 : Principales propriétés physiques des FSPD (Dokar, Elghers, DNour et D-Bida).....	42
Tableau II.2 : Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment.....	44
Tableau II.3: Composition en cellulose de quelques fibres naturelles	48
Tableau II.4 : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites.....	49
CHAPITRE III : PROPRIETES MECANQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES	
Tableau III.1 : les résultats moyens et l'écart type des valeurs de résistance.....	60
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques des présents composites renforcés de fibre Laine.....	73

RESUME

RESUME

Afin de réduire l'empreinte environnementale des nouvelles technologies, les secteurs de la construction et de l'industrie se tournent de plus en plus vers les fibres naturelles pour renforcer les composites à base de ciment et de géopolymères. Ces fibres sont intéressantes parce qu'elles sont renouvelables, biodégradables et non toxiques, et qu'elles offrent des propriétés mécaniques prometteuses comparables à celles des fibres synthétiques. Le béton de géopolymère offre des avantages tels qu'une résistance initiale élevée, une résistance au feu, une tolérance aux températures élevées, une durabilité environnementale et une immobilisation efficace des métaux lourds. Comme le béton traditionnel, il présente une fragilité considérable et une résistance limitée aux fissures. Le béton de géopolymère renforcé de fibres naturelles possède des attributs tels que la légèreté, l'isolation thermique et la capacité de retarder la fissuration du béton. En outre, il est respectueux de l'environnement, soutient le développement durable des ressources et présente un potentiel d'application prometteur. Les caractéristiques des fibres naturelles varient considérablement. Pour comprendre les effets et les mécanismes de renforcement du béton géopolymère, ce mémoire présente une étude bibliographique sur les géopolymères; les différentes fibres naturelles et une revue des résultats des recherches récentes concernant l'impact des fibres naturelles sur les propriétés mécaniques du béton géopolymère, tant au niveau national qu'international.

Mot clé : Fibres naturelles, géopolymère, propriétés mécaniques, mortier.

ABSTRACT

ABSTRACT

To reduce the environmental footprint of new technologies, the construction and industrial sectors are increasingly turning to natural fibers for reinforcing cement and geopolymer-based composites. These fibers are attractive because they are renewable, biodegradable, and non-toxic, offering promising mechanical properties comparable to synthetic alternatives. Geopolymer concrete offers benefits such as high early strength, fire resistance, high temperature tolerance, environmental sustainability, and effective immobilization of heavy metals. Similar to traditional concrete, it exhibits considerable brittleness and limited crack resistance. Natural fiber reinforced geopolymer concrete possesses attributes such as lightweight, thermal insulation, and the ability to delay cracking in concrete. Furthermore, it is eco-friendly, supports the sustainable development of resources, and shows promising application potential. The characteristics of natural fibers vary significantly. To understand the reinforcing effects and mechanisms of geopolymer concrete, this thesis presents a bibliographical study on geopolymer; the various natural fibers and a review of recent research results concerning the impact of natural fibers on the mechanical properties of geopolymer concrete, both nationally and internationally.

Key words: Natural fiber, geopolymer, mechanical properties, mortars.

ملخص

لتقليل البصمة البيئية للتقنيات الجديدة، يتجه قطاعا البناء والصناعة بشكل متزايد إلى الألياف الطبيعية لتقوية الأسمنت والمركبات القائمة على الجيوبوليمر. تُعد هذه الألياف جذابة لأنها متجددة وقابلة للتحلل الحيوي وغير سامة، وتوفر خصائص ميكانيكية واعدة تضاهي البدائل الاصطناعية. توفر الخرسانة الجيوبوليمرية مزايا مثل القوة المبكرة العالية ومقاومة الحرائق وتحمل درجات الحرارة العالية والاستدامة البيئية والتثبيت الفعال للمعادن الثقيلة. وعلى غرار الخرسانة التقليدية، تُظهر هشاشة كبيرة ومقاومة محدودة للتشقق. تمتلك الخرسانة الجيوبوليمرية المسلحة بالألياف الطبيعية سمات مثل خفة الوزن والعزل الحراري والقدرة على تأخير التشقق في الخرسانة. علاوة على ذلك، فهي صديقة للبيئة وتدعم التنمية المستدامة للموارد وتُظهر إمكانات تطبيق واعدة. تختلف خصائص الألياف الطبيعية بشكل كبير. لفهم تأثيرات وآليات تقوية الخرسانة الجيوبوليمرية، تقدم هذه الأطروحة دراسة بيليوغرافية عن الجيوبوليمر. الألياف الطبيعية المختلفة ومراجعة نتائج الأبحاث الحديثة المتعلقة بتأثير الألياف الطبيعية على الخصائص الميكانيكية للخرسانة الجيوبوليمرية، على المستوى الوطني والدولي.

الكلمات المفتاحية: الألياف طبيعية، الجيوبوليمر، الخصائص الميكانيكية ، الميلاط

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'urbanisation rapide entraîne une énorme consommation de ciment Portland, qui consomme beaucoup d'énergie et a des effets néfastes sur l'environnement. La recherche d'un matériau de construction durable est l'objectif principal de l'industrie de la construction, ce qui encourage les chercheurs à développer des matériaux cimentaires supplémentaires alternatifs qui remplacent partiellement ou totalement le ciment. L'une des technologies alternatives émergeant dans l'industrie de la construction est l'utilisation du béton de géopolymères (BGP), qui est synthétisé à partir de matériaux géologiques trouvés dans des sources naturelles et d'autres déchets industriels. L'introduction de la technologie GPC conduit à un développement durable dans le secteur de la construction, en réduisant les émissions globales de CO₂ et en assurant un environnement plus propre à long terme. Néanmoins, ces nouveaux matériaux cimentaires alternatifs souffrent des mêmes défauts que les matériaux cimentaires durcis, notamment leur fragilité et leur résistance à la traction comparativement faible. Ce problème pourrait être résolu en incorporant des fibres aux matériaux aluminosilicatés de base. Contrairement aux matériaux fragiles typiques, dans lesquels les fissures se propagent rapidement et réduisent considérablement la capacité de la matrice à supporter des charges, le béton renforcé de fibres (FRC) se comporte différemment. Les fibres dispersées dans la matrice du béton peuvent entraver la croissance des fissures, en ralentissant ou même en stoppant leur formation.

Le renforcement des géopolymères a été pratiqué avec différents matériaux fibreux, Les fibres synthétiques, y compris les fibres d'acier, de verre et de carbone, sont les matériaux les plus fréquemment utilisés pour renforcer le géopolymère ; En outre, de nombreuses études ont été menées pour examiner l'application des fibres polymères, telles que le polypropylène et l'alcool polyvinylique, en tant que renforts des géopolymères. D'autres chercheurs [1] ont étudié le renforcement d'un géopolymère à base de gangue de charbon et de scories avec des fibres de polypropylène. La fibre améliore de manière significative la résistance à la flexion et réduit la rupture fragile du géopolymère. Une fibre d'acier a été utilisée comme renfort dans les poutres d'un composite géopolymère pour modifier les propriétés de flexion du composite. Ces fibres synthétiques sont basées sur des sources fossiles limitées et posent un problème environnemental.

Les fibres naturelles, principalement disponibles sous forme de déchets, qui peuvent poser des problèmes environnementaux, peuvent être utilisées pour renforcer durablement les matériaux de construction. Les déchets agricoles et les résidus végétaux peuvent constituer une source de

INTRODUCTION GENERALE

fibres naturelles aux performances comparables à celles des fibres synthétiques Plusieurs études scientifiques ont examiné l'impact de l'incorporation de différentes quantités et variétés de fibres naturelles sur les propriétés des composites géopolymères. Le type, la longueur, l'alignement, les propriétés de surface et les prétraitements de ces fibres ont également un impact sur l'amélioration des propriétés mécaniques du géopolymère

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 et la taille de ces fibres sur leurs propriétés et leur comportement dans la matrice géopolymère.

Le manuscrit de ce mémoire sera organisé en 3 chapitres comme suit : La première partie de cette étude est consacrée aux généralités sur les géopolymères, 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.)

Quant au troisième chapitre, ce chapitre présente une étude détaillé sur les performances mécaniques notamment la résistance à la compression et à la flexion des géopolymères renforcés par des fibres naturelles. En outre, les perspectives d'avenir des géopolymères renforcés par des fibres naturelles ont également été mises en évidence.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES GEOPOLYMERES

I.1 Introduction

Un nouveau liant, dit géopolymère, à faible impact environnemental, et moins couteux en énergie, a été proposé dans le but de remplacer partiellement, ou entièrement les ciments Portland conventionnels. Les géopolymères apparaissent comme une alternative prometteuse aux matériaux cimentaires traditionnels, appelés géopolymère par Davidovits, se sont des "gels" d'aluminosilicates amorphes, très denses obtenus par l'attaque d'un minéral contenant de l'alumine et éventuellement de la silice (tels que le métakaolin et/ou laitier) par une solution alcaline de silicate.

La première partie de ce chapitre présente une description générale des géopolymères, notamment son histoire, sa définition, sa terminologie, ses différents matériaux constitutifs et le processus de géopolymérisation.

I.2 Géopolymère

I.2.1 Définition

Les géopolymères sont une classe de matériaux aluminosilicates semi-cristallins, généralement synthétisés à la température ambiante ou légèrement élevée par une réaction chimique entre une poudre d'aluminosilicate amorphe et une solution alcaline très concentrée[2] Un modèle de structure proposé par Barbosa [3] est donné par la figure I.1

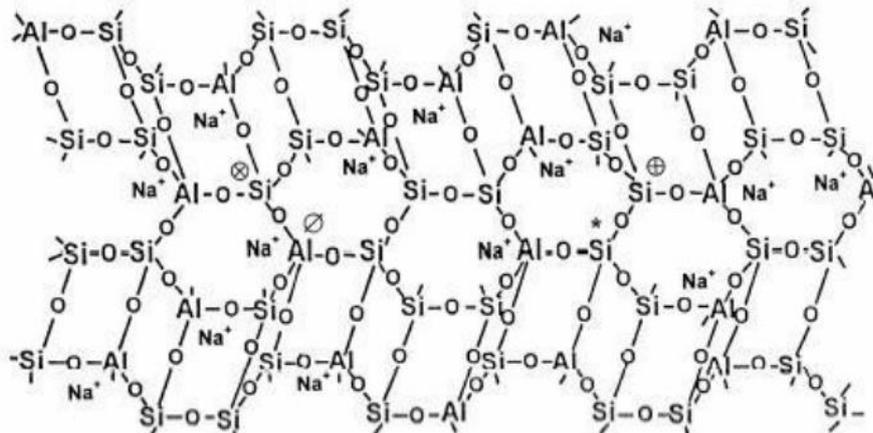
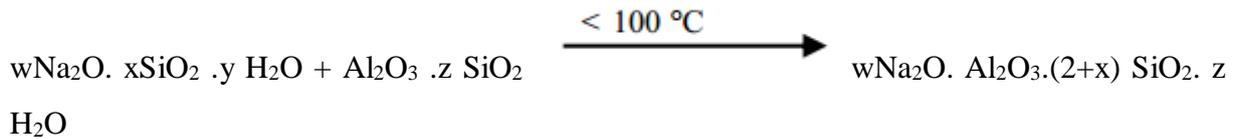


Figure I.1: Structure des géopolymères proposée par Barbosa [3]

I.2.2 Structure du matériau géopolymère

Les géopolymères font partie de la famille des aluminosilicates désignés sous le terme polysialates, qui est une abréviation de poly (silico-oxo-aluminate) association de type (-Si-O-Al-O-)n (avec n le degré de polymérisation). Ces matériaux peuvent être assimilés à des polymères inorganiques et résultent d'une synthèse en présence d'une solution alcaline et d'oxydes d'aluminium et de silicium à une température inférieure à 100 °C.

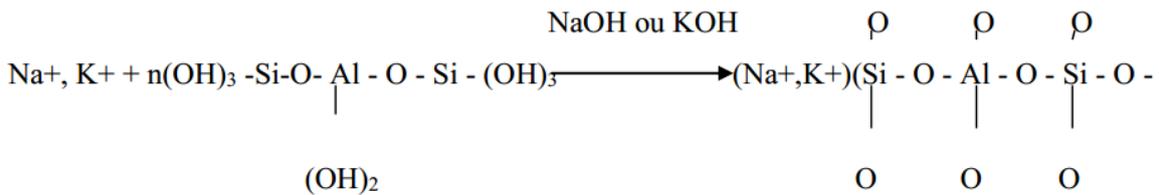
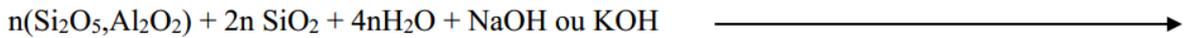
Pour leur synthèse, Rahier et al. [4] suggèrent que les polymères inorganiques peuvent être synthétisés selon la réaction chimique :



Où w, x et y dépendent de la composition de la solution alcaline et z est le degré d'hydratation.

Cependant le mécanisme de cette réaction n'est pas connu, ce qui conduit Davidovits [5] à proposer un processus qui fait intervenir les réactions de polycondensation des monomères.

Il explique ce qui précède par les réactions suivantes :



Précurseur géopolymerique

Géopolymère

Les géopolymères ont la formule générale : $M^{+n} \{(\text{SiO}_2)_z, \text{AlO}_2\}_n \cdot w \text{H}_2\text{O}$ où

- Z est le rapport molaire Si/Al,
- M^+ le cation monovalent,
- n le degré de polymérisation,
- W la quantité d'eau.

Les géopolymères se différencient par le rapport molaire Si/Al. Ce rapport est à l'origine de leur nomenclature.

- Si/ Al = 1 nommé le Poly Sialate (PS)

Ils sont des polymères en chaîne et en cycle qui résultent de la polycondensation des monomères : ortho-sialate $(OH)_3-Si-O-Al-(OH)_3$.

- Si/ Al = 2 nommé le Poly Sialate Siloxo (PSS)

Ils sont considérés comme étant le résultat de la condensation de l'ortho-sialate avec l'acide ortho-silicique $Si(OH)_4$.

- Si/ Al = 3 nommé le Poly Sialate DiSiloxo (PSDS)

Ils sont considérés comme étant le résultat de la condensation de l'ortho-sialate avec deux molécules acides ortho-silicique $Si(OH)_4$. Les poly(sialate) et les poly(sialate-siloxo) sont synthétisés selon le procédé sol-gel. Ils sont utilisés pour immobiliser les déchets toxiques et pour la construction des infrastructures. Les poly(sialate-disiloxo) sont utilisés comme réfractaires de revêtement des matériaux composites [5].

- Si/ Al = 21 nommé GPS (géopolymère avec une haute teneur en silicate) caractérisé par sa faible quantité d'aluminium

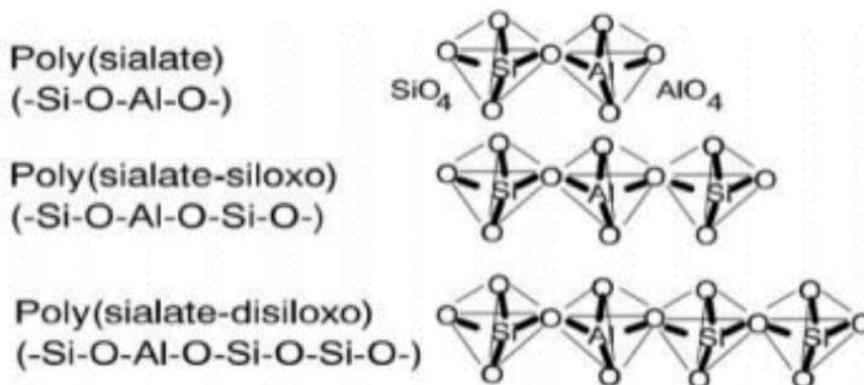


Figure I.2: Nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si/Al

I.2.3 Historique des Géopolymères

Les géopolymères sont des matériaux inorganiques à base d'alumine et de silice, considérés comme une alternative écologique au ciment traditionnel. Leur développement remonte aux dernières décennies du XXe siècle, avec une contribution significative du Dr Joseph Davidovits.

- **Les débuts (1970s).**

Dans les années 1970, le Dr Joseph Davidovits commence à explorer des matériaux alternatifs au ciment traditionnel, motivé par le désir de réduire l'impact environnemental de l'industrie du ciment, l'une des principales sources d'émissions de CO₂.

- **Développement du terme (1980s)**

Au début des années 1980, Davidovits forge le terme "géopolymère" pour décrire ces nouveaux matériaux. Ses recherches se basent sur des réactions entre des matériaux contenant de la silice et de l'alumine avec des dans des conditions spécifiques pour former des matériaux solides aux propriétés similaires à celles de la pierre naturelle.

- **Recherche et développement (1990s)**

Au cours des années 1990, les recherches sur les géopolymères s'intensifient, avec diverses expériences visant à améliorer leurs propriétés et leurs applications possibles dans les domaines de la construction. Les géopolymères sont testés dans des domaines tels que l'enrobage des déchets nucléaires, les matériaux de construction et les outils résistants à la chaleur.

- **Applications industrielles (2000s à aujourd'hui)**

Au cours des deux dernières décennies, les géopolymères ont commencé à se répandre davantage dans les applications industrielles. Ils sont reconnus pour leurs propriétés distinctives telles que leur haute résistance à la chaleur, leur résistance chimique et leur grande résistance mécanique.

Leur utilisation dans la construction est devenue plus courante, remplaçant le ciment traditionnel dans quelques exemples et contribuant à réduire les émissions de carbone. [6]

I.2.4 Mécanisme de la géopolymérisation

Le mécanisme de la géopolymérisation comprend trois étapes : la dissolution des espèces aluminosilicates, la réorganisation des composants et la polycondensation.

Le mécanisme proposé par [7], [8] dans la (Figure I.3) décrit les processus qui se produisent lors de la transformation d'une source aluminosilicate solide en un gel d'aluminosilicate alcalin synthétique. Les auteurs s'accordent pour dire qu'il s'agit d'un mécanisme de dissolution des

composés initiaux utilisés comme précurseurs suivi d'une polycondensation sous forme de gel géopolymère N-A-S-H. L'étape de dissolution commence simultanément avec l'hydrolyse des protons H^+ par les cations monovalents (Na^+ , K^+) de la solution alcaline avec la phase de gélification des aluminosilicates, sur la surface du minéral d'aluminosilicate, puis intervient la rupture des liaisons Si-O-Si et Si-O-Al du minéral pour former des précurseurs réactifs $Si(OH)_4$ et $Al(OH)_4$. Pendant l'étape de la réorganisation (restructuration), les précurseurs aluminosilicates sont mobiles et se conforment de manière thermodynamiquement stable, avant d'être gélifiés.

L'étape de polycondensation se produit lorsque la concentration en précurseurs devient supérieure à la concentration de saturation, la polymérisation des Al^{3+} et Si^{4+} est immédiate.

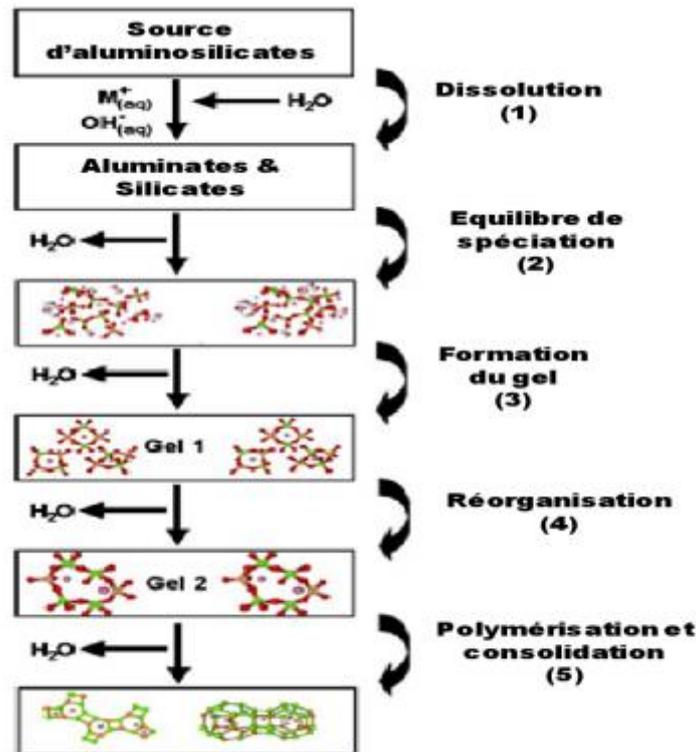


Figure I.3 : Mécanisme de géopolymérisation proposé par [7]

Duxson a étudié l'évolution des propriétés mécaniques et de celles de la microstructure de géopolymères pour des rapports Si/Al compris entre 1,15 et 2,15. Il conclut que l'effet des silicates est indirect, car c'est l'influence du rapport Si/Al (et Al/Na) qui importe. Le module de Young et la résistance à la compression des géopolymères à base de métakaolin peuvent atteindre leur valeur maximale pour un rapport Si/Al = 1,90. A ce stade, les analyses de la

microstructure de ces matériaux montrent des changements significatifs. Par contre pour un rapport $Si/Al \leq 1,40$, les matériaux présentent une importante porosité et sont peu structurés alors que pour un rapport $Si/Al \geq 1,65$, les matériaux sont beaucoup plus homogènes et présentent de très petits pores.

La cinétique de chaque étape dépend de plusieurs facteurs comme le type de minéral d'aluminosilicate, le ratio solide/liquide, les concentrations en silicates et alcalins [8]. Les auteurs ont proposé leur mécanisme (Figure I.4) qui n'est qu'une extension de celui proposé par Duxson mais avec un modèle qui fait apparaître les produits de la réaction en incluant des zéolithes (les zéolithes sont des aluminosilicates issus des cendres volcaniques) dans une phase de gel amorphe tout en montrant la conversion de la phase de gélification en une phase zéolithique cristalline. Selon ce modèle, le métakaolin se dissout complètement en monomères de silicates et d'aluminates pour se recombinaison en oligomères d'aluminosilicates.

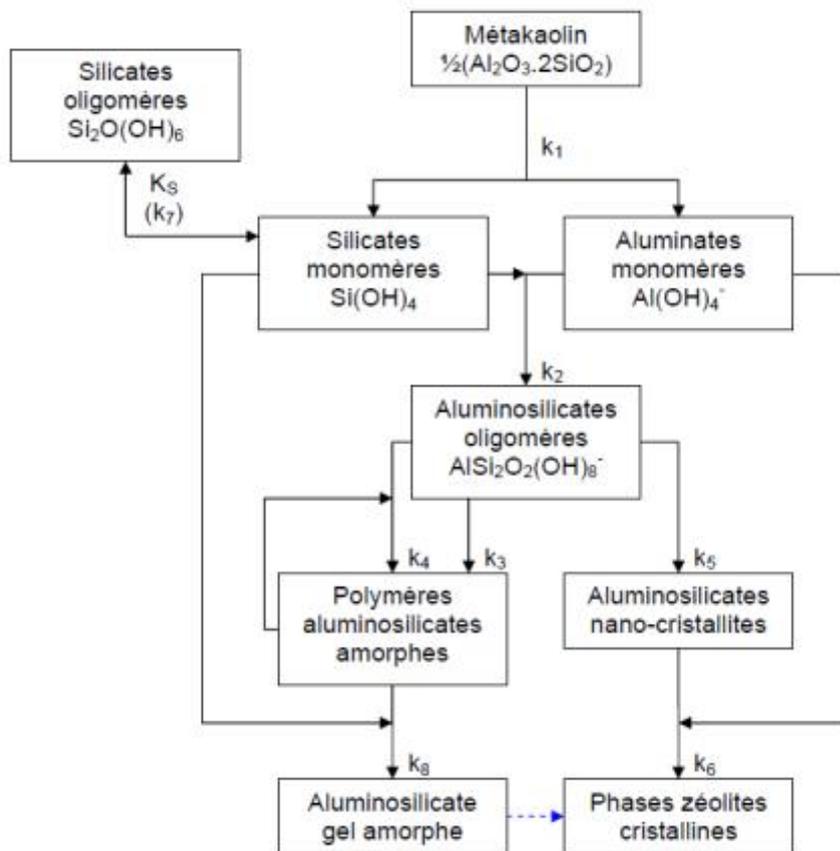


Figure I.4: Modèle de mécanisme de géopolymérisation proposé par [8]

Le changement de microstructure, selon Provis et al [8], résulte d'une spéciation essentiellement monomérique devenant oligomérique dans la solution d'activation alcaline. Ce changement affecte le taux de réorganisation structurale et la densification pendant la géopolymérisation. On observe un gain de résistance à la compression due aux modifications des propriétés par réaction de condensation durant la géopolymérisation, et plus précisément le mécanisme de spéciation de l'aluminium. Durant cette phase, il a été observé, toujours selon [8] que la réaction de condensation entre les aluminates $[Al(OH)_4]$ et les silicates SiO_4 en solution était assez rapide et que ces derniers sont consommés dès qu'ils ont été formés.

Une étude statistique réalisée par [9] sur les paramètres permettant d'obtenir des géopolymères à base de métakaolin montre que la composition molaire des oxydes contenus dans le matériau aluminosilicate joue un rôle très important. Ils ont pu estimer que la composition optimale est obtenue lorsque le rapport Si /Al varie de 3,0 à 3,8 et ils ont montré que la meilleure résistance est obtenue avec un rapport Na_2O/Al_2O_3 proche de 1.

Des auteurs comme [10,11] ont étudié la cinétique de la géopolymérisation. Ils concluent qu'une augmentation du rapport molaire SiO_2 /Al_2O_3 augmente également le temps de prise. Pour des rapports molaires SiO_2 /Al_2O_3 se situant dans l'intervalle 3,4 - 3,8 ($1,7 < Si/Al < 1,9$), ils ont observé un gain de résistance à la compression aux temps plus longs. De plus, des modifications mineures du rapport SiO_2 /Al_2O_3 peuvent altérer fortement les propriétés des géopolymères.

I.3 Différents types de géopolymère

I.3.1 Géopolymère à base de laitier

Matières premières : métakaolin, laitier de haut fourneau, silicate alcalin. Structure géopolymère : Si: Al = 2 ; en fait, Si:Al = 1, Ca-poly(disialate), anorthite + Si:Al = 3, K-poly (sialate-disiloxo), forme orthose et une solution solide de calcium disilicate hydraté (CSH). Les premiers géopolymères développés dans les années 1980 étaient du type (K, Na, Ca)- poly (acide sialique) (ou ciment géopolymère à base de laitier) à la suite des recherches menées par Joseph Davidovits et J.L. Cela a conduit à l'invention du bien connu dans l'industrie sous le nom de ciment Pyrament.

I.3.2 Géopolymère à base des roches volcaniques

Le remplacement d'une certaine quantité de métakaolin par des tufs volcaniques sélectionnés donne des ciments géopolymères avec de meilleures performances et moins d'émissions de CO₂ que les simples ciments géopolymères à base de laitier.

Matières premières : métakaolin MK-750, laitier de haut fourneau, tuf volcanique (calciné ou non), laitier + silicate alcalin (facile à utiliser).

Structure géopolymère : Si: Al = 3 ; en fait, Si:Al = 1, Ca-poly(disialate) (type anorthite) + Si:Al = 3-5, (Na,K)-poly(sialate -multisiloxo) et une solution solide de disilicate de calcium hydraté (CSH). [12]

I.3.3 Ciment géopolymère à base de cendres volantes

Plus tard, en 1997, van Jaarsveld et van Deventer ont développé des géopolymères à base de cendres volantes, en s'appuyant sur des travaux sur les ciments géopolymères à base de laitier d'une part, et sur les zéolithes synthétiques de cendres volantes d'autre part. Actuellement, il existe deux types de ciment de cendres volantes, grade F : Type 1 : Activation alcaline des géopolymères à base de cendres volantes : Généralement, il doit être durci à chaud à 60-80°C et n'est pas fabriqué séparément mais comme partie intégrante du béton lui-même. NaOH + cendres volantes.

Structure : particules de cendres volantes noyées dans un gel d'aluminosilicate, Si: Al = 1 à 2, type zéolithe ;

Type 2 : Ciment géopolymère à base de laitier/cendres volantes : Le ciment durcit à température ambiante. Solution de silicate (inoffensive et sans cruauté) + laitier de haut fourneau + cendres volantes.

Structure : Les particules de cendres volantes sont intégrées dans une matrice géopolymère Si: Al = 2, (Ca,K)-poly(sialate-siloxo).[5]

I.4 Matières premières employées pour l'élaboration des géopolymères

La synthèse d'une matrice géopolymère nécessite deux constituants fondamentaux : la matière première aluminosilicate et la solution d'activation alcaline. Depuis l'invention des matériaux

alcali activés, les recherches sur les précurseurs aluminosilicates ainsi que sur les solutions d'activation sont considérablement développées en particulier durant les deux dernières décennies où plusieurs combinaisons des matières premières et des activateurs alcalins ont été proposées en se basant généralement sur leur disponibilité et sur leur performance.

La figure I.5 illustre les différents matériaux qui peuvent constituer des précurseurs pour la synthèse des géopolymères [12]

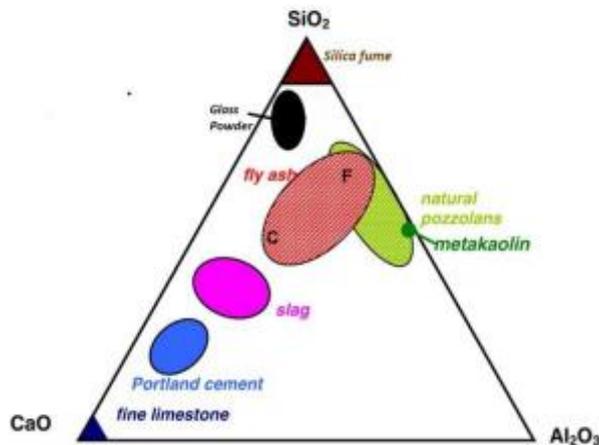


Figure I.5 : Diagramme ternaire CaO-Al₂O₃-SiO₂ des matières premières de géopolymère et d'autres liants traditionnels [12].

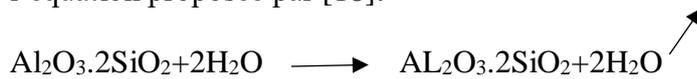
I.5 Types de matières premières alumino-silicates

La kaolinite et la métakaolinite sont les premiers matériaux utilisés comme sources d'alumino-silicate pour la synthèse de géopolymères. Xu et al [13] ont montré qu'il existe un grand nombre de matériaux alumino-silicatés naturels qui peuvent être utilisés pour synthétiser des matériaux géopolymères tels que le pyroxène, la sodalite, le pyroxène, l'andalousite, l'illite et l'anorthite. D'autres matériaux riches en (SiO₂) et (Al₂O₃) peuvent également être utilisés pour formuler des matériaux géopolymères tels que les scories volcaniques, les cendres volantes, les pouzzolanes et les Laitiers [14].

En revanche, les recherches sur les géopolymères à base du métakaolin/Laitier restent marginales en comparaison avec les matériaux formulés avec les cendres volantes. En effet, une analyse statistique sur 125 formulations rapportées dans des travaux récents a révélé que plus de 65% parmi les 125 mélanges sont formulés entièrement à base de cendres volantes, tandis que 10% sont synthétisés avec le métakaolin et 6% avec le laitier [15]

I.5.1 Métakaolin :

Le métakaolin est un matériau pouzzolanique obtenu par la calcination de l'argile kaolinite à des températures comprises entre 500 et 900 °C [16], en fonction de la pureté et l'ordre/désordre de l'argile de départ. Cette température est suffisamment élevée pour éliminer l'eau liée à la structure argileuse, mais pas assez pour conduire à la formation de mullite [17]. Le kaolin peut être extrait directement des gisements naturels, ou obtenu en tant que composant de résidus miniers ou de déchets de l'industrie du papier. De plus, il est disponible partout dans le monde. Le processus de calcination est important pour la production de matières pouzzolaniques hautement réactives. L'eau est extraite de l'argile kaolinite ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) et la structure du matériau s'effondre, ce qui résulte en un aluminosilicate amorphe ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) appelé métakaolin ou métakaolinite. Ce processus, nommé déshydroxylation, peut se traduire par l'équation proposée par [18]:



Les principaux paramètres qui influent de manière significative sur le processus de déshydroxylation sont la température, la durée et la vitesse de chauffage, la vitesse de refroidissement et les conditions ambiantes. La perte de masse résultant de la déshydroxylation de la kaolinite pure (39,5% Al_2O_3 , 46,5% SiO_2 et 14% H_2O) à l'atmosphère ambiante est d'environ 14% [18].

La réactivité du métakaolin dépend de sa finesse, sa pureté et sa cristallinité, caractéristiques pour lesquelles la température de calcination joue un rôle prépondérant. Il est largement accepté que les particules du métakaolin doivent être inférieures à 5 μm , avec une taille de grain d'argile de l'ordre de 20 nm.

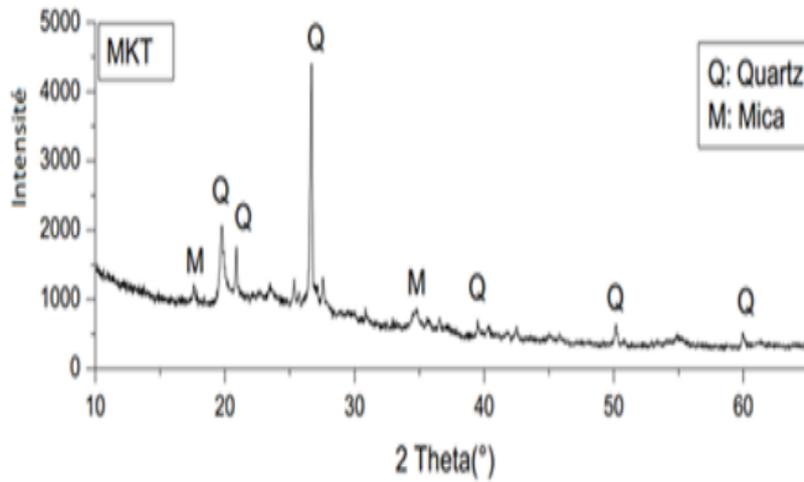


Figure I.6 : Diffractogramme au rayon x de la poudre du métakaolin. [19]

I.5.2 Laitier granulé

Le Laitier est un sous-produit minéral non métallique issu de l'élaboration de la fonte dans un haut fourneau. Il s'agit de la gangue stérile du minerai de fer à laquelle s'ajoutent les cendres du coke. Il est composé principalement de calcium, de silicate et d'alumine, ce qui lui permet d'être largement employé dans la production des matériaux de construction y compris les géopolymères.

La valorisation du Laitier dans le domaine de la construction offre une très bonne solution environnementale et économique, puisque pour chaque tonne de fonte produite, 200 à 400 kg de laitier sont générés. La composition chimique du Laitier est assez uniforme, il contient principalement de la chaux, la silice, et de l'alumine associées à la magnésie, au soufre et à certains oxydes, comme l'oxyde de fer et l'oxyde de manganèse [20].

La réaction de laitier durant la géopolymérisation est dominée par les petites particules. En effet, les particules de taille supérieure à 20 µm ne réagissent que lentement, tandis que les particules de moins de 2 µm réagissent complètement en moins de 24 h.

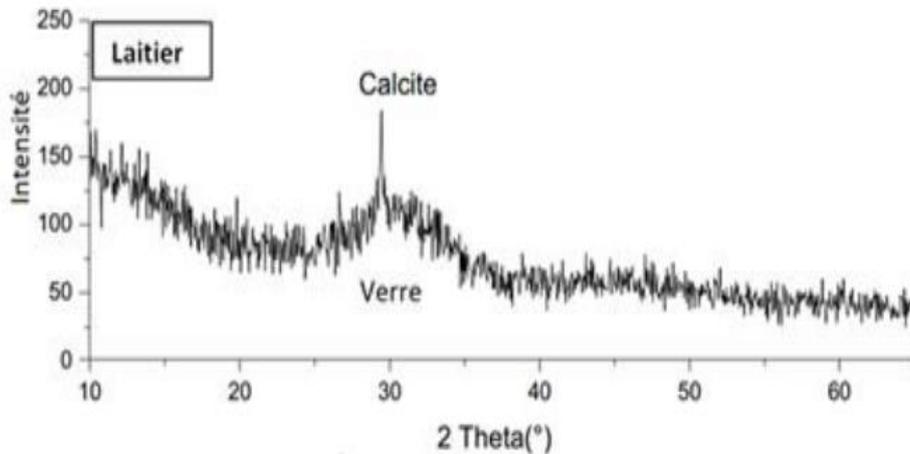


Figure I.7 : Diffractogramme de rayon x de la poudre du laitier granulé [21]

I.5.3 Cendres volantes :

Les industrielles et dans les chaudières de centrales électriques au charbon. Les CV sont constitués d'une phase vitreuse et quelques phases cristallines telles que le quartz (5-13%), la mullite (8-14%) et la magnétite (3-10%) [22].

Leur pourcentage relativement élevé en phases cristallines diminue fortement leur réactivité lorsqu'elles sont employées pour la formulation d'une matrice géopolymère, ce qui nécessite souvent un traitement thermique pour améliorer la géopolymérisation et assurer des propriétés convenables.

Les particules des cendres volantes peuvent être arrondies, irrégulières ou angulaires, mais elles sont généralement sphériques ; quelques particules sont solides mais la plupart d'entre elles sont creuses et peuvent contenir de plus petites particules.

Selon la norme américaine ASTM C618, on distingue deux classes de cendres volantes : Classe C et Classe F. Cette classification se base sur la composition chimique ; Pour la formulation des géopolymères, les C V de classe F sont les plus favorisées grâce à leur pourcentage important en matières aluminosilicates.

La majorité des matériaux géopolymères proposés dans la littérature sont synthétisés avec un seul type de ces trois matières premières [23]; En revanche, peu de travaux ont été menés sur les combinaisons binaires de matières premières telles que laitier/métakaolin [24], ce qui nécessite plus de recherche afin de mieux comprendre le comportement de ces nouveaux matériaux.

1.5.4 Poudre de verre

La poudre de verre peut être considérée comme précurseur. Redden et al [25] ont montré que l'absence d'aluminium dans la poudre de verre forme un gel de silicate de sodium au cours du durcissement, par contre le gel N-A-S-H est formé lorsqu'on remplace 50% de poudre de verre par la cendre volante. La structure du gel de silicate de sodium devient faible dans les conditions de durcissement humide ; ce problème est connu par le problème de lixiviation des alcalis. Ces résultats sont confirmés par [26] qui ont montré que la cure humide a un effet négatif sur la durabilité des géopolymères à base de poudre de verre.

1.6 Solution alcaline

Les activateurs alcalins sont nécessaires pour que la réaction de géopolymérisation se produise. Ils accélèrent la dissolution de la source d'aluminosilicate tout en aidant à la formation d'hydrates et à la création d'une structure plus compacte. Les propriétés physiques et chimiques des activateurs influencent grandement le comportement du matériau activé.

Les solutions alcalines appelées également solutions activatrices utilisées pour la synthèse des géopolymères, sont des mélanges d'hydroxydes alcalins (NaOH ou KOH) avec le silicate de sodium ou de potassium (Na_2SiO_3 , K_2SiO_3).

Des travaux de Davidovits [5] ont montré que la réaction de géopolymérisation est plus rapide lorsque la solution alcaline contient le silicate de sodium ou de potassium comparée à celle contenant l'hydroxyde alcalin seulement. De même l'utilisation d'une solution d'hydroxyde de sodium favorise la géopolymérisation et améliore la résistance à la compression des géopolymères comparée à l'hydroxyde de potassium [5,13].

Parmi tous ces activateurs, l'hydroxyde de sodium et les solutions de silicate de sodium sont les plus souvent utilisés dans la littérature. Les activateurs alcalins de potassium sont rarement utilisés puisqu'elles ne sont pas assez disponibles dans le marché d'une part, et leur prix relativement élevé d'autre part.

1.6.1 Hydroxyde de sodium : Il est obtenu après refroidissement de la soude caustique fondue, à partir de laquelle toute l'eau est évaporée dans des fûts métalliques. Il existe dans le marché sous plusieurs formes solides ou solubles. Le NaOH solide est caractérisé par une densité de 2,13 à 20°C avec une solubilité maximale d'environ 53%. La dilution de NaOH est une réaction exothermique où il convient de prendre des précautions particulières durant la

préparation. Généralement, les solutions d'activation sont préparées 24 heures avant leur utilisation dans la formulation des liants géopolymères pour éviter tous les problèmes liés au dégagement de chaleur.

I.6.2 Silicate de sodium: Le silicate de sodium est obtenu en faisant fondre le sable primaire et le carbonate de sodium à une température comprise entre 1350 et 1450 °C. Le mélange obtenu est ensuite dissous dans un autoclave à une température de 140 à 160 °C sous une pression de vapeur appropriée. La dissolution du silicate de sodium solide est une réaction endothermique influencée par plusieurs paramètres comme le rapport eau sur solide, la température, la taille des particules, les additifs et la présence d'impuretés. Le silicate de sodium est le nom générique d'une série de composés de formule $\text{SiO}_2 \cdot n\text{Na}_2\text{O}$ où « n » représente le rapport molaire.

I.6.3 Carbonate de sodium : Le carbonate de sodium est un sel d'acide carbonique de sodium dont la formule est $2\text{Na}_2\text{CO}_3$. On le trouve sous forme de poudre aux propriétés anhydrides qui contient environ 99% de (Na_2CO_3) . Le Na_2CO_3 peut être dérivé des cendres d'algues ou de plantes ou aussi des gisements de natron. Il peut également être créé en chauffant du carbonate de sodium au-delà de 100°C. Il a une solubilité dans l'eau de 300 g par litre à 20°C et une densité de 2,5 g/cm³. Le carbonate de sodium peut également se présenter sous forme hydraté ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ et $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

La température et la molarité de la solution du carbonate de sodium influent sur la formation des hydrates. L'augmentation de la température augmente la solubilité qui diminue progressivement après une température de 35,4 °C.

Le $2\text{Na}_2\text{CO}_3$ est souvent utilisé pour l'activation alcaline du laitier (mais son activation des cendres volantes est moins efficace. [5]

I.7 Facteurs influant sur les propriétés des géopolymères :

Plusieurs facteurs ont été identifiés comme des paramètres clés qui influencent les propriétés des matériaux géopolymères.

A- Nature et concentration des solutions alcalines :

Les alcalis, les solutions de silicates de sodium ou de potassium ou encore un mélange de ses solutions pour la production de liants géopolymères à base du metakaolin ont fait l'objet d'études [27.28]. Le liquide alcalin (solutions de silicates sodium ou de potassium) contenant

les silicates solubles accroît la vitesse de la réaction, comparé aux solutions alcalines qui contiennent seulement de l'hydroxyde de sodium ou de potassium. Cependant, lorsqu'on augmente la température du milieu de synthèse et la concentration des alcalis (NaOH, KOH), les propriétés mécaniques des géopolymères croissent exponentiellement. Popel, [27] et Wang et al. [28] ont étudié les propriétés des géopolymères en utilisant la solution de NaOH comme activatrice. Ils ont rapporté que les propriétés des géopolymères dépendent de la concentration de la solution de NaOH. Les résistances à la compression, les résistances à la flexion et la densité apparente des géopolymères augmentent avec la molarité de la solution de NaOH de 4 à 14 M. Ces résultats sont attribués à l'augmentation du degré de géopolymérisation dans le milieu réactionnel.

B- Température :

La température est un accélérateur de réaction dans la géopolymérisation. Il a été montré qu'une température de traitement élevée et un temps de gâchage long donnent un matériau géopolymère avec une résistance à la compression élevée. La teneur en eau et la condition de calcination de l'argile kaolinique affectent aussi les propriétés des géopolymères [29].

Rovnanik et al [30] a étudié l'effet de la température sur les propriétés des géopolymères à base de la métakaolinite. Il ressort de ses travaux que l'augmentation de la température de synthèse des géopolymères améliore leurs propriétés mécaniques et augmente la taille et le volume total des pores.

La teneur en eau et les conditions de calcination de l'argile kaolinitique affectent les propriétés des géopolymères. Cependant, un traitement à une température trop élevée fait apparaître des craquelures et a un effet négatif sur les propriétés chimiques et mécaniques du matériau [31].

Une étude similaire réalisée par Muniz-Villareal et al [32] a montré qu'il existe une température optimale de traitement (60 °C) à laquelle les géopolymères présentent de meilleurs propriétés mécaniques et physiques.

C- Effet des rapports Si/Al et SiO₂/Al₂O₃ :

Duxson et al. [33] ont étudié l'effet des rapports Si/Al compris entre 1,15 et 2,15 sur les propriétés mécaniques et la microstructure des géopolymères à base de la métakaolinite. Il obtient une meilleure résistance à la compression pour le rapport Si/Al égale à 1,90 ; les

analyses microstructurales montrent que les matériaux présentent une porosité importante et sont peu structurés pour $Si/Al \leq 1,40$, tandis que pour $Si/Al \geq 1,65$ les matériaux ont des pores de l'ordre du micron et sont plus homogènes. [33]

De Silva et al [34] ont étudié le rôle de la silice et de l'alumine dans la cinétique de la géopolymérisation. Ils ont remarqué que le temps de prise augmente avec le ratio SiO_2/Al_2O_3 [34].

D- Effet des rapports massiques Solide/Liquide du mélange :

La résistance à la compression du géopolymère décroît lorsque le rapport massique Solide/Liquide (S/L) du mélange augmente. Ce rapport est analogue au rapport Eau/Ciment lors de la confection des pâtes, mortiers et bétons à partir de ciments Portland. Les travaux de Yao et al. [35] ont montré que lorsque le rapport S/L est grand, la viscosité de la pâte est faible et lorsque ce rapport est faible, la viscosité de la pâte est élevée et par conséquent, le degré de la réaction de polycondensation augmente. D'autre part, Zuhua et al. [36] ont montré que la vitesse de dissolution du matériau aluminosilicaté est améliorée lorsque le rapport massique S/L est faible.

Kong et al. [37] ont montré que la résistance à la compression des géopolymères à base de metakaolin est optimale lorsque le rapport massique S/L est égal à 0,8 car ce rapport donne une bonne maniabilité de la pâte. La maniabilité de la pâte devient faible lorsque ce rapport est dépassé 0,8 ce qui abaisse les propriétés mécaniques du géopolymère.

E- Influence de la finesse des coproduits industriels sur la géopolymérisation :

Afin d'optimiser les performances des géopolymères et aussi d'améliorer le comportement rhéologique des géopolymères, certains chercheurs ont travaillé à modifier les propriétés des matières premières avant mélange avec des activateurs chimiques.

Madaï and al. [38], ont utilisé une cendre volante de classe F (ratio $SiO_2/Al_2O_3 = 2,26$), qui a été séchée et broyée avec un broyeur à billes à différentes durées (10, 20,30 et 60 min), la préparation des géopolymères a été faite avec l'ajout de l'hydroxyde de soude en respectant le rapport $L/S = 1/2$. Un traitement thermique a été appliqué sur les échantillons âgés de 20 heures à une température de 150°C pendant 4h. Les essais de compression ont été effectués après 7 jours de cure. Les résultats peuvent être vus sur la Figure I.9. Les géopolymères à base de CV

non broyée ont montré une résistance qui est faible (0,4 MPa), et ont observé que le broyage et la durée ont un effet significatif sur les performances mécaniques des géopolymères. Un optimum a été obtenu pour une durée de 30 min (RC = 10.56 MPa) et pour une finesse (Blaine 2500 cm².g-1 / BET= 7,649 m²/g).

I.8 Application des géopolymères

Depuis sa découverte par le Prof. Joseph Davidovits, cette nouvelle génération de matériaux, qu'elle soit utilisée pure ou renforcée avec des charges, trouve déjà des applications dans tous les domaines de l'industrie. Ces applications se trouvent par exemple dans l'industrie de l'automobile, aérospatiale, des fonderies non-ferreuses et la métallurgie, le génie civil, les industries du plastique, la gestion des déchets ultimes, l'art et la décoration, la restauration de bâtiments, la géobiologie appliquée à l'énergétique et la pollution électromagnétique, etc.

Les géopolymères trouvent de nombreuses applications dans divers domaines de l'industrie et de la construction en raison de leurs propriétés uniques. Certaines des utilisations les plus courantes des géopolymères sont énumérés ci-dessous.

- **Architecture et construction** : Les géopolymères peuvent être utilisés pour construire des murs, des sols et des toits. Il a une résistance mécanique supérieure, une durabilité plus longue et une résistance au feu améliorée par rapport aux matériaux de construction traditionnels.
- **Réparer et renforcer les structures** : Les géopolymères sont utilisés pour réparer et renforcer les structures en béton endommagées ou fragilisées. Il peut être appliqué comme revêtement ou injecté dans les fissures et les joints pour restaurer la résistance et l'intégrité structurelle.
- **Infrastructures routières** : Les géopolymères sont utilisés dans la construction et la réparation des routes, des autoroutes et des trottoirs. Ils sont très résistants à l'usure, à la fatigue et aux influences environnementales, prolongeant la durée de vie des infrastructures routières.
- **Revêtements de sol** : Les géopolymères peuvent être utilisés comme revêtement de sol dans les zones industrielles, les entrepôts, les parkings et les zones de circulation.

Comparé aux matériaux de revêtement de sol conventionnels, il présente une résistance chimique élevée, une résistance à l'abrasion et une excellente durabilité.

- **Applications marines** : Les géopolymères sont utilisés dans la construction de structures offshore telles que les jetées, les quais et les plates-formes offshore. La résistance à l'eau salée, à la corrosion et à l'abrasion le rend idéal pour les environnements marins exigeants.

I.9 Applications du géopolymère dans le domaine de la construction

Le béton géopolymère fabriqué à partir de laitier de haut fourneau a été utilisé avec succès par la société russe Tsentrmetallurgremont entre 1986 et 1994 pour construire un certain nombre de bâtiments. Certains de ces bâtiments, comme celui de la figure 27, se composent d'environ 20 étages et présentent des formes assez complexes. Contrairement aux fondations, aux escaliers et aux éléments porteurs, qui ont été préfabriqués, les murs extérieurs ont été coulés in-situ. Le béton a été produit avec un rapport eau/solide de 0,35, sable de quartz et de gravillons de dolomite et de calcaire. Un traitement thermique a été utilisé pour atteindre une résistance en compression de 25 MPa, et aucune réaction alcali-granulat n'a été notée pour ce bâtiment, qui est toujours en service [39].



Figure I.8 : Première structure en béton géopolymère construite en 1994 à Lipetsk, en Russie, [39].

En Australie, un centre de recherche et d'innovation GCI (The Global Change Institute) a été construit à l'Université de Queensland en 2013 avec un béton géopolymère à base de laitier et de cendres volantes (Figure I.9). Les dalles du bâtiment ont été construites à l'aide de planchers préfabriqués [40].



Figure I.9. L'institut GCI (The Global Change Institute) à l'Université du Queensland, Australie, 2013 [40].

Les géopolymères peuvent être utilisés pour restaurer les infrastructures routières [41]. Un producteur de béton de ciment géopolymère basé en Australie a mené les premiers tests sur l'utilisation du matériau dans des applications de chaussée légère. Le béton géopolymère ainsi créé ne présentait aucune indication de fissures ou d'autres défauts.

D'autre part, une équipe de recherche de l'Université de Toulouse (France) a créé des parpaings à base de béton géopolymère en 2015 [42] (figure I.10), qui sont capables de remplacer les parpaings conventionnels à base de ciment Portland.

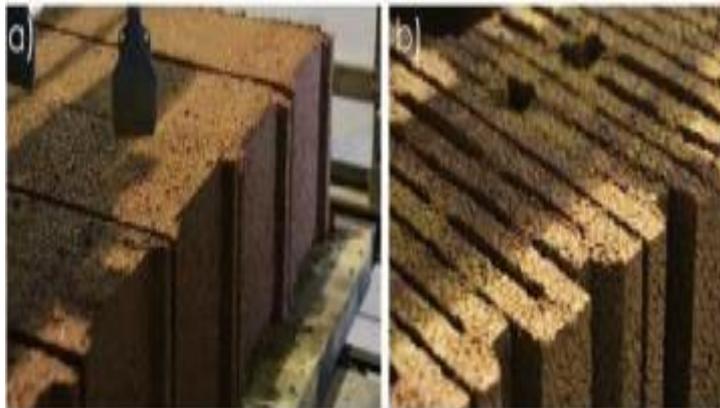


Figure I.10 : Parpaings fabriqués à base d'un béton géopolymère [42].

I.10 Béton géopolymère :

D'un point de vue terminologique, un béton géopolymère est un matériau composite résultant de l'addition du ciment géopolymère à des granulats et de l'eau. Autrement dit, la principale différence entre un béton Portland et un béton géopolymère est le type du liant. D'après les formulations des bétons géopolymères publiées dans la littérature, nous constatons que le sable est toujours utilisé comme granulats fins et la taille maximale des granulats employés est entre 10 et 20 mm [43]. En plus de leurs avantages environnementaux et économiques, les bétons géopolymères possèdent de bonnes propriétés mécaniques et physico-chimiques.

Les SiO_2 et les Al_2O_3 rentrés dans la matière première aluminosilicate réagissent avec le liquide alcalin pour former de la pâte géopolymère qui englobe les gravillons, le sable et les autres particules qui n'ont pas réagi pour former le béton géopolymère. A l'instar des bétons Portland, les granulats occupent entre 75 et 80% de la masse du béton géopolymère [44].

I.11 Les activateurs utilisés lors de formulation des bétons géopolymères :

Afin de formuler un béton géopolymère, la présence d'un système de liquide alcalin est obligatoire pour que la réaction de géopolymérisation se produise des hydrates stables à faible solubilité et la formation d'une structure compacte avec ces hydrates. La solution d'activateur est constituée généralement par deux substances essentielles, à savoir le silicate de sodium/potassium avec l'hydroxyde de sodium

Le système liquide d'alcalin utilisé dans la formulation du mortier géopolymère est une solution d'activateur alcalin tels que Na_2CO_3 , NaOH , Na_2SO_4 et $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SnS}_{12}$. Ces activateurs alcalins peuvent être appliqués à l'état solide ou liquide. Cependant, le rapport liant-alcali joue un rôle important dans le renforcement de la résistance du béton géopolymère à température ambiante et au four [45]. La solution alcaline joue un rôle essentiel dans la géopolymérisation, un mélange d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH) et de silicate de sodium (Na_2SiO_3) ou de silicate de potassium (K_2SiO_3) est la solution alcaline la plus couramment utilisée dans géopolymérisation. Contrairement à d'autres hydroxydes alcalins, la solution de NaOH est l'activateur d'hydroxyde le plus populaire pour la géopolymérisation car c'est le moins cher et le plus facilement disponible.

I.12 Avantages et inconvénients des géopolymère

Les géopolymères ont une large gamme d'applications en raison de leurs propriétés de résistance au feu, aux hautes températures et aux acides. L'intérêt croissant des chercheurs pour la science des géopolymères, en particulier le ciment géopolymère, va dans le sens de nombreux : « ciment vert ». Ces ciments présentent des avantages environnementaux et énergétiques. D'un point de vue environnemental, les ciments dits géopolymères sont une bonne solution aux problèmes liés aux émissions de gaz à effet de serre. En effet, une réduction significative des émissions de CO₂ de 40% à 80% peut être obtenue lors de la fabrication du ciment géopolymère par rapport au ciment Portland qui produit environ une tonne de CO₂ par une tonne de ciment fabriqué. De plus, la quantité d'énergie consommée dans la production de ciment Portland est d'environ 4700MJ/tonne, bien plus important que ce qui est nécessaire pour produire du ciment géopolymères. Cette dernière nécessite une énergie moyenne d'environ 2715 MJ/tonne et principalement utilisée pour la calcination d'aluminosilicates naturels (kaolinite, halloysite). Lorsque du laitier de haut fourneau est utilisé, cette énergie peut être réduite à 1965 MJ/t . Un ciment géopolymère plus écologique et économe en énergie semble être un bon choix à Ciment Portland. Cependant, l'application des géopolymères dans le domaine du génie civil est encore très limitée, car certains inconvénients peuvent être divisés en deux catégories : L'un des principaux inconvénients des matériaux à base de géopolymères est la complexité de création d'une formulation pouvant répondre à toutes les exigences. Un deuxième inconvénient technique du béton géopolymère est le retrait. Cette dernière est généralement supérieure à la valeur record du béton Portland, notamment lorsque le laitier de haut fourneau est utilisé seul en tant que matière première aluminosilicate.

I.13 Intérêt des géopolymère dans le génie civil

Depuis toujours les différentes recherches, tentent de limiter l'utilisation du ciment en le substituant par des minerais (argiles, fillers calcaire et déchets industriels) donnant des liants de qualités. Cependant les géopolymères se sont révélés d'un grand intérêt pour les propriétés essentielles suivantes :

a. Ecologique

Des études ont confirmé que l'utilisation de ciment à un faible pourcentage contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre, car ces études ont indiqué que la poussière émise par les

usines cause de grands dommages environnementaux aux terres, aux cultures, aux plantes et aux mers. Dans le cas du ciment géopolymères, il sera possible d'utiliser ces minéraux à leur état naturel. Aujourd'hui le ciment géopolymères peut être une véritable alternative au ciment traditionnel d'un point de vue technologique, économique et surtout environnemental.

b. Durabilité

- **Résistance aux attaques acides** : comparé au liant cimentaire, les géopolymères sont plus résistants quand ils sont exposés dans un environnement acide [46].
- **Résistance à la compression** : il a été montré que les bétons géopolymères développent des résistances similaires à celles développées par les bétons ordinaires [47].
- **Alcali-réaction des granulats** : Les alcalins présents dans le ciment peuvent réagir avec la silice se trouvant dans les granulats causant ainsi le phénomène d'alcali-réaction et par conséquent conduit à l'expansion qui peut endommager la structure des bétons, certaines additions pouzzolanique sont utilisées en substitution partielle du ciment pour réduire l'alcalinité et de réagir avec la chaux libérée. Bien que ce phénomène puisse être observé dans les bétons géopolymères mais son importance est insignifiante, vu que les alcalins réagissent avec la source aluminosilicate.
- **Résistance au feu** : le béton géopolymère peut support et une température maximale de 1200°C. Contrairement au ciment ordinaire, il est très résistant aux chocs thermiques.

CONCLUSION

Cette recherche bibliographique nous a permis de mettre en évidence l'intérêt des études sur les géopolymères, le domaine d'utilisation de ce genre de matériaux et surtout dans le domaine de génie civil.

CHAPITRE II

LES MATERIAUX GEOPOLYMERES COMPOSITES

II.1 Introduction

Les matériaux géopolymères composites représentent une classe de matériaux prometteuse avec un potentiel important pour des applications durables et performantes dans de nombreux secteurs. Ils offrent une alternative intéressante aux matériaux conventionnels en combinant les avantages des liants géopolymères avec l'amélioration des propriétés apportée par divers types de renforts.

II.2 Définition et historique de composite

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux différents, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs.

On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites": Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Ils sont constitués d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue est appelée matrice et la phase discontinue, qui présente usuellement des propriétés mécaniques (rigidités et résistances) supérieures à celle de la matrice, est nommée renfort (Figure II.1).

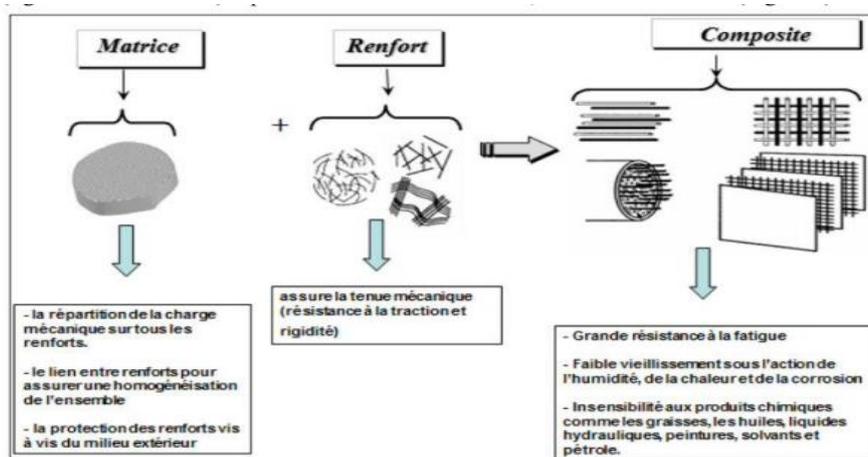


Figure II.1: Composition d'un matériau composite

La matrice est elle-même composée d'une résine, charges et des additifs dont les charges et les additifs ont pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physique du produit fini ou de faciliter la mise en œuvre.

Le premier matériau composite naturel utilisé par l'humanité fut le bois (fibre de cellulose). Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme, nous citons les arcs sinomongols (2000 ans avant Jésus-Christ), dans les années 1500 avant Jésus-Christ, les premiers Égyptiens utilisaient le torchis (mélange d'argile et de paille) pour construire des bâtiments rigides et durables, les sabres japonais traditionnels à partir de VII^{ème} siècle (assemblage de fines lames métalliques). En 1823, Charles Macintosh crée l'imperméable en recouvrant du tissu (coton) avec du caoutchouc et en 1829. En 2009 on a l'avion Boeing787, qui contient 50% de composite.



Figure II.2: Mur en torchis



Figure II.3: Arc sino-mongol

Les propriétés des matériaux composites résultent de :

- Les propriétés des matériaux constituants.
- Leurs distributions géométriques.
- Leurs interactions.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- ✓ La nature des constituants et leurs propriétés.

- ✓ La géométrie du renfort, et sa distribution.
- ✓ La nature de l'interface : matrice-renfort.
- ✓ La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels à savoir :

- Légèreté
- Grande résistance à la fatigue
- Liberté de formes
- Maintenance réduite
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu carbone)
- Insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une bonne isolation électrique [48]

II.3 Classement d'un matériau composite

II.3.1 Matrice

La matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation ils ont essentiellement pour rôle de transférer les contraintes apportées sur le matériau aux fibres, de les protéger contre les agressions extérieures et donnent la forme du matériau.

II.3.2 Renfort

Le renfort est tout simplement le squelette ou l'armature du composite, il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture dureté, etc. Il

permet aussi d'améliorer certaines des propriétés physique, comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques.

Un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).[49]

a. Renfort en fibres discontinues :

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

b. Renfort continu :

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la Longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multiplié par 100 dans Le cas des fibres de verre.

Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts :

- Unidirectionnelle (nappes ou rowing), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D),
- Tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).[50]

II.4 Critères de choix d'un bon couple fibre-matrice

II.4.1 Critères mécaniques

Les critères de choix, spécifiques à chaque élément, sont directs, liés à la composition (résistance à la rupture aux températures d'utilisation, module d'Young et coefficient de dilatation) ou indirects, liés au processus (diamètre des fibres, taux et géométrie de la

localisation des fibres, porosité). A cela s'ajoute le caractère de l'interface fibre-matrice (seuil de décollement, contrainte de frottement, stabilité) qui définit le travail de rupture et son caractère dissipatif, [51].

La matrice ayant une résistance mécanique 3 à 10 fois plus faible que les fibres, l'optimisation impose de choisir une matrice ayant un coefficient de dilatation thermique 20 à 30 % inférieur à celui des fibres afin que l'effort soit toujours supporté par les fibres. C'est pourquoi après les premiers essais faits en utilisant du pyrex comme matrice, le choix se porta sur des verres et vitraux-céramiques à base d'aluminosilicate de lithium (les LAS, des compositions du diagramme $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, souvent contenant une seconde phase amorphe (vitrocéramiques)) dont les bas coefficients de dilatation, la bonne réfractarité et les conditions de mise en œuvre, connues, "rassuraient" les concepteurs du fait d'autres utilisations: plus le coefficient de dilatation est faible par rapport à celui des fibres ($\sim 30 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), plus grand sera l'intervalle de température où la matrice restera comprimée par les fibres, ce qui évite la formation de fissures et donc permettra de maintenir l'intégrité des hautes propriétés mécaniques du composite : la résistance pouvait atteindre les valeurs maximales prévisibles, à savoir le produit du volume de fibres dans la direction d'application de l'effort x la résistance en traction des fibres. En outre il était possible de provoquer la cristallisation du verre initial [52], et d'améliorer ainsi la résistance mécanique de ces LAS ($\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$).

II.4.2 Critères chimiques

Ces critères concernent la mise en œuvre (possibilité d'amener la matière de la façon la plus efficace possible entre les fibres) et le contrôle de la réaction fibre matrice qui ne doit pas conduire à la formation d'un collage fibre matrice.

Il faut ensuite que la matrice conserve durablement cette qualité dans toute la gamme de température de travail et pour toute la vie de la pièce. Disponible sous forme de précurseur amorphe (poudre de verre), les compositions de type LAS présentaient l'avantage de pouvoir être « injectées » à l'état fondu à une température compatible avec l'usage de moules en graphite. En outre les poudres fines étaient stables, prenaient peu l'humidité et pouvaient être manipulées sans problème de toxicité et injectées à faible viscosité avec un rendement volumique de 'densification' proche de 1. Par chance pouvons-nous dire, nous verrons que la réaction entre les matrices LAS et la première génération de fibres SiC, plus particulièrement la NLM Nicalon lithium matrice (Nippon Carbone, Japon), riche en carbone et en oxygène, du

fait d'une réaction avec les ions alcalins de la matrice LAS pour donner une interface de carbone parfaitement glissante.

II.4.3 Critères économiques

Nous n'aborderons pas les critères économiques, mais rappelons que les fibres, en particulier certains grades nécessitant, soit des recuits particuliers, soit des dépôts CVD, sont très onéreuses, plusieurs fois le prix d'une fibre céramique « standard ». Les nécessités de manipuler les poudres ou précurseurs en milieu contrôlé (exempt d'eau, exempt d'oxygène, etc.) ou les problèmes de toxicité, d'inflammabilité sont à considérer attentivement. [53]

II.5 Les fibres naturelles

II.5.1 Définition

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et l'argile étaient mélangées pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant dans le monde universitaire que dans diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées comme renfort ou comme charges. [54]

II.5.2 Les applications des fibres naturelles

En raison de leurs propriétés physique uniques ; les fibres naturelles sont employées dans une large gamme d'application. Voici quelques exemples d'applications courantes de ces fibres :

- 1. Textiles :** les fibres naturelles, comme coton, le lin et le chanvre, sont couramment utilisées dans la fabrication de vêtements, de tissus d'ameublement et de linge de maison. Le coton est apprécié pour sa douceur et son confort, tandis que le lin distingue par sa légèreté et sa résistance
- 2. Industrie automobile :** les fibres de jute, de chanvre et de lin sont utilisées dans les composites pour fabriquer des pièces automobiles légère, comme des panneaux de porte et des éléments de tableau de bord, offrant ainsi une alternative durable aux plastiques traditionnels.

3. **Isolation thermique et acoustique** : la laine est fréquemment employée pour l'isolation thermique et acoustique des bâtiments en raison de ses excellentes capacités d'isolation. De plus, les fibres de coton et de chanvre peuvent être utilisées dans des produits écologiques pour offrir une solution d'isolation naturelle.
4. **Médical** : les fibres sont utilisées dans la fabrication de pansements, sutures et vêtements médicaux en raison de leurs propriétés d'absorption, de biocompatibilité et de résistance, offrant ainsi des solutions écologiques et sûres pour les soins de santé.[55]

II.5.3 Classification des fibres naturelles

Les fibres naturelles peuvent être classées en trois groupes selon leur origine (animale, végétale, minérale), comme illustré dans la figure II.4.

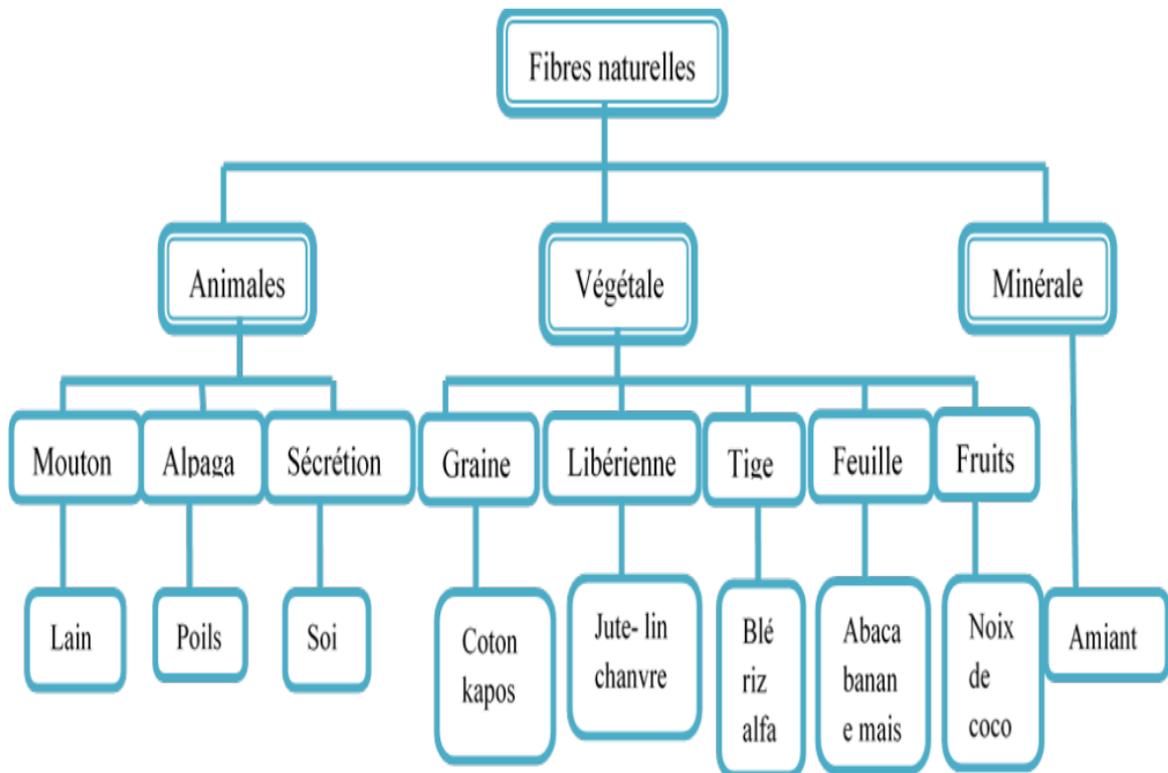


Figure II.4 : Les types de fibres naturelles [56].

1) Fibres Animales

Les fibres animales, telles que la soie, la laine, les cheveux, les plumes, etc., sont la deuxième source la plus importante de fibres naturelles après les fibres végétales, utilisées pour le renforcement des composites. La fibre la plus essentielle et largement utilisée est la fibre de laine, appréciée pour ses excellentes propriétés en tant qu'isolant thermique, son pouvoir

d'absorption élevé (16-18 %) et son importante élasticité (45 %) [56]. Les fibres d'origine animale sont classées en fonction de leur provenance, et on distingue principalement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau,
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée.

Ces fibres sont produites avec des faibles quantités et leurs prix sont relativement chers [57].

- **La laine :**

Est un matériau d'origine animale constituée de fibres kératiniques provenant d'ovins. Les moutons furent un des premiers animaux à être domestiqués et les premières étoffes étaient probablement en laine. La laine est l'une des principales fibres utilisées au monde ; la structure de ses protéines lui confère des qualités uniques

- une résilience et une élasticité exceptionnelles
- avec lesquelles les fibres synthétiques ne peuvent rivaliser. Il existe plusieurs variétés, depuis la laine mérinos (frisée) superfine qui ressemble au cachemire jusqu'à la laine grossière (cheviot). Sa valeur et son utilisation dépendent du diamètre de la fibre ; plus de 37% de la production est constituée de laine fine, 22% de laine moyenne et 41% de laine grossière.

Il existe quatre sortes de qualités de laine :

- a. la laine de tonte : provenant d'animaux vivants et sains
- b. la laine d'agneau : provenant de la première tonte (poils fins et peu résistants)
- c. la laine de délainage : provenant d'animaux abattus, de qualité moyenne
- d. La laine renaissance : issue de la récupération de restes de laine et de vieux vêtements.

Légalement, on désigne par « laine » les fibres du mouton ainsi que les fibres d'autres animaux dont la toison est aussi composée de fibres kératiniques. Mais dans ce dernier cas on appelle toujours ces textiles par leur nom.

Par exemple, la chèvre angora donne la « laine mohair » ; les fibres de toison du lapin albinos ou lapin angora sont désignées par « Angora » ; la chèvre dite cachemire donne le « cachemire ».



Figure II.5 : Les sortes de la laine

Les poils proviennent de divers animaux de la famille des camélidés (comme le chameau, le lama, l'alpaga, le guanaco, la vigogne), du yack, de la chèvre,... Le guanaco est protégé. Il ne peut donc pas être tondu, mais on peut récolter ses poils lorsqu'il mue.



Figure II.6 : Les sortes du poil

- **Le poil de chameau**

Il existe deux qualités de poil de chameau : le poil de dessus, plutôt grossier, et le duvet du dessous qui est très fin. Ce dernier est peigné, tondu ou arraché pendant la saison de la mue et mélangé à des laines fines pour confectionner manteaux, pardessus et vêtements de sport. Ce sont les chameaux de Bactriane de la Mongolie intérieure et de la Mongolie qui donnent les fibres de meilleure qualité ; le duvet des chamelons est d'une finesse et d'une douceur extrêmes. La couleur la plus courante est brun rouge, avec des variantes allant du brun au gris. La toison blanche est la plus prisée, mais elle est très rare.

- **La fibre d'alpaga**

L'alpaga est un animal domestiqué appartenant à la famille des camélidés d'Amérique du Sud. Le cheptel comprend 3 millions de têtes environ, que l'on trouve essentiellement dans les Andes et dans des élevages en Amérique du Nord, en Europe et en Australie. L'alpaga constitue l'une des sources les plus variées de fibres animales, il existe deux types de poils et une gamme variée de couleurs naturelles. Les alpagas huacayos donnent une fibre courte, douce et abondante, tandis que celle des suris est soyeuse, éclatante et raide. Ces fibres servent à fabriquer des tissus de luxe de haute qualité. La production mondiale est estimée à environ 5 000 tonnes par an.

- **Le cachemire**

La laine de cachemire, qui provient du poil très fin de la chèvre du Cachemire *Capra hircus laniger*, est très douce au toucher ; bien que d'une grande légèreté, elle tient très chaud. Comme elle est rare, elle est considérée comme une fibre de luxe. Jusqu'à une période récente, la plupart des vêtements en cachemire étaient fabriqués en Europe, aux États-Unis et au Japon, mais de nos jours c'est la Chine qui est de loin le plus gros producteur de cachemire brut, de cachemire fin et de vêtements en cachemire. La production mondiale de fibre de cachemire brute est estimée à 15 000 tonnes par an.

- **Le mohair**

Le mohair est issu du poil de la chèvre angora, autochtone de la Turquie. Cette fibre blanche, très fine et soyeuse, est très prisée pour sa douceur, son soyeux et sa compatibilité avec les teintures. Elle est source de chaleur en hiver mais aussi de fraîcheur lorsque les étés sont humides. Elle sert à fabriquer des lainages, des étoles, des écharpes ainsi que des tapisseries résistantes. Les couvertures faites d'un mélange de laine et de mohair sont d'excellente qualité. La production mondiale annuelle atteint à peine 20 000 tonnes ; c'est l'Afrique du Sud qui produit les fibres de meilleure qualité.

- **L'angora**

La laine blanche et soyeuse des lapins angora, prisée pour sa finesse et sa souplesse, est mélangée à d'autres fibres naturelles pour fabriquer des lainages et des tissés de grande qualité. L'élevage de lapins est pratiqué sur de grandes exploitations ou bien à faible échelle par de petits producteurs. Tous les trois mois, on récupère la toison des lapins par tonte, peignage ou

épilation. Il étouffe si on ne le fait pas. La Chine est le premier producteur mondial d'angora (90 pour cent de la production mondiale), suivie de loin par l'Argentine, le Chili, la République tchèque, la France et la Hongrie [58].

2) Fibres minérales

Les fibres minérales sont des fibres naturelles ou légèrement modifiées obtenues à partir de minéraux. L'amiante est la seule fibre minérale naturelle qui a suscité l'intérêt de l'industrie en raison de sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques, ainsi que de son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans des applications telles que les patins de freins, les garnitures de chaudières ou de fours électriques, ainsi que dans diverses installations électriques comme les plaques chauffantes. Cependant, en raison des risques cancérogènes qu'elle présente, son utilisation a été progressivement interdite [59].

- Fibres d'amiante

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait, des bûchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux microorganismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur [60].

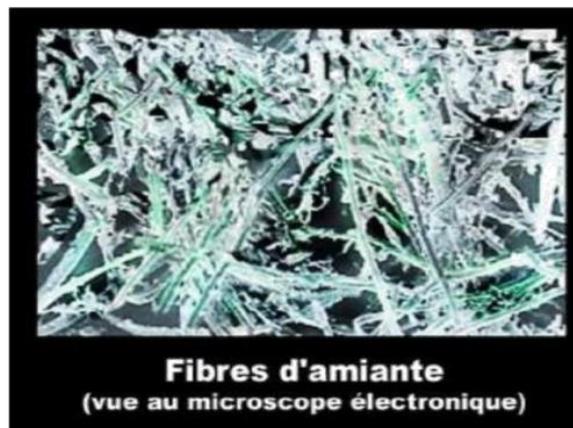


Figure II.7: Vue microscopique de fibres d'amiante [60]

- **Fibres de verre :**

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate. Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice ;
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...) ;
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ;
- Conductivité thermique relativement faible [60].



Figure II.8 : Fibre de verre [60].

3) Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des matériaux filamenteux dérivés de la biomasse, pouvant être extraites des fruits, des tiges (lin, chanvre, jute, ramie) ou des feuilles de plantes cultivées (sisal, abace, paille de graminée), de troncs (chanvre de Manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco), fibres extraites de poils séminaux des graines (coton, kopok), et d'arbustes et d'herbes. Elles peuvent être filées pour produire des fils et des cordes [61].

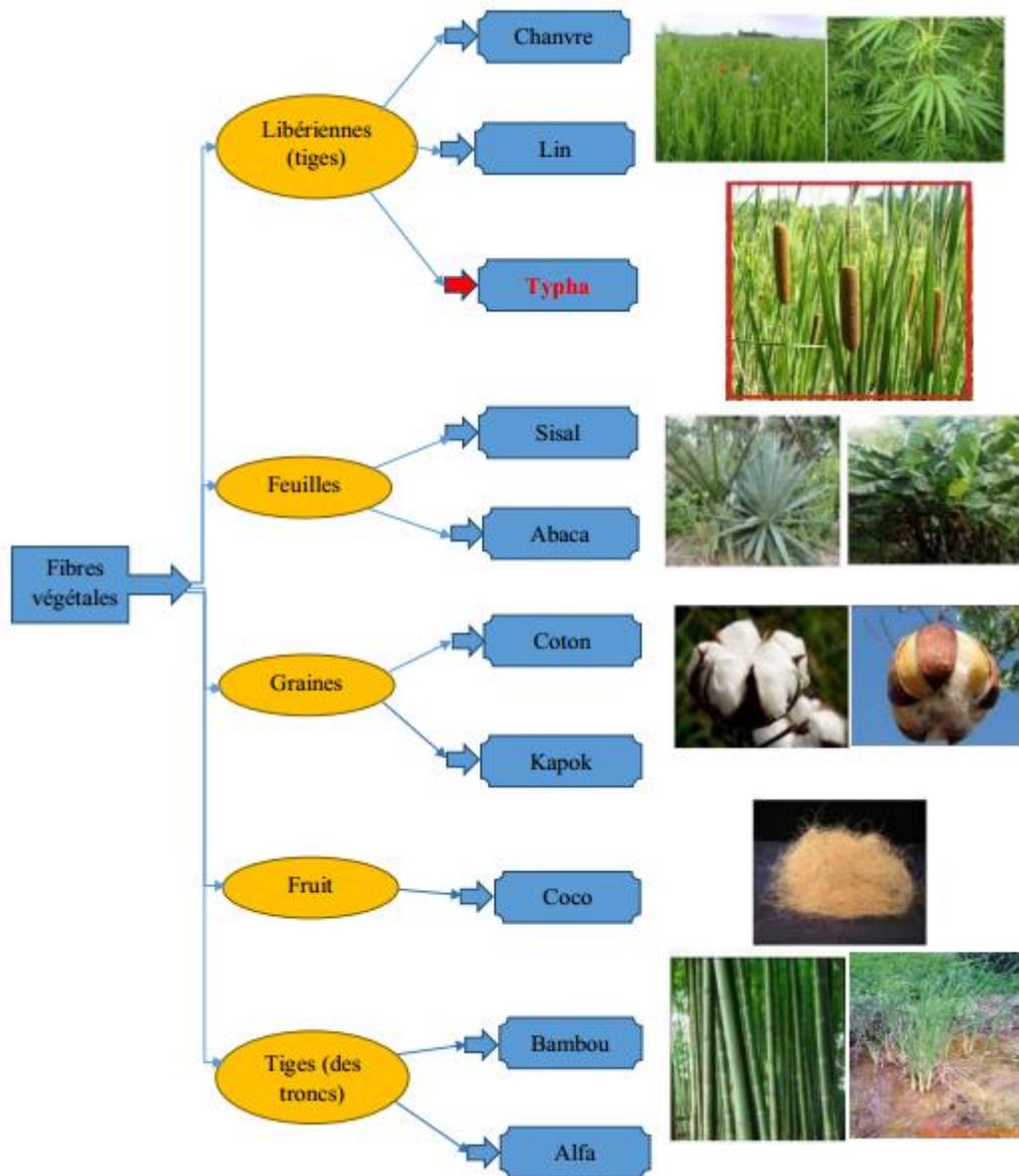


Figure II.9: Classification des fibres végétales.

Présentation de quelques plantes à fibres

- Le chanvre

Le chanvre est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3m. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie. La fibre ultime est moins régulière, plus aplatie et légèrement plus lignifiées que celle du lin [62]



Figure II.10 : Chanvre

- **Lin**

Appartient aux fibres libériennes. Il est cultivé dans des régions tempérées et est l'une des plus anciennes cultures de fibres au monde. Le lin textile libéral est le plus utilisé dans les marchés textiles à plus forte valeur ajoutée. De nos jours, il est largement utilisé dans la zone composite.

Les propriétés mécaniques de la traction des fibres de lin sont estimées en fonction de leur diamètre et leur emplacement dans les tiges [63]. La grande diffusion de ces propriétés est attribuée à la variation de la taille de la fibre sur son axe longitudinal. Les valeurs plus élevées des propriétés mécaniques des fibres issues du milieu des tiges sont associées à la composition chimique de leurs parois cellulaires.

Les propriétés mécaniques des composites unidirectionnels de la fibre de lin / matrice époxy sont étudiées en fonction de leur teneur en fibres. Les propriétés des composites sont inférieures à celles attendues des caractéristiques de fibre unique.



Figure II.11 : Image de lin

- **Jute**

Le jute est produit à partir de plantes du genre *Corchorus*, qui comprend environ 100 espèces. C'est l'une des fibres naturelles les moins chères et est actuellement la fibre libérienne avec le volume de production le plus élevé. Le Bangladesh, l'Inde et la Chine fournissent la meilleure condition pour la croissance du jute.

Il vient en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et d'utilisation. Le jute est très polyvalent. La plante mesure 3 à 4 mètres de haut (Figure II.12). Elle est essentiellement composée de 65,2 % de cellulose végétale, de 12,5 % de lignine, 0,8% de cire, et autre qui sont respectivement les principaux composants de la fibre végétale et de la fibre de bois.



Figure II.12 : La fibre de jute [64].

- **Kenaf**

Le kenaf est une plante annuelle, a une croissance très rapide, pouvant atteindre des hauteurs de 5m en quelques mois. Elle présente des propriétés similaires au jute et est souvent utilisée en mélange avec ce dernier.



Figure II.13: La fibre de kenaf

- **Le sisal**

Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivée en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ses fibres est de 3mm. [65].



Figure II.14: Sisal et la fibre de sisal.

- **Fibre d'Alfa**

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1 m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence. Par ailleurs, c'est l'une des espèces xérophiles qui caractérise le mieux les milieux arides méditerranéens à l'exclusion des secteurs désertiques. Sa terre d'élection est l'Afrique du Nord, et tout particulièrement les hauts plateaux du Maroc et de l'Algérie. Mais cette espèce est présente aussi en Espagne, au Portugal, aux Baléares, et elle s'étend vers l'est jusqu'en Égypte en passant par la Tunisie et la Libye. Au sud et à l'est, la limite naturelle de l'Alfa est déterminée par la sécheresse en bordure du Sahara. En revanche, au nord et à l'ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui l'élimine de la flore, elle est beaucoup plus rare dans les étages subhumide et surtout humide [66].



Figure II.15: Illustrations de la plante d'Alfa à l'état brut

- **Fibre de Diss**

Le Diss (*Ampélodesmos Mauritanicus*, famille des poacées) est une herbe très répandue dans l'Afrique du Nord et les régions sèches de la Grèce à l'Espagne. Cette herbe est utilisée dans la réalisation des habitations anciennes de ces régions en raison de ses qualités mécaniques et hydriques [67].



Figure. II.16 : Herbe de Diss.



Figure.II.17: Tige de Diss.

- **Les fibres de palmier dattier**

Parmi les fibres végétales les plus cultivées, on peut citer les fibres de palmier dattier. Dans le sud de notre pays, il y'a plus de 800 variétés de palmier dans les oasis d'après des statistiques universitaires [68].



Figure II. 18: Torche de palmier

Les types les plus connus sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers (appellation locale). On peut avoir plusieurs types de fibre dans le palmier : de bois, de feuille, de tige, de surface... d'après la bibliographie, on peut résumer (Tableau II.3) les propriétés physiques principales des fibres de surface de palmier dattier Ainsi parmi les caractéristiques des fibres de surface de palmier dattier, on peut citer d'après les chercheurs [68] :

- Un pouvoir d'absorption assez élevé (123.5% en moyenne),
- Les fibres sont poreuses avec une surface alvéole,

Le pourcentage de cellulose (le responsable de la résistance) est relativement faible par rapport aux fibres de Sisal.

Tableau II.1 : Principales propriétés physiques des FSPD (Dokar, Elghers, DNour et D-Bida) [68]

Propriété	Minimum -Maximum	Moyenne
Diamètre (mm)	0.10-1.00	0.45-54.43
Densité Absolue (kg/m³)	1300-1450	1383.33-5.52
Densité apparente (kg/m³)	512.21-1088.81	900-17.64
Teneur en eau naturelle (%)	9.50-10.00	10-5.00

- **Le coco**

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et anti bactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique



Figure II.19: plante de coco

II.6 Le rôle des fibres dans le béton :

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer le béton et améliorer le comportement du béton essentiellement en traction, et en s'opposant à la propagation des microfissures. Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives (les ouvrages minces).

Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- ❖ la cohésion du béton frais.
- ❖ la déformabilité avant rupture.
- ❖ la résistance à la traction.
- ❖ la ductilité et la résistance contre les fissures.
- ❖ la résistance aux chocs.
- ❖ la résistance à la fatigue.
- ❖ la résistance à l'usure.

- ❖ la résistance mécanique du béton aux jeunes âges.
- ❖ la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures ;
- ❖ la tenue au feu ;
- ❖ La résistance à l'abrasion [69].

II.7 Utilisation des Fibres dans la Construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. A titre d'exemple le tableau suivant résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires.

L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et les dallages de parking ainsi que dans le renforcement du plâtre.

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés.

Tableau II.2 : Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile, Mince, enduit
Acier	Elément de toitures en béton cellulaire, linteau, revêtement de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restauration bâtiments.
Polypropylène nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, élément flottant de débarquement et amarres pour les marinas, réparation des routes, tuyau sous-marin, travaux de restauration bâtiments.

Carbone	Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, plancher d'échafaudage.
Amiante	Voiles, tuyau, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égouts plaques de toitures plates et ondulées, revêtement des murs.
Particules de mica	Panneaux, tuyaux, travaux de restauration.
Végétale Dalles, tuiles	Végétale Dalles, tuiles

II.8 Composition chimique des fibres végétales

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale. Comme nous l'avons vu précédemment, les composées les plus majoritaire sont la cellulose, l'hémicellulose les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe.

1. La cellulose

La cellulose est une molécule glucidique qui représente la molécule biologique principale de la masse végétale. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréorégulière composée de maillons de glucose. La formule brute exacte est (C₆H₁₀O₅).

Les fibres de cellulose sont constituées de D-anhydroglucopyranoses liés par des liaisons β-(1,4)-glycosidiques en position C₁ et C₄ (Figure II.20). Le degré de polymérisation (DP) est d'environ 10000, il varie selon l'espèce végétale. Chaque unité de répétition comporte trois groupes hydroxyles. Ces groupes hydroxyles e leur capacité à réaliser des liaisons hydrogène jouent un rôle majeur pour la cristallinité [70].

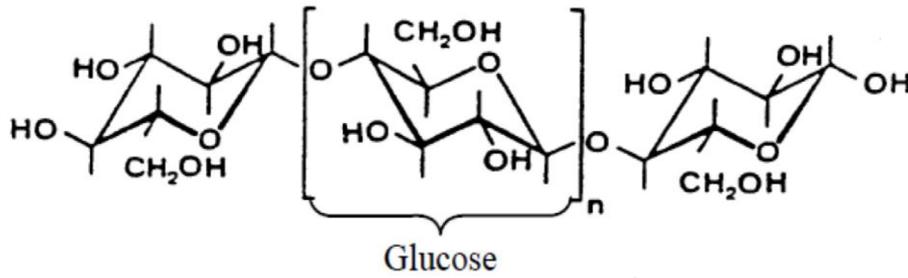


Figure II.20 : Molécule de la cellulose.

La cellulose n'est pas hydrosoluble mais est fortement hydrophile, propriété qui est à l'origine, pour les fibres exploitées, de leur grand confort en tant que fibres textiles. Dans les conditions normales d'utilisation, elle peut contenir jusqu'à 70% d'eau plus ou moins liée. Le remplacement d'une partie des interactions inter-chaînes par des liaisons hydrogènes entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques mécaniques. Alors que la contrainte à la rupture des fibres de cellulose très cristalline peut atteindre 700 MPa à sec, elle peut perdre jusqu'à 30% de sa valeur en atmosphère humide [71].

2. L' hémicellulose

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides. L'hémicellulose n'est pas une forme de cellulose. Elle comprend un groupe de polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones (un exemple est représenté en Figure 9). L'hémicellulose forme la matrice de support des microfibrilles de cellulose [72].

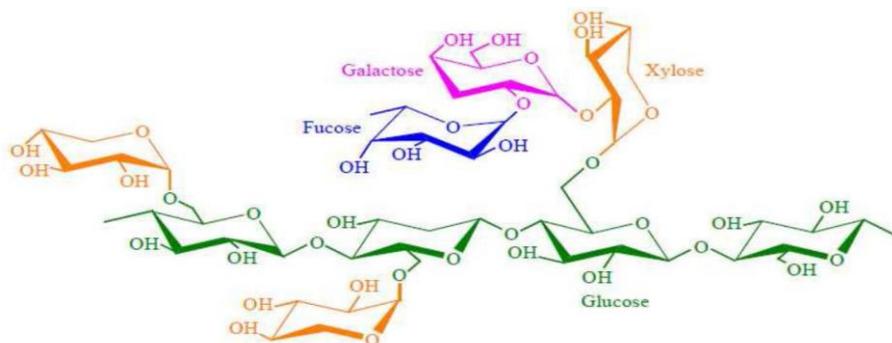


Figure II.21 : Structure d'un type de xyloglucane [72].

3. La lignine

Dans la paroi cellulaire végétale, la lignine est associée à la cellulose et à l'hémicellulose (Figure II.22). Son pourcentage varie de 10 à 30% dans la biomasse ligno-cellulosique. L'industrie du papier et de la pâte à papier à elle seule produit en outre environ 50 millions de tonnes de lignine, mais actuellement la lignine n'est utilisée qu'en grande quantité pour la production de produits de faible valeur tels que la production de vapeur [73]. Il agit généralement comme un composant majeur qui entrave la saccharification enzymatique de la biomasse ligno-cellulosique dans le domaine de l'énergie de la biomasse [74]. La lignine est un polymère tridimensionnel avec une structure chimique complexe qui est composé de diverses unités monomères (C9) à chaîne latérale alkyle phénolique-C3 ($C\alpha - C\beta - C\gamma$) de manière non linéaire et aléatoire par le biais de liaisons éther et de liaisons carbone-carbone. Les monolignols sont appelés unités p-hydroxyphényl (H), gäiacyl (G) et syringyl (S) [75].

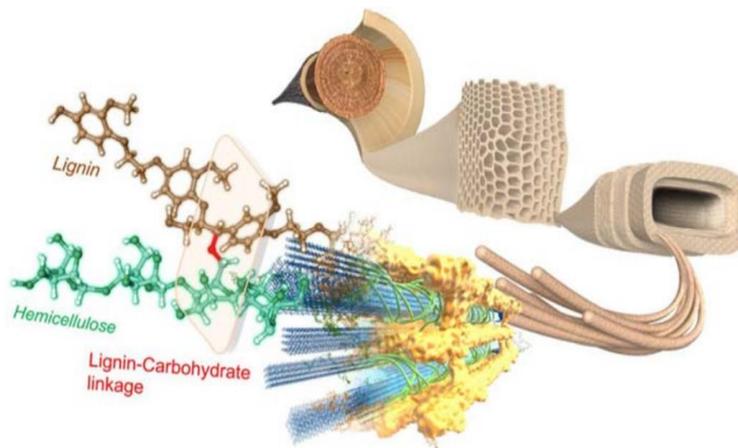


Figure II.22: Vue en trois dimensions du complexe glucidique de la lignine dans la cellule végétale [76].

4. La pectine

La pectine est un hétéropolysaccharide anionique largement distribué dans la paroi cellulaire végétale supérieure qui pourrait réguler le métabolisme des graisses et le microbiote intestinal. L'homogalacturonane (HG) et le rhamnogalacturonane I (RG-I) sont les principales structures de la pectine, et sont principalement composés d'acide D-galacturonique (D GalA), de L-rhamnose (L-Rha) et de sucres neutres (Figure II.23). L'HG représente environ 60% de la pectine totale, se compose de Gal-A lié par un revêtement, dont certains sont méthyles ou

acétylés. Le RGI se compose de D-GalA et de L-Rha liés en alternance qui sont modifiés par des sucres neutres au niveau des résidus de L-Rha [77]. La pectine est capable de piéger l'eau pour former des gels à faible concentration, conduisant à des applications comme stabilisant, agent épaississant ou gélifiant dans la confiserie, la boulangerie, les confitures et les produits laitiers. Elle peut non seulement être considéré comme une fibre alimentaire, des prébiotiques ou un substitut des graisses, mais aussi montrer un potentiel nutraceutique pour abaisser le cholestérol [78].

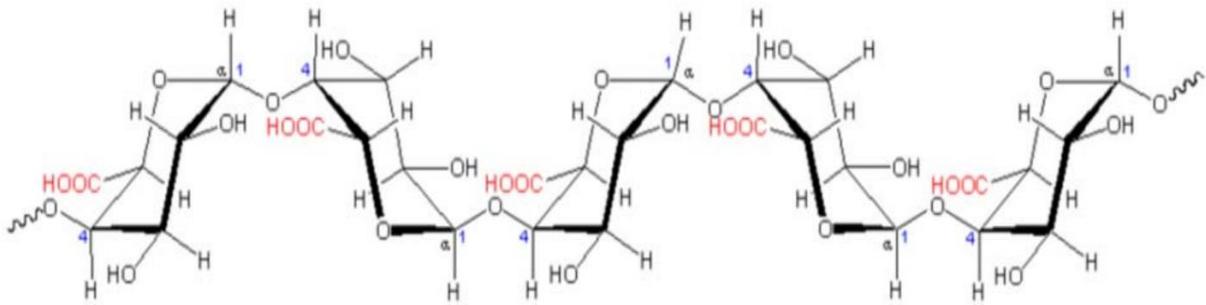


Figure II.23. Représentation de la molécule de pectine [79].

5. Les cires

Les cires sont des constituants des fibres naturelles, qui peuvent être extraits avec des solutions organiques. Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [80]. Le Tableau II.3 donne la composition chimique et les proportions de chaque substance (cellulose, lignine, hémicelluloses, pectine et cire) des fibres végétales les plus utilisées.

Tableau II.3: Composition en cellulose de quelques fibres naturelles [81]

Types de Fibre	Cellulose %	Lignine %	Hémicellulose %	Pectine %	Cendres %
Lin	71	2.2	18,6-22,6	2.3	-
Kenaf	31-57	15-19	21,5-23	-	2-5
jute	45-71.5	12-26	13,6-21	0.2	0.5-2

chanvre	57-77	3.7-13	14-22,4	0.9	0.8
Ramie	68.6-91	0.6-0.7	5-16,7	1.9	-
Abaca	56-63	7-9	15-17	-	3
Sisal	47-78	7-11	10-24	10	0.6-1

II.9 Avantages et inconvénients des fibres végétales

Le tableau 1.4 présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort de matériaux composites. La biodégradabilité des fibres peut être considérée comme un avantage ou un inconvénient. Par ailleurs, il n'existe pas de pièces industrielles à durée de vie illimitée, tout matériau étant voué à devenir déchet. L'utilisation de ce type de matériau impose, par une conception réfléchie, de placer la structure en matériaux composites en dehors des conditions de biodégradabilité. Cette démarche est appliquée depuis longtemps pour des ouvrages en bois [82].

Tableau II.4 : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites [82]

Avantages	Inconvénients
- Faible coût ;	- Absorption d'eau ;
- Propriétés mécaniques spécifiques ;	- Faible stabilité dimensionnelle ;
- importantes (résistance et rigidité) ;	- Biodégradabilité.
- Biodégradabilité ;	- Faible tenue thermique (200 à 230°C) ;
- Non abrasif pour les outillages ;	- Fibres anisotropes ;
- Neutre pour l'émission de CO2 ;	-Variation de qualité en fonction du lieu de
- Demande peu d'énergie pour de	croissance, des conditions

production ;	météorologiques ;
- Pas de résidus après incinération ;	- Pour des applications industrielles,
- Pas d'irritation cutanée lors de la	nécessite de gestion d'un stock ;
manipulation des fibres ;	- Renfort discontinu.
- Ressource renouvelable ;	
- Bon isolant thermique et acoustique	

II.10 Traitement des fibres

Etant donné les problèmes rencontrés avec l'utilisation de particules végétales en complément d'une matrice minérale, de nombreuses études ont été menées dans le but de modifier certaines de leurs caractéristiques avant l'élaboration de composites. La plupart des traitements ont pour but de limiter le comportement hydrophile du végétal et le relargage d'extractibles. L'objectif peut également être de modifier la surface des particules végétales.

II.10.1 Traitement chimique

La plupart des traitements chimiques utilisés jusqu'à présent pour modifier les fibres végétales consistent en une trempée dans une solution alcaline ou d'une estérification. Ces techniques agissent généralement en profondeur et conduisent dans la plupart des cas à une destruction partielle de la structure des particules végétales. Toutefois, des traitements en solution neutre existent également.

1) Traitement alcalin

Le traitement alcalin est l'un des traitements chimiques les plus couramment utilisés pour les fibres naturelles, et sa modification la plus significative est la rupture des liaisons hydrogène présentes dans la structure en réseau de ces fibres. Cette rupture entraîne une augmentation de la rugosité de leur surface [83, 84].

Les fibres naturelles sont soumises à un traitement alcalin par l'ajout d'hydroxyde de sodium (NaOH). Ce traitement permet d'éliminer une partie de la lignine, de la cire et de l'huile qui recouvrent la surface externe des parois cellulaires des fibres. En conséquence, la cellulose subit

une dépolymérisation, ce qui expose les cristallites de taille plus réduite, comme illustré dans la figure II.23 [83].

De plus, lors du traitement alcalin, certaines substances cimentaires telles que les composés hémi cellulosiques et la lignine sont éliminées, ce qui a un impact sur la composition chimique des fibres végétales, l'orientation moléculaire des cristallites de cellulose et le degré de polymérisation [84]. Comme représenté dans l'équation 1 :

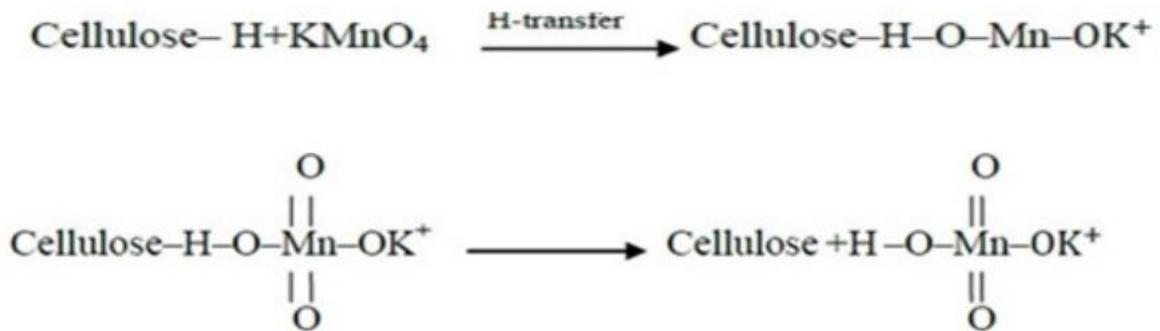
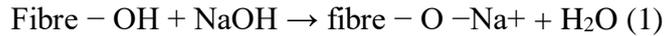
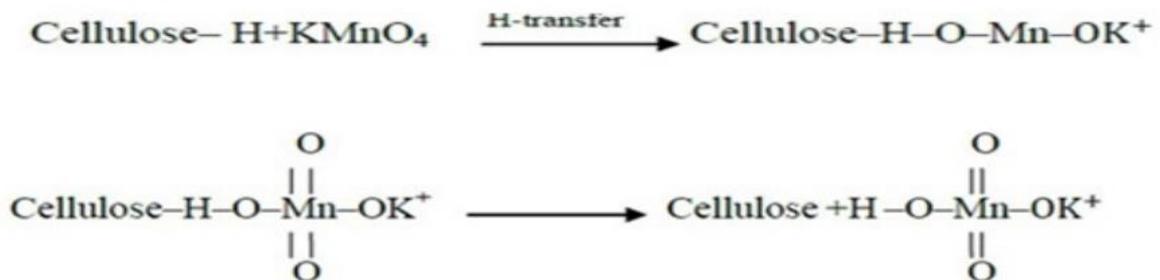


Figure II.24 : Structure typique de la fibre (i) non traitée et (ii) traité [83].

2) Traitement par permanganate de potassium

Le traitement au permanganate (ions MnO_4^-) repose sur la création de sites radicalaires au sein de la cellulose des fibres naturelles. Cette méthode vise à augmenter la réactivité de la cellulose, facilitant ainsi son interaction avec les matrices polymères [85]. Voir les équations :



En général, ce type de traitement est effectué en utilisant du permanganate de potassium (KMnO_4) en solution (dans l'acétone) à différentes concentrations, avec une durée de trempage allant de 1 à 3 minutes, après un prétraitement alcalin. Ainsi, le caractère hydrophile des fibres naturelles est réduit, ce qui entraîne une diminution de l'absorption d'eau par le composite renforcé avec ces fibres. La tendance hydrophile des fibres diminue avec l'augmentation de la

concentration de KMnO_4 . Cependant, à des concentrations supérieures à 1%, on observe une dégradation de la fibre naturelle [85].

3) Traitement par silane

Le silane est un composé chimique représenté par la formule SiH_4 . Les silanes sont utilisés comme agents de couplage pour assurer la stabilité du composite en favorisant l'adhérence entre les fibres et la matrice polymère. De plus, ils permettent de réduire le nombre de groupes hydroxyles de la cellulose à l'interface entre la fibre et la matrice [83].

Lorsque de l'humidité est présente, les groupes alcoxy hydrolysables du silane se transforment en silanols, qui réagissent ensuite avec les groupes hydroxyles présents dans les fibres, formant ainsi des liaisons covalentes stables avec la paroi cellulaire [86]. De cette manière, les chaînes hydrocarbonées (R) introduites par l'application du silane limitent le gonflement des fibres en se diffusant dans la matrice, formant ainsi un réseau enchevêtré [84, 87]. Voir équation:



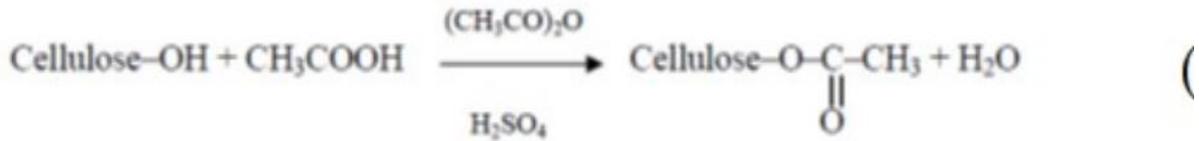
De plus, le traitement au silane améliore la résistance à la traction du composite, réduit l'impact de l'humidité sur ses propriétés et renforce l'adhérence entre les fibres et la matrice, ce qui contribue à augmenter la résistance globale du composite [83, 87].

4) Traitement par acétylation

Le traitement d'acétylation est une méthode utilisée pour modifier la surface des fibres végétales afin de réduire leur caractère hydrophile. Le principe de ce traitement consiste à faire réagir les groupes hydroxyles (-OH) présents dans la fibre avec des groupes acétyle ($\text{CH}_3\text{CO-}$). Cette substitution modifie les propriétés de la fibre et lui confère une surface hydrophobe. Les groupes hydroxyles impliqués dans la réaction proviennent à la fois des composants minoritaires de la fibre tels que les hémicelluloses et la lignine, ainsi que de la cellulose amorphe [88].

Les groupes hydroxyles des régions cristallines de la fibre sont fortement compacts en raison de liaisons intermoléculaires solides, ce qui les rend inaccessibles aux réactifs chimiques. Les réactions d'acétylation, avec catalyseur acide et sans catalyseur acide, sont illustrées respectivement ci-dessous. Puisque l'acide acétique ne réagit pas facilement avec la cellulose, il est préférable de le substituer par de l'anhydride acétique [89].

Pour accélérer la réaction, les fibres peuvent être préalablement immergées dans de l'acide acétique, puis traitées avec de l'anhydride acétique pendant une durée de 1 à 3 heures [88]. Voir les équations :



II.10.2 Traitement thermique

Le traitement thermique des fibres naturelles conduit à de multiples changements physiques et chimiques, en raison de leur structure chimique, chacune des trois composantes (cellulose, hémicelluloses et lignine) réagit différemment au cours du processus de dégradation thermique. La microstructure et la nature tridimensionnelle des fibres naturelles sont variables, influençant leur comportement au cours de la combustion. La fibre naturelle commence à se dégrader) environ 240°. La lignine, en particulier la protolignine à faible poids moléculaire, se dégrade en premier avec cinétique plus lente que les autres constituants.

L'étude du processus de dégradation thermique des fibres de jute et de lin et ont constaté qu'à des températures inférieurs à 170°, les propriétés des fibres ont été légèrement modifiées, tandis qu'à des températures supérieurs à 170°. Une baisse importante de tenacité et un degré élevé de dégradation ont été observé.

La dégradation thermique des fibres naturelles est un processus en deux étapes :

- Processus de dégradation à faible température (80-180°), associé à la dégradation de la lignine ;
- Processus de dégradation à haute température (280-380°), dû à la dégradation de la cellulose [90].

CONCLUSION

L'utilisation de fibres naturelles dans le domaine de génie civil est expansé et prend un champ très large d'application compte tenu des caractéristiques physique, mécanique, chimique et écologiques, ainsi que grâce à la disponibilité dans la nature et ses propriétés renouvelable. Dans le chapitre qui suit-on va étudier l'influence de l'incorporation de ces fibres dans les composites géopolymère sur les performances mécaniques.

CHAPITRE III

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIKES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

III.1 Introduction

Le renforcement des composites géopolymères avec des fibres naturelles est un domaine de recherche relativement récent, principalement motivé par la préoccupation croissante concernant la protection de l'environnement, ainsi que par l'intérêt pour la production de matériaux de construction plus durables. Dans ce contexte, les fibres naturelles sont avantageuses car elles sont renouvelables, biodégradables et non toxiques, en plus d'avoir une faible densité et une résistance mécanique acceptable [91]. De plus, le remplacement des fibres synthétiques par des fibres naturelles est également intéressant pour des raisons économiques, étant donné que la production de fibres artificielles est un processus énergivore, contrairement à la culture et à la récolte des fibres naturelles [92, 93].

Cependant, il est également nécessaire de considérer que la performance d'un matériau géopolymère renforcé par des fibres, qu'elles soient naturelles ou synthétiques, dépend fortement de facteurs tels que : les propriétés des fibres, la teneur en fibres utilisée, le précurseur géopolymère, les conditions de cure et l'âge de l'échantillon. Plus important encore est le lien entre la surface de la fibre et la matrice géopolymère, car un lien fort permet le transfert de charges de la matrice vers la fibre, tandis qu'un lien faible se traduit par un matériau plus poreux et moins résistant [94, 95].

III.2. Propriétés mécaniques des géopolymères renforcées par les fibres naturelles

Les propriétés mécaniques des géopolymères renforcés par des fibres naturelles sont influencées par plusieurs facteurs, notamment le type et la quantité de fibres, leur orientation au sein de la matrice géopolymère, et l'adhérence interfaciale entre les fibres et la matrice. En général, l'incorporation de fibres naturelles non traitées peut avoir les effets suivants sur les propriétés mécaniques

De nombreux auteurs ont mené des études sur les renforts naturels en considérant uniquement les fibres végétales, bien qu'il existe également des fibres naturelles animales et minérales. Les

fibres animales sont moins avantageuses que les fibres végétales, car leur prélèvement d'origine animale est plus difficile à mettre en œuvre à grande échelle. La plupart des fibres minérales subissent plusieurs traitements avant leur application. La seule fibre minérale obtenue sans ces procédés est de l'amiante, classée comme cancérigène [96] et non adaptée à la préparation de composites écologiques. Par conséquent, les fibres végétales constituent la meilleure option pour la production de composites géopolymères renforcés de fibres naturelles. Les fibres végétales présentent plusieurs avantages intéressants qui surpassent les fibres synthétiques :

- i) faible poids,
- ii) faible coût,
- iii) large disponibilité,
- iv) biodégradabilité,
- v) sources renouvelables et non dangereuses,
- vi) rapport d'aspect avantageux, et vii) bonne résistance relative à la traction et à la flexion [97, 98].

Lors de l'utilisation de fibres végétales, plusieurs facteurs importants doivent être pris en compte, notamment le choix des fibres (type, date de récolte, méthode d'extraction, rapport d'aspect, traitement et teneur en fibres), le choix de la matrice, la résistance interfaciale, la dispersion et l'orientation des fibres, le procédé de fabrication des composites et la porosité [99].

III.2.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est reconnue comme une caractéristique fondamentale des mélanges de béton et des mortiers. Par conséquent, les modèles cohérents observés dans les spécifications conventionnelles dépendent fortement de ce facteur.

Le nombre d'articles publiés portant sur l'utilisation de fibres végétales naturelles pour améliorer les propriétés mécaniques des matrices géopolymères a augmenté ces dernières années [98]. Cependant, il reste limité par rapport au nombre d'études menées sur les matériaux cimentaires conventionnels.

De nombreux travaux de recherche sur les géopolymères renforcés par des fibres de coton ont été menés en 2013-2014. Le coton a été introduit dans des matrices géopolymères à base de cendres volantes (classe F, collectées à la centrale électrique de Collie en Australie-

Occidentale), sous forme de fibres courtes et de couches de tissu [100, 101]. Les résultats montrent qu'une teneur en fibres de coton allant jusqu'à 0,5 % en poids augmente la résistance à la compression. Une teneur supérieure à 0,5 % en poids entraîne une diminution des propriétés mécaniques due à une mauvaise maniabilité (principalement la formation de vides due à une mauvaise dispersion des fibres dans la matrice) et à des agglomérations de fibres [102, 103]. D'autres travaux ont porté sur des géopolymères renforcés par des fibres de coton courtes à base de cendres volantes provenant de Skawina, en Pologne. Ils montrent qu'un ajout de 1 % de fibres améliore les propriétés mécaniques par rapport aux géopolymères sans adjuvant [104].

Sally Hashim Mohammed et al.[105], ont également étudié les propriétés mécaniques des géopolymères à base de fibres de balle de riz avec un taux de (1%, 1,5%, 2%) en volume. Ils ont observé que Le renforcement du mortier géopolymère avec des fibres de balle de riz volume a entraîné une augmentation de la résistance à la compression de (25%, 48%, 59%), respectivement, après 7 jours de durcissement, et de (23%, 42%, 55%) après 28 jours de durcissement comme montre la figure ci-dessus

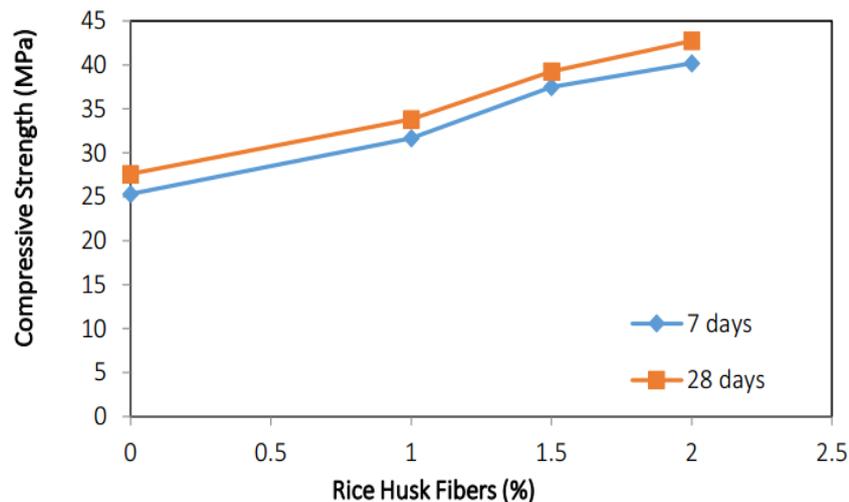


Figure III.1: Résistance à la compression du mortier géopolymère avec fibres de balle de riz à 7 et 28 ans de durcissement

Une autre fibre populaire pour les applications dans les composites destinés à la construction est l'abaca, également appelé chanvre de Manille. Cette fibre possède de très bonnes propriétés mécaniques [106]. La recherche était liée à l'utilisation de déchets de fibres d'abaca comme renfort (fibres longues d'environ 25 cm) pour une matrice géopolymère à base de cendres volantes (cendres volantes provenant d'une centrale électrique située à Luçon, aux Philippines).

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

La recherche s'est concentrée sur l'adhérence des fibres d'abaca à la matrice géopolymère. Les résultats montrent qu'un prétraitement approprié des fibres augmente significativement les propriétés mécaniques des composites [106].

Deux types de fibres naturelles ont été étudiés par Edvaldo A. Correia et al [107], la fibre de sisal et la fibre de feuille d'ananas (PALF). La fibre de sisal est extraite des feuilles de l'agave sisalana. C'est l'une des fibres naturelles les plus utilisées [108]. La fibre de feuille d'ananas est obtenue à partir des feuilles de l'ananas comosus. La PALF a été choisie car le Brésil est l'un des plus grands producteurs d'ananas au monde et sa production est principalement concentrée dans la région nord-est, où se trouve l'université. Bien que certaines applications aient été proposées dans la littérature [109], Les fibres ont été coupées à 25 mm de longueur et la teneur en renfort était de 3 % en fraction volumique pour les deux types de fibres.

Les performances de compression du composite, illustrées à la figure, sont inférieures à celles obtenues par le géopolymère, comme prévu.

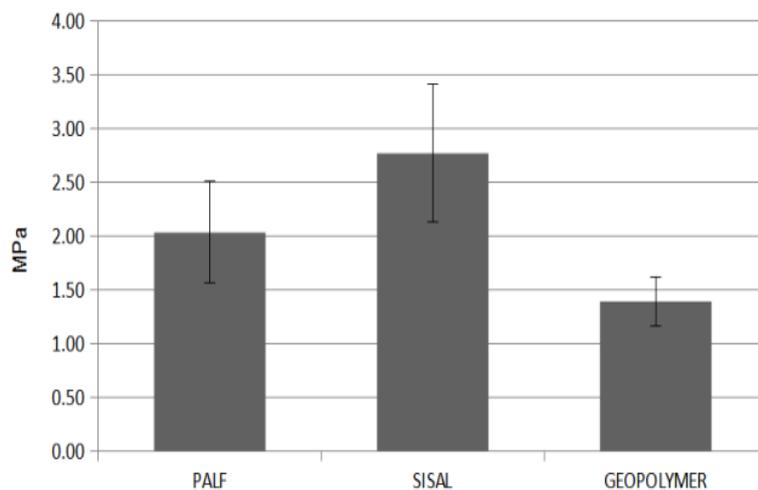


Figure III.2: Résultats de résistance à la compression.

Bien que les résultats avec PALF soient toujours d'un niveau inférieur à ceux avec le sisal, ils ne peuvent pas être négligeables car lorsqu'ils sont directement comparés à la matrice géopolymère, ils présentent un gain indéniable.

Selon l'étude de Yanou et al. [110], l'utilisation de fibres de bagasse de canne à sucre pour renforcer des géopolymères à base de laitier a entraîné une diminution de la résistance à la compression. Cette diminution s'est accentuée avec l'augmentation de la teneur en fibres, atteignant (18,3 % ; 31,8 % ; 43,1 % ; 65,9 % et 71,8 %) pour des teneurs en fibres de (1,5 %, 3,0 %, 4,5 %, 6,0 % et 7,5 %).

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

3 %, 4,5 %, 6 % et 7,5 %) respectivement, comme illustré à la figure III.3. Cette perte de résistance est attribuée à la formation accrue de vides au sein de la matrice géopolymère, créant ainsi des zones de faiblesse.

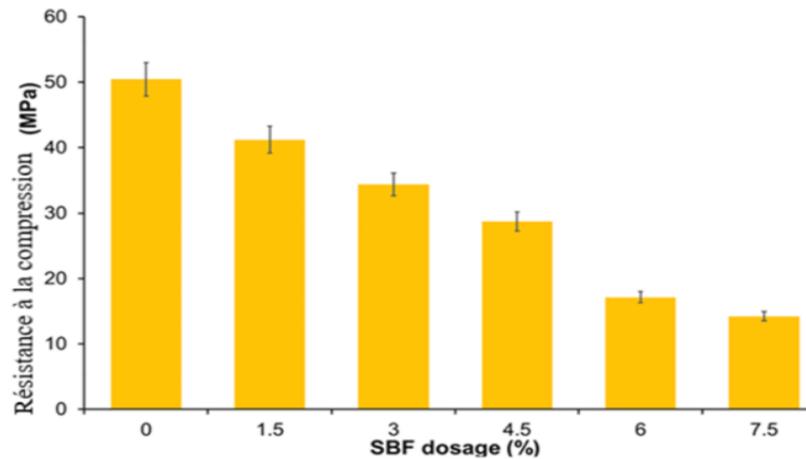


Figure III.3: Influence du dosage des fibres de bagasse sur la résistance à la compression.

Dans cet article, Guido Silva et al. [111] ont utilisé des fibres de jute et de sisal pour renforcer une matrice géopolymère produite à partir de résidus d'argile cuite et de 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 à la compression de 64 % par rapport à la matrice géopolymère seule. D'autre part, les géopolymères renforcés avec 2,5 % de fibres de sisal ont montré une augmentation allant jusqu'à 76 % par rapport à la matrice géopolymère (voir figure).

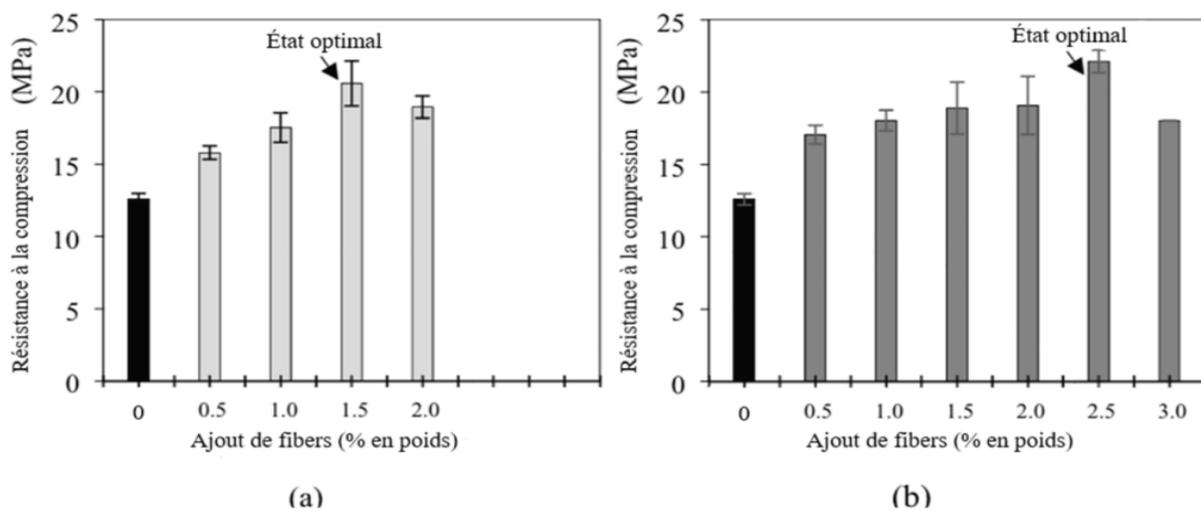


Figure III.4: Résistance à la compression au 7^{ème} jour des éprouvettes renforcées : a) avec du jute ; b) : avec des fibres de sisal

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

Cet article [112] décrit la recherche sur un géopolymère spécifique fabriqué à partir de cendres volantes et renforcé par quatre fibres naturelles courtes, à savoir le coton, le sisal, le raphia et la noix de coco. Le tableau III.1 présente les résultats moyens et l'écart type des valeurs de résistance enregistrées.

Tableau III.1 : les résultats moyens et l'écart type des valeurs de résistance[112]

Les échantillons	Résistance à la compression MPa	l'écart type des valeurs enregistrées de résistance
Géopolymère	24.78	1.89
Géopolymère avec fibre de coco (1%)	31.36	10.10
Géopolymère avec fibre de coton (1%)	28.42	5.30
Géopolymère avec fibre de raphia (1%)	13.66	1.71
Géopolymère avec fibre de sisal (1%)	25.16	3.43

Les résultats des essais de résistance à la compression montrent que l'ajout de fibres de coton, de sisal et de coco améliore la résistance à la compression des échantillons. En revanche, l'ajout de fibres de raphia diminue cette résistance, en raison du manque de cohésion entre les fibres et la matrice géopolymère. Les résultats, notamment pour les fibres de coco, sont très prometteurs et suggèrent que des recherches supplémentaires sont nécessaires.

Les effets de différentes longueurs (15, 25 et 35 mm) et teneurs en volume (0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,60 et 0,70 %) de fibres de jute naturelles sur les performances mécaniques du béton géopolymère renforcé de fibres ont été étudiés par [113]

L'impact de différentes longueurs et fractions volumiques de fibres sur le développement de la résistance à la compression du béton proposé a été évalué. La figure présente les résultats obtenus pour la résistance à la compression de bétons géopolymères renforcés, âgés d'une et quatre semaines. La résistance à la compression des échantillons a augmenté avec l'âge de cure. De plus, la résistance à la compression des échantillons a été directement affectée par la

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

variation de la longueur et des fractions volumiques des fibres. Cependant, la résistance à la compression a diminué avec l'augmentation de la longueur et des fractions volumiques des fibres dans la matrice de béton. La résistance la plus faible (21,7 MPa) à jeune âge (7 jours) a été observée pour les échantillons préparés avec la longueur (35 mm) et la teneur volumique (0,70 %) les plus élevées de fibres naturelles de jute renforçant les géopolymères. Pour les échantillons de géopolymère préparés avec différentes fractions volumiques et une longueur de fibre fixe de 15 mm (Figure a), la RC a chuté de 37,7 à 26,1 MPa à 7 jours et de 46,9 à 38,1 MPa à 28 jours. De même, l'augmentation de la longueur des fibres à 25 mm et des fractions volumiques a entraîné une diminution significative des valeurs de résistance à la compression. À l'âge de 7 jours, la RC a chuté de 37,7 à 24,3 MPa lorsque la fraction volumique de fibres a augmenté de 0 % à 0,70 %, respectivement. De même, après 28 jours, la RC a chuté de 46,9 à 34,5 MPa lorsque les fractions volumiques de fibres ont augmenté de 0 % à 0,70 % (Figure 10b). De même, le béton fabriqué avec des fibres de 35 mm a présenté une perte de résistance à la compression plus importante lorsque le pourcentage volumique de fibres naturelles de jute incluses dans la matrice géopolymère était plus élevé. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la fraction volumique de 0,10 % à 0,70 % entraînait une baisse de la valeur de résistance à la compression de 34,7 à 21,7 MPa à l'âge de 7 jours et de 44,6 à 31,5 MPa à l'âge de 28 jours, respectivement.

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

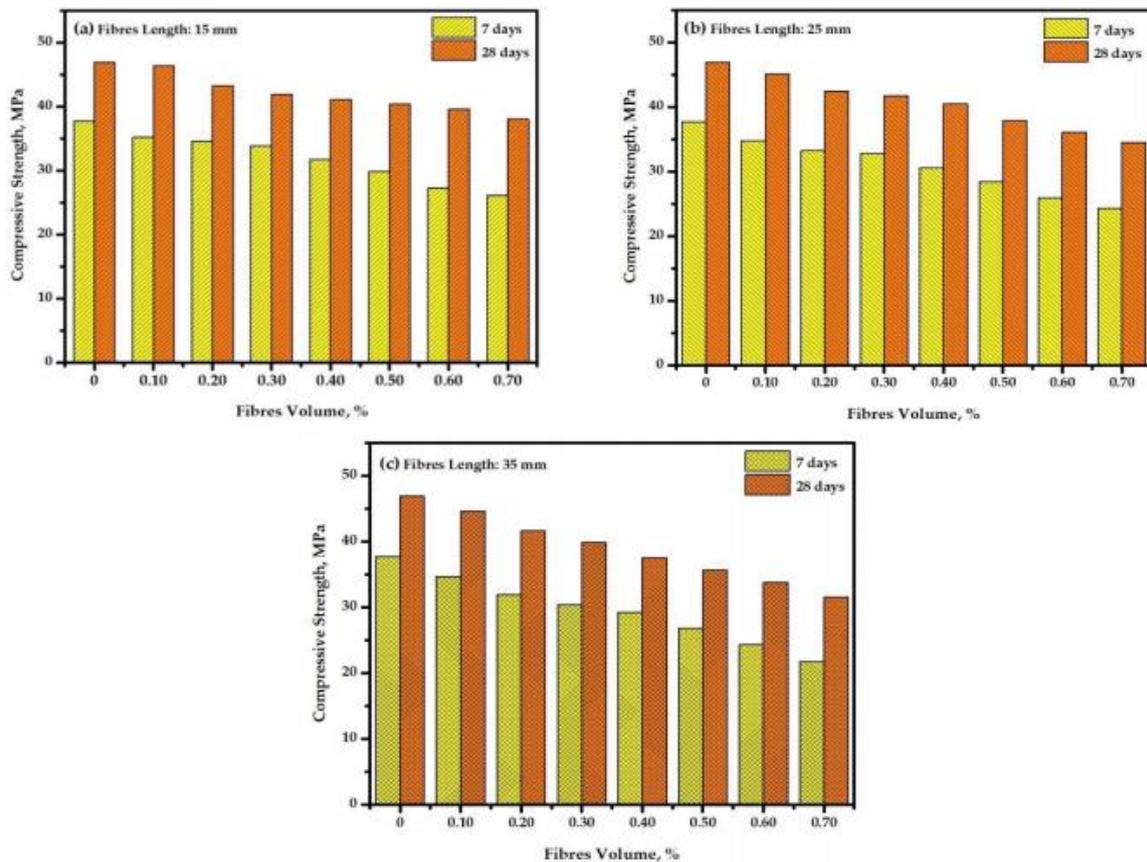


Figure III.5 : Impact des différentes longueurs et fractions volumiques des fibres sur le développement de la résistance à la compression du béton : (a) 15 mm (b) 25 mm (c) 35mm

En général, les géopolymères renforcés de fibres de jute, avec des concentrations de fibres plus élevées, absorbent plus de solution, ce qui influence considérablement le processus de géopolymérisation et entraîne une réduction de la résistance à la compression.

Ayeni et al. [114] ont étudié des composites géopolymères avec différentes teneurs en fibres de coco de 0,5, 1,0, 1,5 et 2,0 % en poids, La figure montre les résultats de résistance à la compression du géopolymère à base de métakaolin renforcé de fibres de coco à différentes teneurs en fibres (0,5 à 2 %). La résistance à la compression a augmenté de 16,91 N/mm² à 21,25 N/mm² en ajoutant des fibres de coco à une teneur de 0,5 %. Une tendance similaire a également été observée dans l'étude de Wongsat et al. [115] arapporté qu'une teneur de 0,5 % en fibres de coco augmentait la résistance à la compression du géopolymère. L'ajout de 1 % de fibres de coco a réduit la résistance à la compression du matériau. Les résultats ont montré que la dispersion des fibres de coco dans la matrice géopolymère était mauvaise avec l'ajout de 1 %

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

de fibres. Cependant, Korniejenko et al. [116] ont constaté que l'ajout de 1 % de fibres de coco aux composites géopolymères augmentait la résistance à la compression. Lorsque la teneur en fibres de coco est de 1,5 %, la résistance du composite géopolymère est de 16,94 N/mm². Sa résistance à la compression est similaire à celle des géopolymères sans fibres. La présence de fibres de coco n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression du PFRG. Notamment, la résistance a diminué lorsque 2 % de fibres de coco ont été ajoutées, indiquant que la structure composite était moins dense.

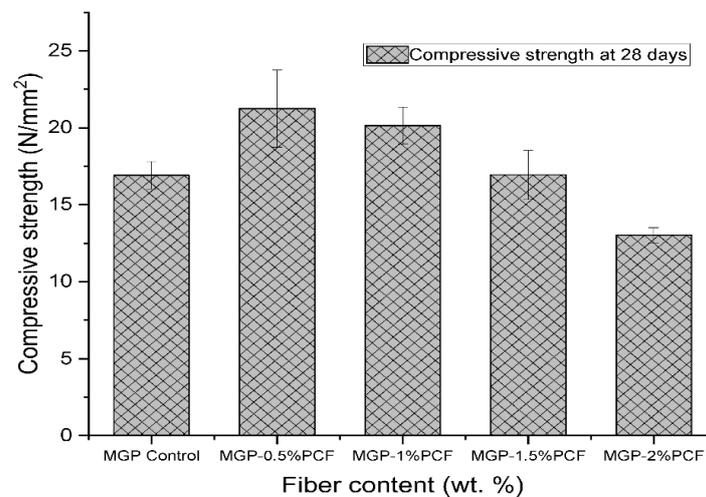


Figure III.6 : Résistance à la compression des échantillons à différentes teneurs en fibres de coco testées après 28 jours.

Workiye et al. [117] ont préparé des composites géopolymères renforcés de paille de maïs à 0, 0,1, 0,2, 0,6 et 1 % en poids et ont réalisé des essais de résistance à la compression. La résistance à la compression mesurée varie de 16 MPa à 27 MPa. Les résultats indiquent que la résistance à la compression du géopolymère à base de kaolinite calcinée pourrait être améliorée par l'ajout approprié de fibres de paille de maïs.

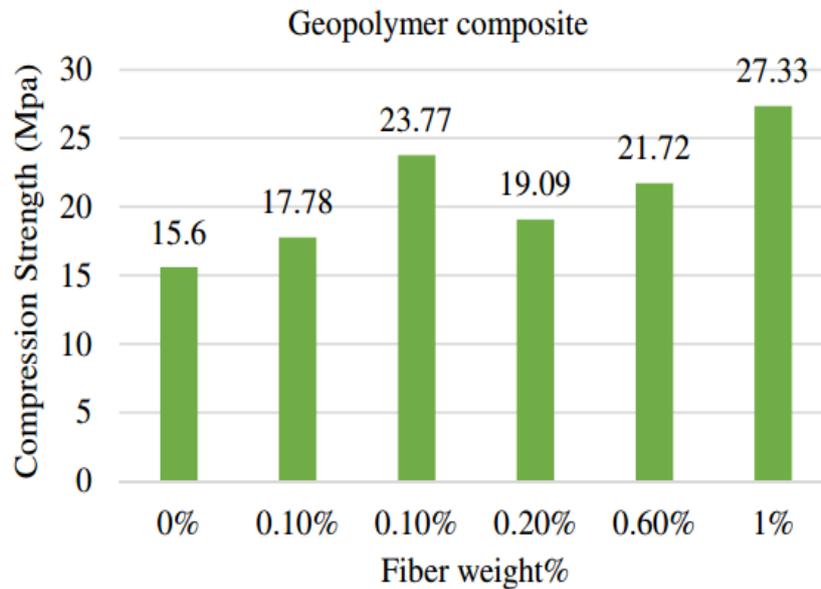


Figure III.7 : Résistance à la compression du géopolymère renforcé par des fibres de paille de maïs

Selon une étude d'Alomayri et al.[118], l'orientation du tissu de coton (horizontale ou verticale) par rapport à la charge appliquée a un impact significatif sur la résistance à la compression des composites. Les résultats ont révélé que la résistance à la compression est nettement supérieure lorsque le tissu est orienté horizontalement par rapport à une orientation verticale, comme illustré à la figure III.8. Cette observation pourrait s'expliquer par la capacité du tissu de coton horizontal à absorber et à distribuer la charge de manière uniforme sur toute la section transversale. De plus, l'étude a montré que la résistance à la compression augmente proportionnellement au nombre de couches de tissu de coton utilisées.

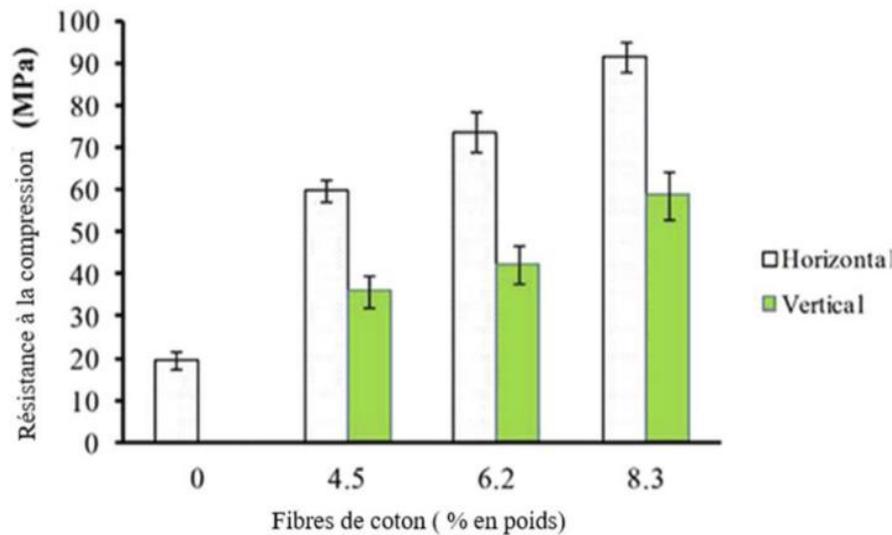


Figure III.8: Résistance à la compression des composites géopolymères en fonction de la fibre contenu.

Les fibres minérales telles que le basalte et la diatomite, utilisée comme renfort, donnent généralement de meilleurs résultats que les fibres végétales. Cependant, leur utilisation est moins bénéfique pour l'environnement que les fibres végétales. Parmi les additifs minéraux, les recherches les plus approfondies ont porté sur les fibres de basalte. Elles ont été intégrées à des matrices géopolymères telles que des tissus [119], des fibres longues [120], ainsi que des fibres courtes et des microfibrilles. Les fibres courtes de basalte ont été étudiées dans différents types de matrices, notamment le métakaolin, les scories et les cendres volantes.

La recherche avec des fibres de basalte a également été effectuée sur la base d'une matrice géopolymère composée de métakaolin, de scories provenant de la Bolu Cement Company en Turquie, de sable et de déchets de collemanite (minéral de borate) provenant de la mine de l'Etü Mining Company en Turquie [121]. Les essais ont été réalisés avec un ajout de 0,4, 0,8 et 1,2 % de fibres (diamètre - 20 μm et longueurs - 12 mm) par volume. Les meilleurs résultats pour les propriétés mécaniques ont été obtenus pour un échantillon contenant 1,2 % de fibres de basalte 64,8 MPa après 28 jours, par rapport à l'échantillon sans renfort 61,6 MPa pour la résistance à la compression [121].

Les effets de la fibre de basalte (BF) sur un géopolymère à base de cendres volantes (Cv) et de déchets de poudre de basalte (PB) ont été étudiés dans cette recherche de [122].

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur des échantillons de mortier géopolymère après 28 jours. Ces essais ont été menés pour étudier l'effet du BF et déterminer les propriétés mécaniques des mortiers géopolymères à base de cendres volantes remplis de fibre de Basalte. La figure III.9 montre les résultats de la résistance à la compression des échantillons de géopolymères à base de cendres volantes contenant du BF, cette étude a montré que l'augmentation de la teneur en BF dans les mortiers géopolymères à base de cendres volantes augmentait la résistance à la compression des échantillons. Les augmentations de la résistance à la compression étaient de 6,43 %, 9,65 % et 11,94 % pour 4 BF, 8 BF et 12 BF, respectivement

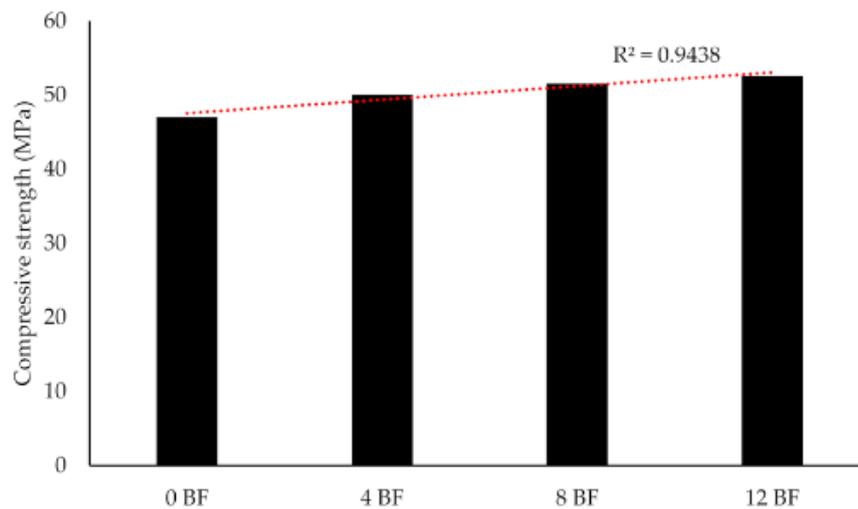


Figure III.9 : Relation entre la résistance à la compression et la teneur en fibre de basalte dans la série de géopolymères

III.2.2. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est une exigence essentielle pour les composites, car elle permet d'évaluer leur capacité antifissuration sous une charge de flexion. L'ajout de fibres naturelles peut améliorer la résistance à la flexion des composites géopolymères. Cependant, le degré d'amélioration varie en fonction de la rigidité, de la teneur, de la taille et de la liaison fibre-matrice des fibres. Korniejenko et al. [123] ont analysé l'influence de l'ajout de diverses fibres naturelles (coton, sisal, raphia et noix de coco) sur la résistance à la flexion d'un géopolymère à base de cendres volantes. Il a été rapporté que l'ajout de fibres de coton, de sisal et de noix de coco améliorerait la résistance à la flexion du composite, tandis que les fibres de raphia la diminuaient. Ceci pourrait s'expliquer par la rigidité des fibres. L'utilisation de fibres à haute

rigidité empêche la propagation des fissures le long d'un certain trajet à travers le mécanisme de pontage, ce qui augmente le trajet effectif des fissures pour libérer les contraintes et améliorer la résistance à la flexion [123]. Cependant, cette amélioration se produit lorsqu'il existe un fort contact interfacial entre la fibre et la matrice. Pour les fibres naturelles à surface lisse, une faible liaison interfaciale se forme, ce qui réduit la résistance à la flexion

Des résultats utiles ont été recueillis pour des composites avec différents teneurs en fibres de coton (0, 3,6, 4,5, 6,2 et 8,3 % en poids) sous le test de flexion en trois points. Les résultats des essais de (124) montrent que la résistance à la flexion du composite renforcé par du tissu de coton augmente avec le pourcentage massique de fibres de coton (voir Figure III.10). Le composite contenant 8,3 % en poids de fibres de coton tissées a présenté la résistance à la flexion la plus élevée parmi tous les composites. La résistance à la flexion des composites a augmenté de 8,2 MPa à 31,7 MPa par rapport au géopolymère pur. Ceci indique qu'une augmentation du nombre de couches de fibres de coton tissées conduit à une amélioration considérable de la résistance à la flexion du composite. Cette observation peut être justifiée par le fait que la résistance à la flexion est contrôlée par le nombre de couches de renforcement. Le faible poids des tissus de coton permet d'intégrer de multiples couches de tissu dans le composite, afin de résister à la rupture par cisaillement et de contribuer au maintien de la charge appliquée aux composites. Ceci permet un transfert de contrainte plus important entre la matrice et les fibres de coton, entraînant une résistance à la flexion améliorée [124].

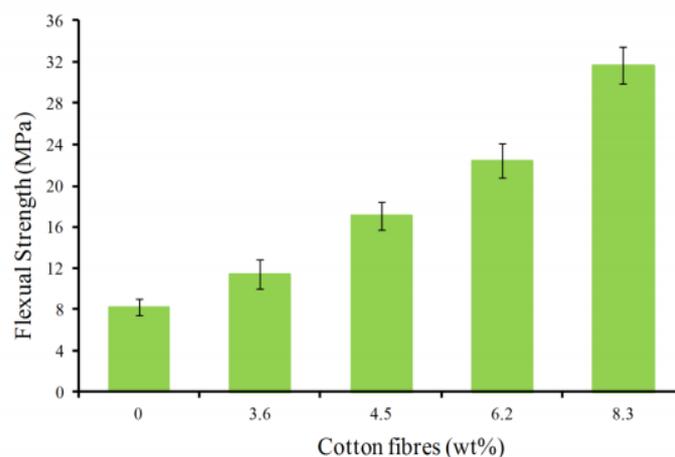


Figure III.10: Résistance à la flexion du composite géopolymère en fonction de la teneur en fibres

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

En raison des excellentes propriétés des fibres de lin, de nombreuses études ont été menées sur l'utilisation de ces composites. Dans cette étude de Lazorenko et al. [125], nous rapportons la préparation, les propriétés mécaniques de nouveaux composites géopolymères (GP) à base de cendres volantes qui ont été renforcés de manière aléatoire avec 0,25 à 1,0 % en poids de fibres de lin coupés courts.

Les résultats de recherche de Lazorenko et al. [125] dans la figure ont montré que la résistance à la flexion du géopolymère passait de 4,0 MPa à 4,9 MPa lorsque les fibres de lin étaient ajoutées au géopolymère à raison de 1,0 % en poids. Contrairement aux substrats géopolymères fragiles, ces composites présentent des caractéristiques de rupture plastique et une capacité portante résiduelle élevée, et restent intacts sans rupture même après avoir été soumis à un impact mécanique maximal.

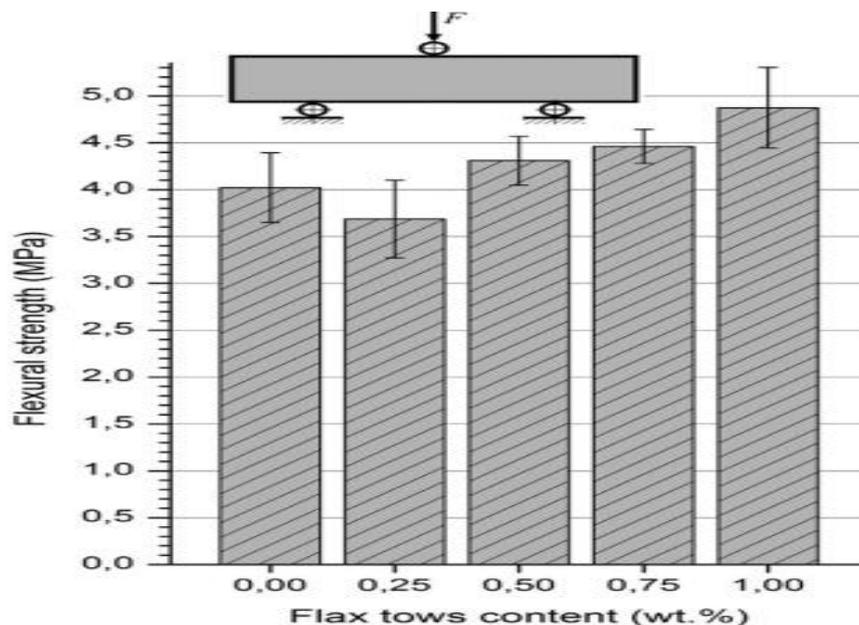


Figure III.11 : Effet de la teneur en fibres de lin sur la résistance à la flexion

Différents types de fibres de coco affectent également les propriétés de flexion. Ayeni et al. [126] ont ajouté différentes proportions de fibres de coco pour améliorer la résistance à la flexion des PFRG. Avec une teneur en fibres de 0,5 %, la résistance à la flexion est de 9,74 N/mm². Avec une teneur en fibres de 1 %, la résistance à la flexion peut atteindre 10,39 N/mm². Grâce à la résistance à la traction et au module d'élasticité élevés des fibres de coco, la contrainte peut être transférée de l'échantillon aux fibres de coco via l'interface de la matrice géopolymère. Lorsque le PFRG est soumis à une charge de flexion, le moment de flexion provoque une

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

contrainte de traction. À l'interface fibre-matrice, la contrainte de traction est convertie en contrainte de cisaillement, ce qui entraîne une résistance à l'interface fibre-matrice.

L'augmentation de la teneur en fibres entraîne la formation de microfissures à l'intérieur de la structure composite. En revanche, un autre essai de résistance à la flexion a montré que la performance des échantillons sans fibres était sensiblement la même que celle des échantillons contenant des fibres de coco, de coton ou de sisal. L'ajout de fibres naturelles n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la flexion du PFRG, contrairement à l'ajout de fibres synthétiques.

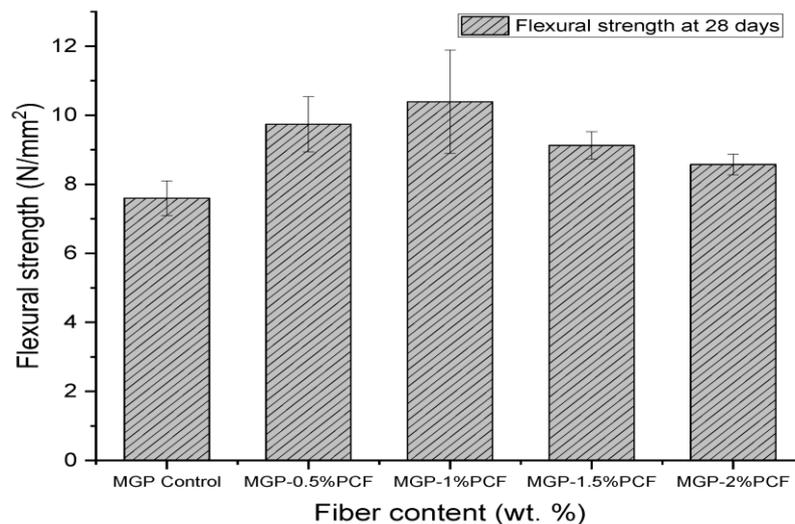


Figure III.12: Résistance à la flexion des échantillons à différentes teneurs en fibres de coco testées après 28 jours.

Kavipriya et al [127] Des tiges de bambou ont été utilisées à 10, 20 et 30 % à la place des granulats grossiers. Parallèlement, différentes proportions de fibres de sisal ont été ajoutées, avec des proportions volumiques respectives de 0,25 %, 0,5 %, 0,75 % et 1,0 %. Les résultats ont montré que les fibres de sisal pouvaient améliorer efficacement la résistance à la flexion des composites, comme le montre la figure III.13.

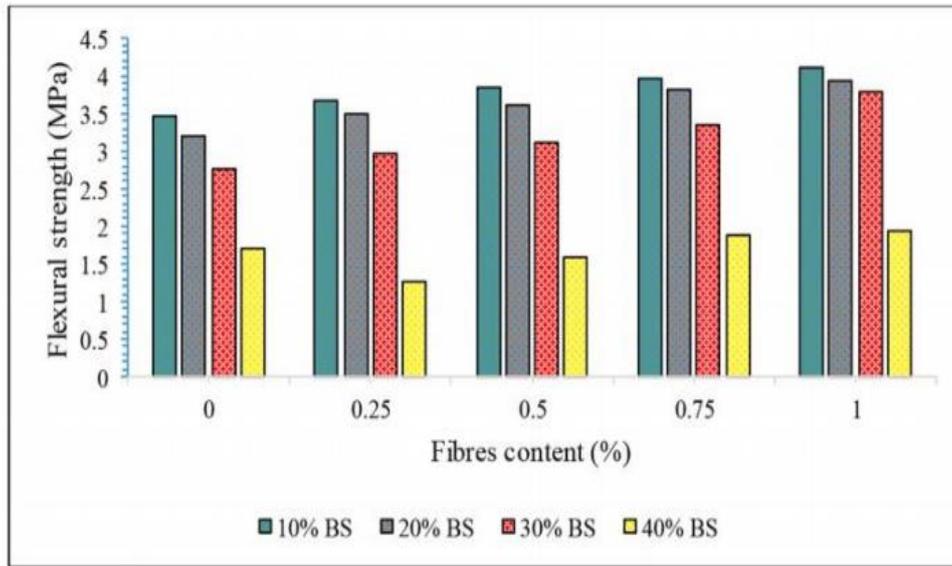


Figure III.13: Résistance à la flexion en fonction de fibres de sisal

Hanzhou Ye et al. [128] ont examiné l'effet de l'ajout des trois principaux constituants des fibres naturelles – la cellulose (C), l'hémicellulose (H) et la lignine (L) – sur un géopolymère à base de métakaolin. Les échantillons moulés à température ambiante ont été soumis à deux mode de cure distincts : un maintien à température ambiante (groupe G) et une cuisson à 80°C pendant 48 heures (groupe GH, traitement de préchauffage), avant d'être tous durcis pendant 7 jours à température ambiante avant les essais.

Les géopolymères non renforcés (G0) ont présenté une résistance à la flexion supérieure ($8,07 \pm 1,38$ MPa) à celle des échantillons non chauffés (G). La résistance à la flexion maximale a été observée pour de faibles taux d'incorporation de cellulose, d'hémicellulose et de lignine dans les échantillons G-L5, G-C5 et GH5, atteignant respectivement $10,66 \pm 0,78$ MPa, $9,00 \pm 2,00$ MPa et $9,58 \pm 1,22$ MPa (voir figure).

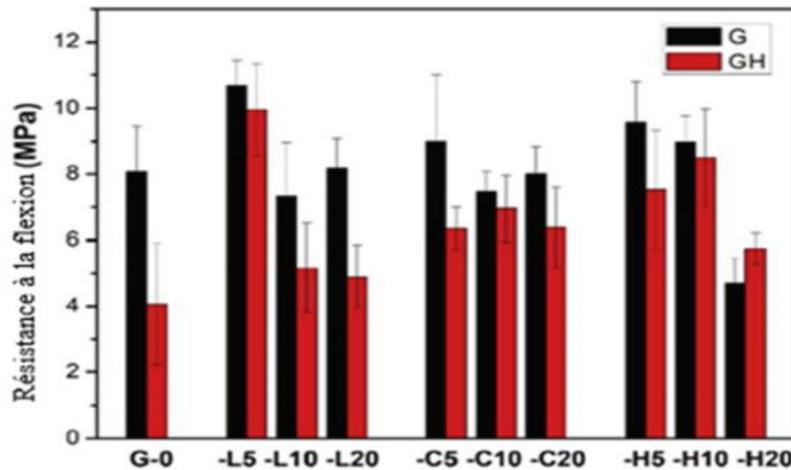


Figure III.14: Résistance à la flexion des composites à base de géopolymères.

Chen et al.[129] ont traité des fibres de sorgho sucré (taille < 840 μm) avec une solution alcaline. Les fibres traitées ont été incorporées dans des pâtes géopolymères à base de FA de classe F activées avec de la NaOH à des concentrations de 1 %, 2 % et 3 %, des résistances à la flexion à 7 jours plus élevées ont été obtenues avec 1 % et 2 % de fibres de sorgho sucré traitées, tandis qu'une teneur de 3 % elle a légèrement diminuées. Cette réduction pourrait être attribuée à la faible maniabilité du mélange et à l'agglomération des fibres avec l'incorporation de 3 % de fibres, ce qui a entraîné une augmentation des bulles d'air emprisonnées et une distribution non uniforme des fibres. L'incorporation de 1 % et 2 % de fibres de sorgho sucré traitées a amélioré la résistance à la flexion d'environ 36 % et 50 %, respectivement. L'incorporation de fibres a amélioré la ductilité de la matrice. L'amélioration de la ductilité est due au décollement et à l'arrachement des fibres qui comblent les fissures et peuvent supporter des charges plus importantes. L'arrachement des fibres pendant la charge, capable d'absorber l'énergie, a amélioré le comportement en traction.

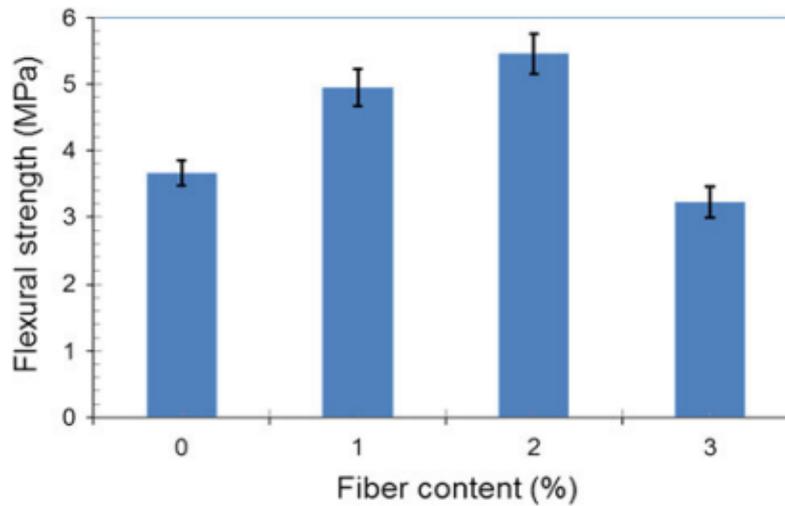


Figure III.15: Effet de la teneur en fibres sur la résistance à la flexion de la pâte géopolymère

D'autres possibilités sont offertes par les fibres animales, telles que la laine et les fibres de mammifères apparentées [130]. Parmi les fibres animales, les tests les plus complets ont été réalisés sur la laine [130]. La recherche a été menée sur de la laine de haute qualité (laine mérinos) et de qualité inférieure, par exemple de la laine pour tapis et de la laine issue de déchets [130]. La matrice était un géopolymère à base d'argile halloysite de type kaolinite provenant de Nouvelle-Zélande, tandis que le renfort était composé de deux types de laine mérinos de haute qualité (18-25 μm) et d'un mélange laine-laine pour tapis de qualité inférieure (30-35 μm). Les fibres ont été ajoutées à raison de 5 % du poids du composite. De plus, les fibres ont été soumises à différents types de prétraitement : elles ont été appliquées aux composites sous trois formes [131] : telles quelles, après purification et pré-préparées par trempage dans une solution de formaldéhyde. Après 14 jours, des tests de résistance à la flexion ont été réalisés sur les échantillons préparés. Cette résistance du matériau de la matrice était de 5,8 MPa. Pour les composites avec ajout de fibres, les meilleures propriétés ont été obtenues avec de la laine de qualité inférieure pré-préparée et de la laine de qualité supérieure traitée : 8,7 MPa et 9,1 MPa, respectivement. Des études ont également montré une modification de la nature de la rupture, passant de fragile à ductile [130].

Le tableau montre également clairement l'effet de la modification chimique de la surface de la fibre laine,

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANIKES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques des présents composites renforcés de fibre Laine

Fibre	Teneur moyenne en fibres (% en poids)	Résistance ultime à la flexion (MPa)
Laine mérinos	5	8.2 ± 1.5
Laine mérinos nettoyée	5	9.1 ± 0.6
Laine mérinos traitée	5	8.2 ± 0.8
Laine de tapis	5	8.1 ± 2.3
Laine de tapis nettoyée	5	8.1 ± 1.5
Laine de tapis traitée	5	8.7 ± 0.5
Matrice géopolymère	0	5.8 ± 1.8

Cette recherche [132] a utilisé des fibres naturelles sous la forme de fibres de feuilles d'ananas. Les fibres de feuilles d'ananas ont été obtenues auprès des agriculteurs de Blitar dans un état déjà prêt. Avant d'être utilisées, les fibres d'ananas ont été traitées par immersion dans une solution de NaOH à 5 % pendant 6 heures. , les fibres ont été coupées en longueurs de 10 mm, 20 mm et 30 mm. La composition mélangée avec la concentration de NaOH était de 14 et 16 M. Les longueurs de fibres utilisées étaient de 10 mm, 20 mm et 30 mm. Le pourcentage de consommation de fibres était de 0 %, 0,25 % et 0,50 % d'un poids mélangé.

La figure III.16 illustre la relation entre la composition de la fibre 14 M et la résistance à la flexion. La longueur de la fibre de 30 mm avec un pourcentage de 0,50 % de fibre présente une résistance à la flexion de 7,187 MPa. La figure III.17 montre la relation entre le pourcentage de fibres de 16 M et la résistance à la flexion. La longueur de la fibre de 30 mm avec un pourcentage de fibre de 0,50 % montre une résistance à la flexion de 9,209 MPa.

Les résultats ci-dessus montrent que plus on utilise de fibres, plus la résistance à la flexion est importante. L'augmentation de la résistance à la flexion est générée par les dimensions plus importantes du composite. Plus la fibre est utilisée, plus la dimension du composite est grande. Toutefois, il convient de noter que si le pourcentage de fibres utilisées n'est pas équilibré par rapport au volume de la matrice, la résistance à la flexion peut s'affaiblir.

CHAPITRE III : PROPRIETES MECANQUES DES GEOPOLYMERES RENFORCES AVEC DES FIBRES NATURELLES

Les composites avec une longueur de fibres de 30 mm ont une résistance à la flexion plus élevée que les composites avec une longueur de fibres de 10mm et 20mm. Cela s'explique par le fait que la longueur des fibres de 30 mm peut être répartie correctement et uniformément au moment de la fabrication du composite, ce qui permet à la liaison entre le renforcement des fibres d'ananas et la matrice de s'effectuer parfaitement. Ce processus peut directement augmenter la résistance à la flexion du composite renforcé par des fibres d'ananas. Le composite de 30 mm avec un pourcentage de fibres de 0,50 % atteint sa résistance maximale parce qu'il contient plus de fibres que le pourcentage de fibres de 0,25 %. Ainsi, la répartition de la charge sera meilleure et la liaison de la matrice avec les fibres sera également meilleure, ce qui augmentera la valeur de la résistance à la flexion.

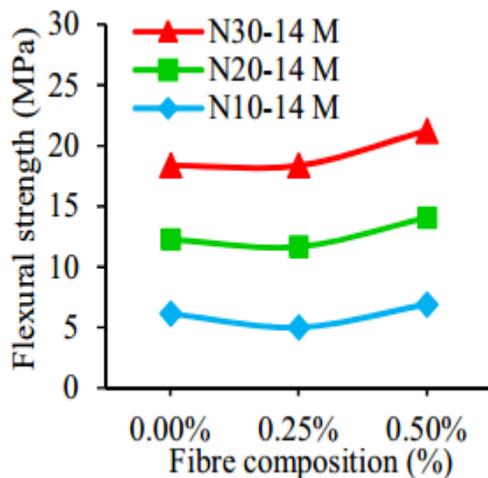


Figure III.16: la relation entre la composition de la fibre 14 M et la résistance à la flexion)

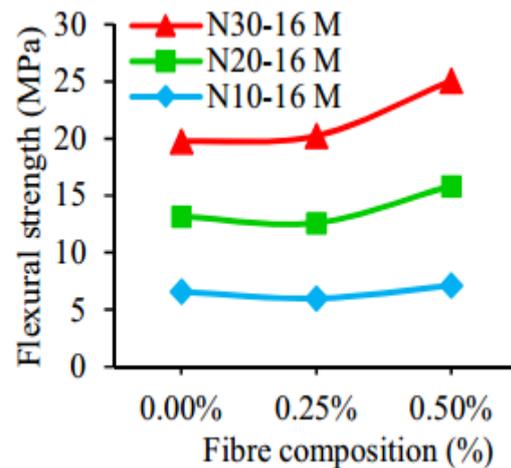


Figure III.17 : la relation entre la composition de la fibre 16 M et la résistance à la flexion

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le comportement mécanique des composites géopolymères renforcés par des fibres naturelles est un domaine de recherche en pleine expansion, motivé par la nécessité de développer des matériaux de construction plus durables et respectueux de l'environnement. L'incorporation de fibres naturelles dans une matrice géopolymère vise à améliorer les propriétés mécaniques du matériau composite résultant, telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion. Cependant, ce comportement mécanique est influencé par de nombreux facteurs interdépendants :

Type et teneur en fibres naturelles : La nature de la fibre (jute, lin, coco, sisal, etc.) et la quantité ajoutée à la matrice ont un impact direct sur les propriétés finales. Différentes fibres possèdent des caractéristiques intrinsèques variables en termes de résistance à la traction, module d'Young et allongement à la rupture. Le pourcentage de fibres incorporées affecte la distribution des contraintes au sein du composite.

Longueur et orientation des fibres : La longueur des fibres influence l'efficacité du transfert de charge entre la matrice et le renfort. Des fibres plus longues peuvent généralement mieux distribuer les contraintes. L'orientation des fibres par rapport à la direction de la charge appliquée est également cruciale. Un alignement optimal des fibres dans le sens de la contrainte permet une meilleure exploitation de leur résistance.

Adhérence interfaciale fibre-matrice : La qualité du lien entre la surface des fibres naturelles et la matrice géopolymère est un facteur déterminant. Une bonne adhérence permet un transfert de charge efficace, tandis qu'une mauvaise adhérence peut entraîner des zones de faiblesse et une rupture prématurée.

Traitement des fibres naturelles : Les fibres naturelles sont souvent soumises à des traitements chimiques (alcalinisation, silanisation, etc.) ou physiques pour modifier leur surface, améliorer leur compatibilité avec la matrice géopolymère et ainsi renforcer l'adhérence interfaciale. Un traitement approprié peut significativement améliorer les propriétés mécaniques du composite.

Propriétés de la matrice géopolymère : La composition chimique du géopolymère (source d'aluminosilicate, activateur alcalin), les conditions de cure (température, durée) et l'âge du matériau influencent également le comportement mécanique global du composite.

CONCLUSION GENERALE

Présence de vides et défauts : Une mauvaise dispersion des fibres ou un piégeage d'air lors du processus de fabrication peuvent créer des vides et des défauts qui agissent comme des points d'initiation de rupture sous charge mécanique.

L'effet de l'ajout de fibres naturelles sur la résistance mécanique n'est pas toujours univoque. Dans certains cas, une faible quantité de fibres bien dispersées peut entraîner une légère augmentation de la résistance. Cependant, une forte concentration ou une mauvaise dispersion des fibres peut créer des zones de faiblesse et entraîner une diminution de la résistance à la compression. Le traitement des fibres visant à améliorer l'adhérence peut avoir un effet positif sur cette propriété.

En conclusion, le comportement mécanique des composites géopolymères renforcés par des fibres naturelles est complexe et dépend d'une interaction de plusieurs facteurs. Un choix judicieux du type et de la quantité de fibres, un traitement approprié pour optimiser l'adhérence et une bonne mise en œuvre sont essentiels pour exploiter pleinement le potentiel de ces matériaux prometteurs pour des applications de construction durables. La recherche continue de s'efforcer de comprendre et d'optimiser ces interactions afin de développer des composites géopolymères renforcés par des fibres naturelles aux performances mécaniques améliorées et durables.

Ces conclusions ouvrent des perspectives pour des applications pratiques et de futures recherches visant à optimiser et à promouvoir l'utilisation des composites géopolymères renforcés par des fibres naturelles dans divers secteurs industriels.

En synthèse, cette étude met en lumière le potentiel de ces matériaux pour répondre aux exigences contemporaines de durabilité et de performance dans le secteur de la construction, tout en encourageant une approche plus respectueuse de l'environnement.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Li Y, Maimait A, Cheng J, Duan Y, Chen Y, Dong H. Properties of Fiber-reinforced Geopolymer mortar using coal gangue and Aeolian sand. *Materials (Basel)*. 2024;17:3225.
- [2] J.S.J. Van Deventer, J.L. Provis, P. Duxson, G.C. Lukey, Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of Hazardous Materials* 139. 506-513. 2007.
- [3] V.F.F. Barbosa, Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials* 2. 309-317. 2000.
- [4] H. Rahier, W. Simon, V. B. Mele, M. Biesemans, Low-temperature synthesized alumino silicate glass: Part III Influence of the composition of the silicate solution on production, structure and properties. *Journal of Materials Science* 32.2237-2247.1997.
- [5] J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of thermal analysis*. 37. 1633-1656. 1991.
- [6] M. Ahmed Hassen Mahmoud, M. Adda Benikhlef Zouheir, Synthèse et caractérisation de liant hydrauliques, Université d'Ain Témouchent de Belhadj Bouchaib. 2022.
- [7] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, Geopolymer technology: The current state of the art, *J. Mater. Sci.* 42. 2917–2933.
- [8] J. L. Provis et al, Nanostructural characterization of geopolymers by advanced beamline techniques, *Cem. Concr. Compos.* 36 .56–64.
- [9] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. Van Deventer, Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 269. 47–58. 2005.
- [10] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 , *Cem. Concr. Res.* 37. 512–518. 2007
- [11] J. Henon, Elaboration de matériaux poreux géopolymères à porosité multi-échelle et contrôlée, 2012.
- [12] B. Lothenbach, K. Scrivener, R. D. Hooton, Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 41. 1244-1256. 2011.
- [13] H. Xu, J.S.J. Van Deventer, The Geopolymerisation of Alumino Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*. 59. 247–266. 2000.
- [14] J. Henon, Elaboration des matériaux poreux géopolymères a porosité multi-échelle et contrôlée. Thèse de doctorat, université de limoges, France, 2012.
- [15] C. K. Ma, A. Z. Awang, & W. Omar, Structural and material performance of geopolymer concrete: a review. *The Journal of Construction and Building Materials*, 186. 90–102. 2018.
- [16] T. W. Cheng, J. P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Journal of Minerals Engineering*. 16. 205 – 210. 2003.
- [17] Z. Zhang, X. Yao, H. Zhu, S. Hua, & Y. Chen, Activating process of geopolymer source material: kaolinite. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 24. 132–136. 2009.
- [18] B. R. Ilić, A. A. Mitrović, & L. R. Miličić, Thermal Treatment of Kaolin Clay To Obtain metakaolin. *The Journal Hemijska industrija*. 64. 351–356. 2010.
- [19] B. Mehsas, M. Siline, & L. Zeghichi, Development of supplementary cementitious materials from Algerian kaolin: elaboration of metakaolin and assessment of pozzolanicity. *The Journal of Innovative Infrastructure Solutions*. 6. 1–12. 2021.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [20] R. Siddique, P. Cachim, Waste and supplementary cementitious materials in Concrete: characterisation, properties and applications. Wood head Publishing. 2018.
- [21] B. Mehsas, M. Siline, & L. Zeghichi, The effect of using low reactive metakaolin on performances of geopolymer binder. *The Journal of Innovative Infrastructure Solutions*. 7. 233. 2022.
- [22] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Journal of Fuel*, 82. 2259–2265. 2003.
- [23] P. Priyadharshini, K. Ramamurthy, & R. G. Robinson, Excavated soil waste as fine aggregate in fly ash based geopolymer mortar. *Journal of Applied Clay Science*. 146. 81–91. 2017.
- [24] G. F. Huseien, J. Mirza, M. Ismail, S. K. Ghoshal & M. A. M. Ariffin, Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. *Ain Shams Engineering Journal*. 9. 1557–1566. 2018.
- [25] R. Redden, N. Neithalath, Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. *The Journal of Cement and Concrete Composites*. 45. 46–56. 2014.
- [26] M. Cyr, R. Idir, & T. Poinot, Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science & Technology*. 47. 2782 – 2797. 2012.
- [27] G.N. Popel, Synthesis of a mineral-like stone on alkaline aluminosilicate binders to produce the materials with the increased corrosion resistance. In: Krivenko, editor. 2nd International conference on alkaline cements and concretes, Kiev. Ukraine 208–219. 1999.
- [28] L. Weng, K. Sagoe-Cretnsil, T. Broun, S. Song, Effects of aluminates on the formation of geopolymers. *Materials Sciences and Engineering B* 117. 163-168. 2005.
- [29] B.-h. Mo, et al, Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied Clay Science*. 99. 144-148. 2014.
- [30] P. Rovnaník, Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 24. 1176-1183. 2010.
- [31] A. Sindhunata, Conceptual model of geopolymerisation. Bachelor of engineering (Hong), University of Melbourne, Department of chemical and biomolecular engineering. PhD thesis 262. 2006.
- [32] M.S. Muñoz-Villarreal, et al, The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. *Materials Letters*. 65. 995-998. 2011.
- [33] P. Duxson, et al, The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 292. 8-20. 2007.
- [34] P. De Silva, et al, Kinetic of geopolymerisation: role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cement and Concrete Research*. 37. 512- 518. 2007.
- [35] X. Yao, Z. Zhang, H. Zhu, Y. Chen, Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochemica Acta*. 493 .49–54. 2009.
- [36] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, C. Yue, Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*. 43 .218–223. 2009.
- [37] D.L.Y. Kong, J.G. Sanjayan, K. Sagoe-Cretnsil, Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly-ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* 37. 1583–1589. 2007.
- [38] F. Madai, F. Kristaly, G. Mucsi, G.M. F. Má dai, F. Kristály, Microstructure, mineralogy and physical properties of ground fly ash based geopolymers, *Ceram. Silikaty*. 59 .70–79. 2015.
- [39] F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, et P. Chindaprasit, *Handbook of alkali-activated cements, Mortars and Concretes*. Elsevier, 2014.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [40] R. Bligh et T. Glasby, development of geopolymer precast floor Panels for the global change institute at university of Queensland. 7.
- [41] K.-K. Yun et P. Choi, Causes and controls of cracking at bridge deck overlay with very-early strength latex-modified concrete, *Construction and Building Materials*. 56. 53-62. 2014.
- [42] R. Pouhet, Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers, phd thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2015. Consulté le: 26 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01297848>.
- [43] A. Islam, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, N. B. Ghazali, And S. Yusoff, Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 152. 964–977. 2017.
- [44] M. Boumediene, Etude des propriétés des matériaux géopolymères étuvés, thèse doctorat, université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2021/2022.
- [45] V. Chandrakanth Srikanth Koniki, Effect of review elevated temperature on geo-polymer concrete – a review. August 2020 E3S Web of Conferences 184(2):01090.
- [46] J. Davidovits, Chemistry and applications. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, Geopolymer technology: the current state of the art France. 41–44 .2008.
- [47] D. Hardjito. and B. V. Rangan, Development and properties of low calcium fly ash based geopolymer, Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia. 1-90. 2005.
- [48] Matériaux composites, Chapitre 1, Généralités sur les matériaux composites.
- [49] L. Gornet. Généralités sur les matériaux composites. École d'ingénieur. France. 2008.
- [50] E. Dib, J-F. Caron, I. Stefanou, W. Raphael, F. Kaddah, Analyse numérique du comportement mécanique des ponts renforcés par matériaux composites ; *Comptes Rendus des JNC 20 – Ecole des Ponts Paris Tech*. 28-30. 2017.
- [51] A.G. Evans, Perspectives in the development of high-toughness ceramics, *J. Amer. Ceram. Soc.* 73 187-205. 1990.
- [52] A.W.A. El-Shennawi, E.M.A. Hamzawy, G.A. Khater, A.A. Omar, Crystallization of some aluminosilicate glasses, *Ceramics Inter.* 27. 725-730. 2001.
- [53] P. Colomban, G. Gouadec, Le composite idéal à fibres et matrice (Oxyde) : Comment concilier des qualités physiques et chimiques contradictoires ?, *Annales de Chimie – Science des Matériaux*. 30. 673-688. 2005.
- [54] D. Hammiche, A. Boukerrou, Y. Grohens, N. Guermazi, F.E. Arrakhiz, Mechanical properties and biodegradation of biocomposites based on poly (hydroxybutyrate-co-valerate) and alfa fibers, *Journal of Polymer Research*. 27. 1-10. 2020.
- [55] <https://fr.scribd.com/document/791420729/BE-les-fibres-2>
- [56] N. Makhloufi, Simulation numérique de la fissuration des composites par fatigue, Batna, 2012.
- [57] B. Goytino, J.-P. Gay, Importance respective des périodes de formation, de remplissage et de maturation du grain dans la composition du rendement, *Physiologie et Production Du Maïs*, eds INRA, Paris, France, 207-214. 1991.
- [58] <http://laboitadoc.majeloc.ch> › Page2 › Docs
- [59] N. Ghebrid, Etude des problèmes de conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère pigmenté de dioxyde de Tit, 2018.
- [60] LAFARGE ; Le béton et la démarche HQE.
- [61] S. Bensaid, Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes, Université de Nantes, 2006.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [62] <https://fr.scribd.com/document/791347826/Chapitre-I>
- [63] K. Charlet, C. Baley, C. Morvan, JP. Jernot, M. Gomina, J. Breard, Characteristics of herme's flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 38.1912–1921.2007.
- [64] H. Ait, M. Menad, Nesrine, Etude de la possibilité de l'utilisation du jute en remplacement du verre dans le confinement interne en double hélice avec TRC de cylindres en béton armé. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou. 2020.
- [65] Centre d'animation régional en matériaux avancés - CARMA, Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origines renouvelable. CARMA. 2006.
- [66] <https://journals.openedition.org/physio-geo/696?gathStatIcon=true&lang=en>
- [67] M. Merzoud, M.F. Habita, A. Gouasmia, Influence d'un traitement Hygrothermique sur les caractéristiques Physico-mécaniques de composites cimentaire à base de Diss, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria).12-14. 2009.
- [68] A. KRIKER, Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec, Thèse de Doctorat d'Etat. ENP. 166. 2005.
- [69] B. Abdelmadjid, Etude du comportement mécanique d'un béton à base de fibres métallique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2022.
- [70] S. Ramarad, Preparation and properties of kenaf bast fiber filled (plasticized) poly (lactic acid) composites, Master, 2008.
- [71] M.J John, S. Thomas, Rubber Nanocomposites: Preparation, Properties and Applications Chapitre 8, Sabu Thomas and Ranimol Stephen (Ed), John Wiley & Sons Pte Ltd, 2010.
- [72] M. Nicolas, Le Moigne Mecanismes de gonflement et de dissolution des fibres de cellulose. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [73] A. Merzoug, B. Bouhamida, Z. Sereir, A. Bezazi, A. Kilic, et Z. Candan, Quasi-static and dynamic mechanical thermal performance of date palm/glass fiber hybrid composites, *J. Ind. Text.* 152808372095803. 2020.
- [74] X. Zhou et al, Lightweight tannin foam/composites sandwich panels and the coldest tannin adhesive to assemble them, *Ind. Crops Prod.* 43. 255-260. 2013.
- [75] Z. Sun, S. Shi, X. Hu, X. Guo, J. Chen, et H. Chen, Short-aramid-fiber toughening of epoxy adhesive joint between carbon fiber composites and metal substrates with different surface morphology, *Compos. Part B Eng.* 77. 38-45. 2015.
- [76] A. Pizzi, Tannin-Based Biofoams-a Review, *J. Renew. Mater.* 7. 477-492. 2019.
- [77] A. Monti, Elaboration et caractérisation mécanique d'une structure composite sandwich à base de constituants naturels, Thèse de l'Université du Maine, 2017.
- [78] M. Idriss, Analyse expérimentale et par élément finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés, Thèse de l'Université du Maine, 2013.
- [79] Etude du comportement en flexion d'un panneau à fibres naturelles courtes. Thèse de doctorat
- [80] A. Petras et M. P. F. Sutcliffe, Failure mode maps for honey comb sandwich panels, *Compos. Struct.* 44. 237-252. 1999.
- [81] B. Gabriele, T. Cerchiara, G. Salerno, G. Chidichimo, M.V. Vetere, C. Alampi, M.C. Gallucci, C. Conidi, A. Cassano, A new physical-chemical process for the efficient production of cellulose fibers from Spanish broom (*Spartium junceum* L.), *Bio resource technology*, 101.724-729. 2010.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [82] D. Sedan, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France. 2007.
- [83] L.Y. Mwaikambo, M.P. Ansell, Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization, *Journal of applied polymer science*. 84. 2222-2234. 2002.
- [84] M. Kabir, H. Wang, K. Lau, F. Cardona, Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, *Composites Part B: Engineering*. 43 2883-2892. 2012.
- [85] N. Chand, M. Fahim, *Tribology of natural fiber polymer composites*, Wood head publishing 2020.
- [86] V.V. Do Thi, *Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non*, Grenoble, 2011.
- [87] R. Kozłowski, M. Władysław-Przybylak, Uses of natural fiber reinforced plastics, *Natural fibers, plastics and composites*. 249-274. 2004.
- [88] K. Borchani, *Développement d'un composite à base d'un polymère biodégradable et de fibres extraites de la plante d'Alfa*, Lyon. 2016.
- [89] P.K. Kushwaha, R. Kumar, Effect of silanes on mechanical properties of bamboo fiber epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29. 718-724. 2010.
- [90] <https://fr.scribd.com/document/791420729/BE-les-fibres-2>
- [91] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, V. Yavna, V. Mischinenko, A. Kukharskii, A. Kruglikov, A. Kolodina, G. Yalovega, Effect of pre-treatment of flax tows on mechanical properties and microstructure of natural fiber reinforced geopolymer composites. *Environ. Technol. Innov.* 20. 101105. 2020
- [92] K. Korniejenko, E. aczek, E. Pytlak, M. Adamski, Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Proc. Eng.* 151. 388–393. 2016.
- [93] R. Fediuk, High-strength fibrous concrete of russian far east natural materials. In proceedings of the IOP conference series: Materials Science and Engineering, Tomsk, Russia, 116. 9–11. 2015.
- [94] A. Sabu, L. Karthi, Experimental study on hybrid fibre reinforced geopolymer concrete. In Proceedings of the National Conference on Structural Engineering and Construction Management, Angamaly, India. 46. 213–220. 2020.
- [95] V. Bindiganavile, J.R.A. Goncalves, Y. Boluk, Crack growth resistance in fibre reinforced geopolymer concrete exposed to sustained extreme temperatures. In *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd.: Stafa-Zurich, Switzerland. 711. 511–518. 2016, ISBN 9783035710441.
- [96] R. Spirtas, E.F. Heineman, L. Bernstein, G.W. Beebe, R.J. Keehn, A. Stark, J. Benichou, Malignant mesothelioma: attributable risk of asbestos exposure, *Occup. Environ. Med.* 51.804–811. 1994.
- [97] L. Yan, N. Chouw, K. Jayaraman, Lateral crushing of empty and polyurethane-foam filled natural flax fabric reinforced epoxy composite tubes, *Compos. Part B* .63. 15–26. 2014.
- [98] L. Yan, B. Kasal, L. Huang, A review of recent research on the use of cellulosic fibers, their fiber fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, *Compos. Part B* 92. 94–132. 2016.
- [99] K. Pickering, M. Efendy, T. Le, A review of recent developments in natural fiber composites and their mechanical performance, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.* 83. 98–112. 2016.
- [100] T. Alomayri, F.U.A. Shaikh and I.M. Low, Thermal and mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites, *Journal of Material Science*. 48. 6746-6752. 2013.
- [101] T. Alomayri, F.U.A., Shaikh and I.M. Low, Effect of fabric orientation on mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites, *Materials and Design*. 57. 360-365. 2014.
- [102] T. Alomayri and I.M. Low, Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites, *Journal of Asian Ceramic Societies*. 1. 30- 34. 2013.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [103] T. Alomayri, F.U.A. Shaikh and I.M. Low, Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites, *Composites: Part B*. 60. 36-42. 2014.
- [104] K. Korniejenko, E. Frączek, E. Pytlak and M. Adamski, Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers, *Procedia Engineering*. 151. 388–393. 2016.
- [105] M. Sally Hashim, F. Nada Mahdi, Compressive Strength of Geopolymer Mortar Reinforced with Rice Husk Fibers, *Journal of Engineering*. 2024.
- [106] R.A.J. Malenab, J.P.S. Ngo and M.A.B. Promentilla, Chemical Treatment of Waste Abaca for Natural Fiber- Reinforced Geopolymer Composite, *Materials*. 10. 579-598. 2017.
- [107] E. A. Correia, S. M. Torres, M. E. O. Alexandre, K. C. Gomes, N. P. Barbosa and S. DE. Barros, Mechanical Performance of Natural Fibers Reinforced Geopolymer Composites, *Materials Science Forum*. 758. 139-145. 2013.
- [108] S. Mishra, A.K. Mohanty, L.T. Drzal, M. Misra and G. Hinrichsen: *Macromol. Mater. Eng.* 289. 955-974. 2004.
- [109] R.M.N. Arib, S.M. Sapuan, M.M.H.M. Ahmad, M.T. Paridah and H.M.D. Khairul Zaman: *Materials and Design*. 27. 391-396. 2006.
- [110] 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*. 15. 2021.
- [111] 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*. 258. 119697. 2020,
- [112] K. Korniejenko, E. Frączek, E. Pytlak, M. Adamski, Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers, *Procedia Engineering*. 151.388 – 393. 2016.
- [113] A.M. Abdulrhman Dhaif Allah, W. Ronghui and Ghasan Fahim Huseien , Mechanical Properties of Natural Jute Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete: Effects of Various Lengths and Volume Fractions, *J. Compos. Sci.*, 8, 450. 2024
- [114] O. Ayeni, A.A. Mahamat, N.L. Bih, T.T. Stanislas, I. Isah, H. Savastano Junior, E. Boakye, A.P. Onwualu, Effect of Coir Fiber Reinforcement on Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Composite. *Appl. Sci*. 12. 5478. 2022.
- [115] A. Wongsu, R. Kunthawatwong, S. Naenudon, V. Sata, P. Chindaprasirt, Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar. *Construct. Build. Mater.* 241. 118143. 2020.
- [116] K. Korniejenko, M. Fraczek, E. Pytlak, M. Adamski, Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers. *Procedia Eng.* 151. 388–393. 2016.
- [117] A. Workiye, E. Woldsenbet, Development of Maize Stalk Cellulose Fiber Reinforced Calcined Kaolinite Clay Geopolymer Composite. *Proceed. Eng. Tech. Innov.* 16. 30–38. 2020.
- [118] 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*. 57. 360–365. 2014.
- [119] S. Samal, N.P. Thanh, I. Petrikova and B. Marvalova, Improved Mechanical Properties of Various Fabric-Reinforced Geocomposite at Elevated Temperature, *The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 67. 1478-1485.2015.
- [120] M. Welter, M. Schmücker and K.J.D. MacKenzie, Evolution of the fibre-matrix interactions in basalt-fibre-reinforced geopolymer-matrix composites after Heating, *Journal of Ceramic Science and Technology*. 06. 17-24. 2015.
- [121] A. Celik, K. Yilmaz, O. Canpolat, M.M. AlMashhadani, Y. Aygörmez and M. Uysal, Hightemperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- geopolymer composites reinforced with synthetic fibers, *Construction and Building Materials*. 187. 1190-1203. 2018.
- [122] M. Ziada, S. Erdem, Y. Tammam, S. Kara and R.A.G. Lezcano, The effect of basalt fiber on mechanical, microstructural, and high-temperature properties of fly ash-based and basalt powder waste-filled sustainable geopolymer mortar, *Sustainability*.13. 12610. 2021.
- [123] T. Alomayri, F.U.A. Shaikh, I.M. Low, Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites.
- [124] J. Sim, C.Park, D.Y. Moon, Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, *Compos Part B: Eng*. 36. 504-512. 2006.
- [125] G. Lazorenkoa, A. Kasprzhitskiia, A. Kruglikova, V. Mischinenkoa, V. Yavnaa, Sustainable geopolymer composites reinforced with flax tows, *Ceramics International* xxx .xxx–xxx. Xxxx.
- [126] O. Ayeni, A.A. Mahamat, N.L. Bih, T.T. Stanislas, I. Isah, H. Savastano Junior, E. Boakye, A.P. A.P. Onwualu, Effect of Coir Fiber Reinforcement on Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Composite. *Appl. Sci*. 12. 5478. 2022.
- [127] S. Kavipriya, C.G. Deepanraj, S. Dinesh, N. Prakash, N. Lingeshwaran, S. Ramkumar, Flexural strength of Lightweight geopolymer concrete using sisal fibres. *Mater. Today Proc*. 47, 5503–5507. 2021.
- [128] 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*. 173. 10–16. 2018.
- [129] R. Chen, S. Ahmari, L.Y. Zhang, Utilization of sweet sorghum fiber to reinforce fly ash-based geopolymer, *J. Mater. Sci*. 49. 2548-2558. 2014.
- [130] A.N. Murri, V. Medri and E. Landi, Production and thermomechanical characterization of wool–geopolymer composites, *Journal of American Ceramic Society*. 100. 2822- 2831. 2017.
- [131] M. Alzeer and K.J.D. MacKenzie, Synthesis and mechanical properties of new fibre-reinforced composites of inorganic polymers with natural wool fibres, *Journal of Material Sciences*. 47. 6958-6965. 2012.
- [132] R. Zulfiati, Saloma and Y. Idris, Mechanical properties of fly ash-based geopolymer with natural fiber, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1198, Issue 8.