

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Par

- **Maza Imene**
- **Deghache kheireddine**

Intitulé

*Etude des propriétés physiques et mécaniques des géopolymères contenant
différentes fibres*

Soutenu le : 27 Juin 2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Ammar Noui</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Kessal Oussama</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Ben Ammar Abdelhafid</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Benoudeh Abdellatif</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Au début nous remercions Allah de nous avoir donné le courage et la détermination et le pouvoir et la patience nécessaires pour finaliser ce mémoire.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance et nos remerciements à nos encadrant de mémoire, Dr. Belkadi Abderraouf et Dr. Kessal Oussama, qui ont encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous. Nous remercions nos sœurs et frères, pour leurs encouragements.

Enfin, nous remercions nos amis qui ont toujours été là pour nous. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, on présente nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Dédicace

Je tiens à dédier cet humble travail à :

A ma tendre mère Salima et mon très cher père Daoud, qui ont été le meilleur soutien et m'ont soutenu moralement et matériellement, pour leurs efforts sur moi pour arriver à ce que je suis maintenant.

A mes chers encadrant Dr. Belkadi Abderraouf et Dr. Kessal Oussama, qui ont toujours été là pour m'aider et répondre à mes questions.

A ma sœur qui m'a beaucoup aidé à préparer cette présentation et à mes frères qui m'ont encouragé.

A mon binôme : Kheireddine Deghache, qui ne m'a pas déçu et était le meilleur binôme.

A mes meilleurs amis :

Amira qui est toujours à mes côtés pour me soutenir et Saida pour leurs aides et encouragements.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
I.1. Introduction	2
I.2. Historique.....	2
I.3. Définition des géopolymères.....	5
I.4. Différents types de géopolymère.....	6
I.4.1. Géopolymère à base de laitier.....	6
I.4.2. Géopolymère à base des roches volcaniques.....	6
I.4.3. Ciment géopolymère à base de cendres volantes.....	6
I.5. Microstructure du liant géopolymère à l'état durci	7
I.6. Formulation des géopolymères	8
I.7. Application des géopolymères	8
I.8. Avantages et inconvénients des géopolymères.....	9
I.9. Conclusion	10
II.1. Introduction.....	11
II.2. Effet de la nature des fibres sur les géopolymères.....	11
II.2.1. Impact des fibres sur les propriétés rhéologiques	11
II.2.2. Impact des fibres sur les propriétés mécaniques.....	13
II.2.3. Propriétés de durabilité	16
II.3. Conclusion	18
III.1. Introduction.....	20
III.2. Granulats.....	20
III.2.1. Sable.....	20
III.3. Activateurs	21
III.3.1. Silicate de sodium liquide	21
III.3.2. NaOH.....	22
III.4. Poudres utilisées	24
III.4.1. Métakaolin.....	24
III.4.2. Laitier granulé de haut fourneau	24
III.5. Fibres	25
III.6. Formulation des géopolymères	26
III.7. Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes	27
III.7.1. Malaxage du mortier	27
III.7.2. Préparation des éprouvettes	29
III.7.3. Conservation.....	30
III.8. Résistances mécaniques	31

III.8.1.	Résistance à la compression	31
III.8.2.	Résistance à la flexion.....	31
III.9.	Variations dimensionnelles et pondérale	Error! Bookmark not defined.
III.10.	Conclusion.....	32
IV.1.	Introduction.....	32
IV.2.	Résultats et discussion	32
IV.2.1.	Résistance à la compression	32
IV.2.2.	Résistance à la flexion.....	33
IV.2.3.	Résistance à haute température.....	34
IV.2.4.	Observation visuelle.....	36
IV.3.	Conclusion	37

Liste des Figures :

Figure I. 1 Pavé de géopolymère en Australie (www.zeobond.com).....	3
Figure I. 2 Buildings made with alkali-activated binders based on slag a) in Lipetsk (Russia) from 1994 b)in Mariupol (Ukraine) 1960.....	4
Figure I. 3 formulation de géopolymère.....	5
Figure I. 4 Micrographies SEM de (a-e) sections polies et (f) surface de fracture des échantillons (flèches indiquant les grains de Na-Al-Si).....	7
Figure I. 5 [87].....	9
Figure I. 6 Queensland, Australie, 2013.[89].....	9
Figure II. 7 [87].....	12
Figure II. 8 la [87] pores.....	14
Figure II. 9 [87] (a).....	14
Figure II. 10 fibre d'acier.....	14
Figure II. 11 d'acier, [87].....	14
Figure I. 12 [87].....	14
Figure I. 13 [87].....	14
Figure I. 14 [87].....	14
Figure I. 15 [87].....	14
Figure I. 16 [87].....	14
Figure I. 17 [87].....	14
Figure I. 18 [87].....	14
Figure I. 19 [87].....	14
Figure I. 20 [87].....	14
Figure I. 21 [87].....	14
Figure I. 22 [87].....	14
Figure I. 23 [87].....	14
Figure I. 24 [87].....	14
Figure I. 25 [87].....	14
Figure I. 26 [87].....	14
Figure I. 27 [87].....	14
Figure I. 28 [87].....	14
Figure I. 29 [87].....	14
Figure I. 30 [87].....	14
Figure I. 31 [87].....	14
Figure I. 32 [87].....	14
Figure I. 33 [87].....	14
Figure I. 34 [87].....	14
Figure I. 35 [87].....	14
Figure I. 36 [87].....	14
Figure I. 37 [87].....	14
Figure I. 38 [87].....	14
Figure I. 39 [87].....	14
Figure I. 40 [87].....	14
Figure I. 41 [87].....	14
Figure I. 42 [87].....	14
Figure I. 43 [87].....	14
Figure I. 44 [87].....	14
Figure I. 45 [87].....	14
Figure I. 46 [87].....	14
Figure I. 47 [87].....	14
Figure I. 48 [87].....	14
Figure I. 49 [87].....	14
Figure I. 50 [87].....	14
Figure I. 51 [87].....	14
Figure I. 52 [87].....	14
Figure I. 53 [87].....	14
Figure I. 54 [87].....	14
Figure I. 55 [87].....	14
Figure I. 56 [87].....	14
Figure I. 57 [87].....	14
Figure I. 58 [87].....	14
Figure I. 59 [87].....	14
Figure I. 60 [87].....	14
Figure I. 61 [87].....	14
Figure I. 62 [87].....	14
Figure I. 63 [87].....	14
Figure I. 64 [87].....	14
Figure I. 65 [87].....	14
Figure I. 66 [87].....	14
Figure I. 67 [87].....	14
Figure I. 68 [87].....	14
Figure I. 69 [87].....	14
Figure I. 70 [87].....	14
Figure I. 71 [87].....	14
Figure I. 72 [87].....	14
Figure I. 73 [87].....	14
Figure I. 74 [87].....	14
Figure I. 75 [87].....	14
Figure I. 76 [87].....	14
Figure I. 77 [87].....	14
Figure I. 78 [87].....	14
Figure I. 79 [87].....	14
Figure I. 80 [87].....	14
Figure I. 81 [87].....	14
Figure I. 82 [87].....	14
Figure I. 83 [87].....	14
Figure I. 84 [87].....	14
Figure I. 85 [87].....	14
Figure I. 86 [87].....	14
Figure I. 87 [87].....	14
Figure I. 88 [87].....	14
Figure I. 89 [87].....	14
Figure I. 90 [87].....	14
Figure I. 91 [87].....	14
Figure I. 92 [87].....	14
Figure I. 93 [87].....	14
Figure I. 94 [87].....	14
Figure I. 95 [87].....	14
Figure I. 96 [87].....	14
Figure I. 97 [87].....	14
Figure I. 98 [87].....	14
Figure I. 99 [87].....	14
Figure I. 100 [87].....	14
Figure I. 101 [87].....	14
Figure I. 102 [87].....	14
Figure I. 103 [87].....	14
Figure I. 104 [87].....	14
Figure I. 105 [87].....	14
Figure I. 106 [87].....	14
Figure I. 107 [87].....	14
Figure I. 108 [87].....	14
Figure I. 109 [87].....	14
Figure I. 110 [87].....	14
Figure I. 111 [87].....	14
Figure I. 112 [87].....	14
Figure I. 113 [87].....	14
Figure I. 114 [87].....	14
Figure I. 115 [87].....	14
Figure I. 116 [87].....	14
Figure I. 117 [87].....	14
Figure I. 118 [87].....	14
Figure I. 119 [87].....	14
Figure I. 120 [87].....	14
Figure I. 121 [87].....	14
Figure I. 122 [87].....	14
Figure I. 123 [87].....	14
Figure I. 124 [87].....	14
Figure I. 125 [87].....	14
Figure I. 126 [87].....	14
Figure I. 127 [87].....	14
Figure I. 128 [87].....	14
Figure I. 129 [87].....	14
Figure I. 130 [87].....	14
Figure I. 131 [87].....	14
Figure I. 132 [87].....	14
Figure I. 133 [87].....	14
Figure I. 134 [87].....	14
Figure I. 135 [87].....	14
Figure I. 136 [87].....	14
Figure I. 137 [87].....	14
Figure I. 138 [87].....	14
Figure I. 139 [87].....	14
Figure I. 140 [87].....	14
Figure I. 141 [87].....	14
Figure I. 142 [87].....	14
Figure I. 143 [87].....	14
Figure I. 144 [87].....	14
Figure I. 145 [87].....	14
Figure I. 146 [87].....	14
Figure I. 147 [87].....	14
Figure I. 148 [87].....	14
Figure I. 149 [87].....	14
Figure I. 150 [87].....	14
Figure I. 151 [87].....	14
Figure I. 152 [87].....	14
Figure I. 153 [87].....	14
Figure I. 154 [87].....	14
Figure I. 155 [87].....	14
Figure I. 156 [87].....	14
Figure I. 157 [87].....	14
Figure I. 158 [87].....	14
Figure I. 159 [87].....	14
Figure I. 160 [87].....	14
Figure I. 161 [87].....	14
Figure I. 162 [87].....	14
Figure I. 163 [87].....	14
Figure I. 164 [87].....	14
Figure I. 165 [87].....	14
Figure I. 166 [87].....	14
Figure I. 167 [87].....	14
Figure I. 168 [87].....	14
Figure I. 169 [87].....	14
Figure I. 170 [87].....	14
Figure I. 171 [87].....	14
Figure I. 172 [87].....	14
Figure I. 173 [87].....	14
Figure I. 174 [87].....	14
Figure I. 175 [87].....	14
Figure I. 176 [87].....	14
Figure I. 177 [87].....	14
Figure I. 178 [87].....	14
Figure I. 179 [87].....	14
Figure I. 180 [87].....	14
Figure I. 181 [87].....	14
Figure I. 182 [87].....	14
Figure I. 183 [87].....	14
Figure I. 184 [87].....	14
Figure I. 185 [87].....	14
Figure I. 186 [87].....	14
Figure I. 187 [87].....	14
Figure I. 188 [87].....	14
Figure I. 189 [87].....	14
Figure I. 190 [87].....	14
Figure I. 191 [87].....	14
Figure I. 192 [87].....	14
Figure I. 193 [87].....	14
Figure I. 194 [87].....	14
Figure I. 195 [87].....	14
Figure I. 196 [87].....	14
Figure I. 197 [87].....	14
Figure I. 198 [87].....	14
Figure I. 199 [87].....	14
Figure I. 200 [87].....	14

Liste des Tableaux

Tableau III. 1 Différentes caractéristiques du sable utilisé.....	20
Tableau III. 2 Caractéristiques chimiques du silicate de sodium.	22
Tableau III. 3 Caractéristiques physiques de NaOH.	23
Tableau III. 4 4Propriétés physiques de métakaloin et laitier	25
Tableau III. 5 Caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des fibres végétales et de la fibre polypropylène.....	26
Tableau III. 6 Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.....	27

Résumé

Les composites à base de ciment Portland conventionnels sont intrinsèquement faibles sous les contraintes de traction, en raison de leur quotient de fragilité, ainsi le problème est encore aggravé dans les composites géopolymères en raison de l'effet pouzzolanique de précurseurs comme les cendres volantes, le laitier, etc. Le renforcement des fibres dans le béton de ciment Portland conventionnel a été adopté, pendant un certain temps, pour remodeler son caractère de fragile à ductile ou quasi-ductile avec une amélioration significative des caractéristiques mécaniques et de durabilité. Avec l'accent mondial mis sur le remplacement partiel ou total des produits à base de ciment Portland dans l'industrie de la construction par les composites "géopolymères". Des efforts ont été faits pour utiliser des renforts fibreux dans les composites géopolymères pour améliorer leurs performances et leur durée de vie. Le développement du composite géopolymère renforcé de fibres étant relativement nouveau, le mémoire envisage de contribuer à la compréhension et à l'évaluation globales de l'utilisation des fibres (végétale et polypropylène) dans les matériaux géopolymères. Dans ce contexte, des mortiers géopolymères à base de laitier et de métakaolin renforcés par des fibres végétales et de polypropylène à des taux de 0.1 et 0.3 par rapport au volume total ont été confectionnés. La fibre végétale utilisée dans ce travail (chanvre) a été préalablement traitées avec 5% de NaOH pendant 2 heures. La résistance à la compression et à la flexion ainsi la durabilité (feu et retrait).

Les résultats obtenus par ce travail montrent que le mortier géopolymères renforcé par les fibres de chanvre présente une meilleure résistance à la flexion, à haute température par rapport aux mortiers sans fibres et les mortiers avec fibre de polypropylène (le dosage optimal est de 0.3%).

Les résultats obtenus par ce présent travail laissent penser qu'il existerait un avenir prometteur pour l'utilisation des fibres végétales dans les matériaux géopolymères.

Abstract

Conventional Portland cement composites are inherently weak under tensile stresses, due to their brittleness quotient, so the problem is further compounded in geopolymer composites due to the pozzolanic effect of precursors like fly ash, slag, etc. Fiber reinforcement in conventional Portland cement concrete has been adopted, for some time, to reshape its character from brittle to ductile or quasi-ductile with significant improvement in mechanical and durability characteristics. With the worldwide emphasis on partial or total replacement of Portland cement-based products in the construction industry by

"geopolymer" composites. Efforts have been made to use fiber reinforcements in geopolymer composites to improve their performance and durability. As the development of fiber-reinforced geopolymer composite is relatively new, the dissertation plans to contribute to the overall understanding and evaluation of the use of fibers (plant and polypropylene) in geopolymer materials. In this context, geopolymer mortars based on slag and metakaloin reinforced with vegetable and polypropylene fibers at rates of 0.1 and 0.3 relative to the total volume were made. The vegetable fiber used in this work (hemp) was previously treated with 5% NaOH for 2 hours. The resistance to compression and bending as well as the durability (fire and shrinkage).

The results obtained by this work show that the geopolymer mortar reinforced with hemp fibers presents a better flexural strength at high temperature compared to mortars without fibers and mortars with polypropylene fibers (the optimal dosage is 0.3%) .

The results obtained in this work suggest that there is a promising future for the use of plant fibers in geopolymeric materials.

ملخص

المركبات التقليدية القائمة على الأسمنت البورتلاندي ضعيفة بطبيعتها تحت ضغط طاشد، بسبب حاصلا هشاشتها، وبالتالي تتفقا لمشكلة تقييم كباتالجيوبوليمر بسبب التأثير البوزولاني للسلائف مثل لرماد المتطاير، ومنتجات الألبان، إلخ. تما اعتماد تقوية الألياف في الخرسانة الأسمنتية التقليدية، لبعض الوقت، لإعادة تشكيلها من هشا لمطيا أو شبه مطيل مع تحسن كبير في الخ صائص الميكانيكية والمتانة.

معانتر كيز العالم على الاستبدال الجزئي والكلي لمنتجات القائمة على الأسمنت البورتلاندي في صناعة البناء بمر كبات "جيو بوليمر". بذلتا الجهود لاستخدام التعزيزات الليفية في تقييم كباتالجيوبوليمر لتحسين أدائها وعمرها. نظرًا إلى أن تطوير مر كباتالجيوبوليمر المقوية بالألياف جديد نسبيًا، فإننا لطر وحة تهدف إلى المساهمة في الفهم العالمي لتقييم استخدام الألياف (الخضروات والبوليبيروبلين) في المواد الجيوبوليمرية. في هذا السياق، تم معمل ملاط جيو بوليمر يعتمد على الخبث الميكاكاليو المقوية بالألياف النباتية والبوليبيروبلين بمعدلات 0.1 و 0.3 نسبة إلى الحجم الكلي. تتم معالجة الألياف النباتية المستخدمة في هذا العمل (القنب) مسبقًا بـ 5٪ هيدروكسيد الصوديوم لمدة ساعتين. مقاومة الانضغاط والانحناء وكذلك المتانة (الحريق والانكماش).

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من هذا العمل أن الملاط الجيوبوليمر المقوية بالألياف القنبية تتمتع بمقاومة أفضل للانحناء عند درجات الحرارة العالية مقارنة بالمونة الخالية من الألياف المونة بالألياف البوليبيروبلين (الجرعة المثلثى 0.3٪). تشير النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذا العمل الحالي إلى أنه سيكون هناك مستقبل واعد لاستخدام الألياف النباتية في المواد الجيوبوليمرية.

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux en ciment sont largement utilisés dans la société moderne. Demande le ciment est varié du fait de la souplesse de mise en œuvre, sur site ou préfabriqué. En raison de ces propriétés, le ciment Portland (OPC) est devenu l'un des matériaux de construction les plus utilisés au monde. Les géopolymères sont souvent considérés comme des substituts possibles au ciment Portland. Ce sont des liants qualifiés de ciment aluminosilicate alcalin. Ils sont généralement fabriqués à partir d'argile et/ou de déchets industriels tels que les cendres volantes, laitiers activés par des solutions alcalines, contenant généralement une certaine quantité d'hydroxyde métallique. Les géopolymères ont une large gamme d'applications car leurs propriétés telles que la résistance au feu et la résistance aux attaques acide.

Pouvoir utiliser les déchets industriels comme des liants peut réduire l'émissions massives de dioxyde de carbone par rapport au ciment Portland. A titre d'exemple, une tonne de ciment géopolymère est 10 fois moins d'émissions de CO₂ par rapport la production d'une tonne de ciment. Par conséquent, il présente un avantage environnemental.

Le ciment géopolymère est un liant obtenu par activation de matières premières les aluminosilicates « kaolin - métakaolin -, laitier, cendres volantes... » associés à des solutions alcalines « NaOH, Silicate de Sodium SiO₂/Na₂O, ...etc » créent un véritable liant performant et durable. Des travaux de recherche antérieurs ont montré que les liants géopolymères ont des propriétés mécaniques égales ou supérieures aux liants de ciment portland traditionnels, une bonne résistance aux hautes températures et aux produits chimiques. Cependant, l'attribut d'état Les propriétés physiques telles que l'ouvrabilité et le temps de prise n'ont pas été largement étudiées.

Parmi les inconvénients des géopolymères c'est le retrait très élevé par rapport au OPC. Il est connu que l'introduction des fibres métalliques ou des polypropylènes empêche ce phénomène. Néanmoins le prix de revient de ces fibres est élevé et leur fabrication dégage du CO₂ et utilise des ressources non renouvelables. Ainsi, les recherches actuelles s'orientent vers, la possibilité de les remplacer par des fibres naturelles. Les fibres végétales sont biodégradables et renouvelables. Elles peuvent être issues de la valorisation d'une ressource locale dans certains pays.

Dans le cadre de cette étude, une fibre végétale (fibre de chanvre) a été utilisées en remplacement des fibres de polypropylène.

L'approche est essentiellement expérimentale et comporte deux axes principaux :

Le premier axe concerne l'étude de l'effet sur les performances mécaniques de l'introduction des fibres végétales et polypropylènes des ciment géopolymères.

Le deuxième axe concerne l'influence de la présence des fibres végétales sur le comportement et à la durabilité des mortiers (l'élévation de la température et le retrait, cycle gèle dégel).

Ainsi, le mémoire de thèse se compose de deux grandes parties.

La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, elle se décompose en deux chapitres :

- ✚ Le premier est consacré à des généralités sur les géopolymères, suivi de leur comportement vis-à-vis de différents phénomènes (retrait, fluage, feu et attaque sulfatique).
- ✚ Le deuxième chapitre est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur la nature des fibres utilisées et leur influence sur les géopolymères à l'état frais, durcissant et durabilité.

La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle est structurée comme suit :

- ✚ Une description détaillée de tous les matériaux utilisés et regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus. Ceci constitue le troisième chapitre
- ✚ Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude de l'influence des fibres végétales et synthétique sur le comportement et la durabilité des géopolymères : Retrait et feu.

Chapitre 1

Recherche bibliographique

I.1. Introduction

L'industrie et la recherche sur la construction est en train de réaliser un vrai renouveau technologique.

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 attaque d'un minerai contenant de l'alumine et éventuellement de la silice (tels que le métakaolin et/ou laitier) par une solution alcaline de silicate.

Dans ce chapitre on va s'intéresser à la compréhension générale des mécanismes de prise d'un système géopolymère à base de Métakaolin et de laitier. Nous allons, premièrement, présenter un historique du géopolymère. Ainsi une discussion approfondie sur la composition, l'application et la caractérisation des géopolymères sera effectuée.

I.2. Historique

Les géopolymères, selon (Davidovits, 1989) ont été développés dans la recherche des polymères inorganiques résistants à la chaleur et non combustibles, après de nombreux incendies favorisés par l'inflammabilité des matériaux plastiques en France entre 1970 et 1973.

Cependant, des études (Barsoum et al., 2006) ont montré que l'activation alcaline était utilisée en Egypte dans la construction des pyramides. Bien qu'encore une théorie controversée, ces études ont démontré que les blocs de pyramides de Gizeh ou de Senefru n'étaient pas taillés mais étaient en fait des pierres ré-agglomérées. D'après Davidovits, elles seraient fabriquées à partir de calcaire local contenant 5 à 10 % d'argiles kaoliniques, de natron (carbonate de sodium) et de chaux. En présence d'eau, l'argile, le natron et la chaux forment une colle dite « géopolymérique ». Il est plus probable que le liant soit proche d'un silicate de calcium-aluminium hydraté, ce qui est assez proche d'un géopolymère issu d'un précurseur riche en Ca comme des laitiers de hauts fourneaux. On retrouve ce genre de procédé dans des bétons antiques syriens, romains ou jordaniens où la quantité d'alcalins était plus importante. Par ailleurs cette technologie qui a conduit le professeur Glukhovsky dans les années 50 à

développer des ciments à base de laitiers et d'autres déchets alcalins afin de répondre à la pénurie de ciment Portland qui touchait l'ex-URSS. Ces bâtiments sont toujours en place et utilisés sans rencontrer de problèmes importants de durabilité. Dans les années 70, le professeur Joseph Davidovits élabore un cadre général pour la compréhension du mécanisme chimique et dépose le terme géopolymère ainsi que de nombreux brevets (Davidovits, 1989) entre 1972 et 1996. Cela a permis de développer l'intérêt pour des applications industrielles du géopolymère. Dès les années 80, la société Lone Star Industries Inc présente un ciment Pyrames mélange de géopolymère et de ciment Portland utilisé entre autres pour paver des installations militaires américaines.

Grâce à leur propriété de haute résistance au feu, différentes applications de niches ont vu le jour dans le domaine automobile ou aérospatial essentiellement. Cependant, c'est dans le domaine de la construction que les géopolymères présentent un développement majeur. On voit apparaître dans les années 2000 des produits commerciaux à base de géopolymères comme les joints Geofug de la société BASF. La société Zeobond a industrialisé un ciment E-crete à base de sous-produits industriels comme les cendres volantes et les laitiers.



Figure I. 1 Pavé de géopolymère en Australie (www.zeobond.com).

De plus, on observe une croissance très importante de publications sur la science des géopolymères, en particulier depuis les années 2000. Ceci correspond à des besoins de plus en plus pressants de réduction d'émissions de CO₂ en particulier dans le secteur du bâtiment et répond à une demande de prise en compte des problématiques environnementales par les gouvernements. Selon Scopus, on compte environ 700 articles publiés sur la thématique des géopolymères principalement issus de recherches européennes, asiatiques, nord-américaines et australiennes.

Depuis les années 2000, de nombreuses thèses ont été soutenues dans le monde sur les géopolymères et l'activation alcaline, on en recense une cinquantaine entre les Etats Unis, l'Australie, la France, le Royaume Uni, l'Espagne et les Pays Bas. Bien que toutes ces recherches soient particulièrement pertinentes pour répondre à des problématiques industrielles, le savoir sur la géopolymérisation généré par une approche plus théorique reste faible. En effet, la plupart des travaux de recherches s'intéressent essentiellement aux propriétés mécaniques ou /et à la microstructure. Sur les thèses recensées, 16% des travaux portent sur la compréhension de la chimie de géopolymérisation et seulement 7% s'intéressent à l'état frais et l'étude de la mise en oeuvre. Néanmoins, la compréhension des mécanismes et l'étude de l'écoulement des géopolymères sont les clés d'un développement industriel encore plus intense en permettant une meilleure optimisation de ce type de matériau. Notons que cette revue bibliographique est délicate à faire est biaisée par le fait qu'il n'y a pas de consensus sur les termes à utiliser (geopolymer, alkali activated binders, inorganic binders...).

Dans les parties suivantes, nous aborderons les connaissances génériques déjà publiées sur la chimie et la caractérisation des géopolymères à l'état solide et l'état frais.

a)



b)

Figure I. 2 Bâtiments réalisés avec des liants activés par les alcalis à base de laitier a) à Lipetsk (Russie) à partir de 1994 b) à Marioupol (Ukraine) 1960.

I.3. Définition des géopolymères

D'un point de vue terminologique, le géopolymère est un liant qui durcit à température ambiante, tout comme le ciment Portland. Si un composé géopolymère nécessite une action thermique, il ne peut pas être qualifié de géopolymère, mais de liant géopolymère. Ingrédients nécessaires à la fabrication du ciment géopolymère. Le ciment géopolymère est un matériau innovant et une véritable alternative au ciment Portland traditionnel pour le génie civil, la construction et les applications offshore. Il nécessite une modification minimale de certains matériaux géologiques naturels ou sous-produits industriels tout en réduisant considérablement son empreinte carbone. Il est également très résistant à la plupart des attaques chimiques qui affectent le béton traditionnel.

Pour fabriquer du ciment géopolymère, du silicate d'aluminium, un agent alcalin inoffensif (silicate de sodium ou de potassium soluble, rapport molaire $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O} > 1,65$, M est Na ou K) et de l'eau. C'est l'ajout de cations calcium, principalement du laitier de haut fourneau, qui assure le durcissement à température ambiante. Le ciment géopolymère durcit plus rapidement que le ciment Portland. Ils acquièrent la majeure partie de leur puissance dans les 24 heures. Cependant, ils ont un temps de prise suffisamment long pour être mélangés dans une centrale à béton et livrés dans une bétonnière. Les ciments géopolymères ont également la capacité de former des liaisons chimiques fortes avec divers agrégats rocheux de différents types.

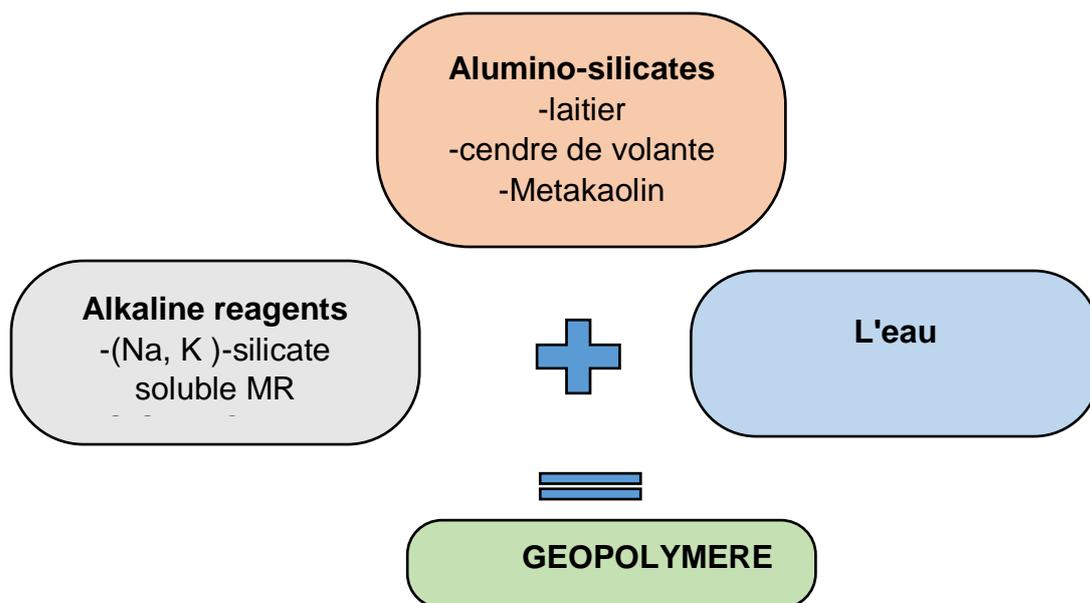


Figure I. 3 formulation de géopolymère

I.4. Différents types de géopolymère

I.4.1. 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(Davidovits, 1989). Cela a conduit à l'invention du bien connu dans l'industrie sous le nom de ciment Pyrament.

I.4.2. 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).

I.4.3. 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).

I.5. Microstructure du liant géopolymère à l'état durci

Le matériau formé par le processus de géopolymérisation est significativement différent des hydrate de l'OPC (Cement Portland); en 1979, Davidovits(Davidovits, 1989) a défini le produit de gel de cette polymérisation comme un polymère d'aluminosilicate amorphe à semi-cristallin composé d'un solide produit par polycondensation inorganique d'aluminosilicates avec une concentration élevée des solutions d'hydroxyde ou de silicate de métal alcalin.

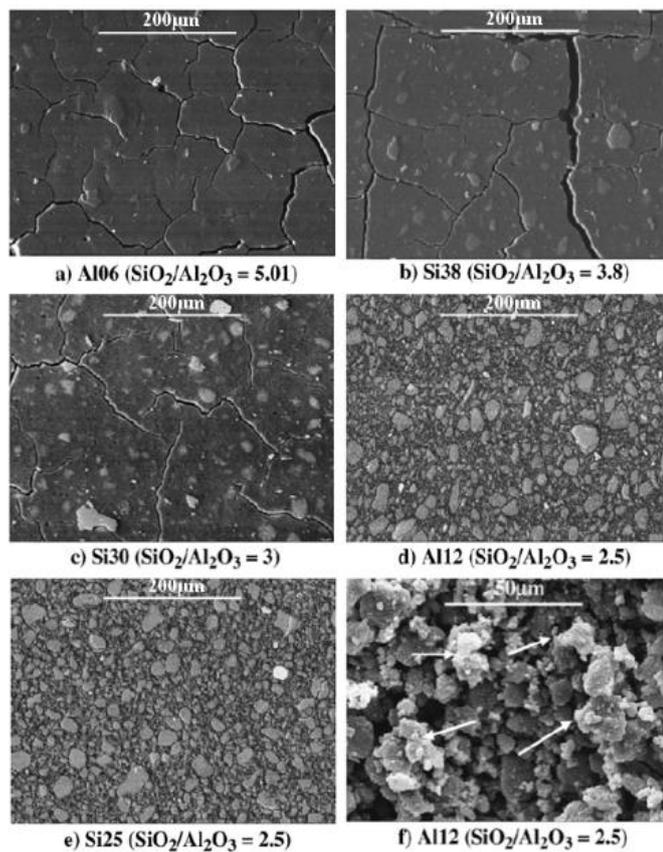


Figure I. 4 Micrographies SEM de (a-e) sections polies et (f) surface de fracture des échantillons (flèches indiquant les grains de Na-Al-Si)(Barsoum et al., 2006)

I.6. Formulation des géopolymères

La mise en œuvre de la composition géopolymère est un facteur clé dans l'obtention d'un bon adhésif ayant des bonnes propriétés mécaniques, rhéologiques et physiques. Il existe de nombreuses méthodes de formulation proposées selon différents paramètres. Cependant, une méthode de recette générale n'est pas encore fixée en raison de la grande variété de matériaux de base utilisés dans la formulation. La méthode la plus répandue dans la littérature est basée sur différents rapports molaires, comme les rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{H}_2\text{O}/\text{m}_2\text{O}$ ($m=\text{Na}$ ou K). (Wei et al., 2017) ont étudié l'effet de ces trois derniers rapports molaires sur la résistance à la compression de ciment géopolymère à base de métakaolin par une approche réseau Neurones et résultats expérimentaux de travaux antérieurs. Les résultats de ce travail sont permis de savoir les rapports molaires optimaux pour avoir une bonne formulation de géopolymères qui donne une bonne résistance à la compression. Ces rapports massiques de divers composants, tels que le rapport activateur alcalin/cendres volantes, Rapport $\text{m}_2\text{OSiO}_3/\text{mOH}$ et rapport SS/SH (solution SS / solution NaOH).

I.7. Application des geopolymeres

Compte tenu des propriétés physiques et chimiques des géopolymères, les technologues ont désigné leurs applications : génie civil, automobile, aéronautique, métallurgie, fonderie de métaux non ferreux, plasturgie, gestion des déchets, construction, restauration de bâtiments, etc...(Almutairi et al., 2021). Côté ingénierie, on note le développement de nouveaux ciments géopolymères comme American Cement PYRAMENT, qui est sur le marché aux USA depuis 1988 et qui est ultra-rapide et performant. C'est un produit idéal pour l'entretien et la construction de plates-formes d'atterrissage en béton (El Alouani et al., 2021). Dans l'industrie aérospatiale, on remarque l'utilisation de moules et d'outils en géopolymère réfractaires pour fabriquer en toute sécurité d'alliages aluminium/lithium liquides hautement corrosifs. Dans le secteur automobile, nous voyons des composites carbone/géopolymère pour la protection thermique des voitures de course.

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

de ces catégories, une ou plusieurs applications spécifiques sont décrites dans les paragraphes suivants.

Entre 1986 et 1994, l'entreprise russe Tsentrmetallurgremonta réussit à réaliser une série de bâtiments en utilisant des bétons géopolymères à base de laitier.



Figure I. 5 Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994 (Boumediene, 2022).

Par exemple en 2013, la société australienne Wagners a utilisé le béton géopolymère à base de laitier et de cendres volantes comme moyen de réaliser un institut et une innovation GCI (Global Change Institute) à l'Université du Queensland, Australie



Figure I. 6 L'institut GCI (The Global Change Institute) à l'université du Queensland, Australie, 2013 (Boumediene, 2022).

I.8. Avantages et inconvénients des géopolymères

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.9. Conclusion

Cette synthèse bibliographique permet de rappeler dans un premier temps Remplacez le ciment Portland par un liant géopolymère. Brève description des géopolymères sont exposés en montrant la difficulté d'établir une méthode de formule standardisée pour tous les besoins techniques. Ensuite, les propriétés principales des géopolymères sont résumées. Des travaux antérieurs ont montré qu'en termes de propriétés mécaniques et de résistance au feu, attaque chimique, les géopolymères ont des performances comparables au béton traditionnel. Plusieurs exemples pratiques montrent également que la spécificité des géopolymères peut couvrir un large éventail d'applications dans le secteur de la construction. Dans le chapitre suivant on va montrer l'effet des fibres sur le comportement des géopolymères à l'état frais et à l'état durci.

Chapitre 2

ETAT DE L'ART SUR LE COMPORTEMENT DES GEOPOLYMERES A BASE DES DIFFERENTES FIBRES

II.1.Introduction

Les géopolymères, également appelés "liants activés par des alcalis", ont été présentés comme une alternative prometteuse aux pâtes de ciment OPC avec un faible impact environnemental.

Les géopolymères présentent des caractéristiques fragiles (un comportement cassable) et des retraits endogènes élevés. C'est pour ça on ajoute des différentes fibres afin d'améliorer ses caractéristiques. En principe, trois exigences principales doivent être prises en compte dans la sélection des fibres comme renfort dans les composites géopolymères, notamment :

1. La compatibilité des propriétés du matériau avec l'application.
2. Une interaction fibre-matrice suffisante pour transmettre les contraintes.
3. Un rapport d'aspect optimal pour garantir un comportement efficace après fissuration.

Pour cela, dans ce chapitre on va étudier l'effet de la nature des fibres sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des géopolymères.

II.2.Effet de la nature des fibres sur les géopolymères

II.2.1. Impact des fibres sur les propriétés rhéologiques

II.2.1.1. Ouvrabilité

Alors que les fibres d'acier contribuent à améliorer la résistance à la traction, la résistance à la flexion/à la rupture, le retrait et la réduction des fissures dans les produits conventionnels. L'inconvénient de leur introduction est l'augmentation du taux de vides, la mauvaise compactibilité et la mauvaise maniabilité(Singh et al., 2010).

La dispersion et l'orientation des fibres sont dépendantes de l'ouvrabilité. Pour une bonne ouvrabilité, des études antérieures ont déterminé la fraction volumique optimale de la teneur en fibres d'acier dans les mélanges OPC à environ 0.5%-2.5% (Singh et al., 2010). Pour les composites géopolymères, les fibres d'acier ont montré un effet similaire de la diminution de l'ouvrabilité (Singh et al., 2010). La Fig. 5 montre les données historiques décrivant la diminution de l'ouvrabilité avec l'incorporation de différents types et contenus de fibres dans les composites géopolymères.

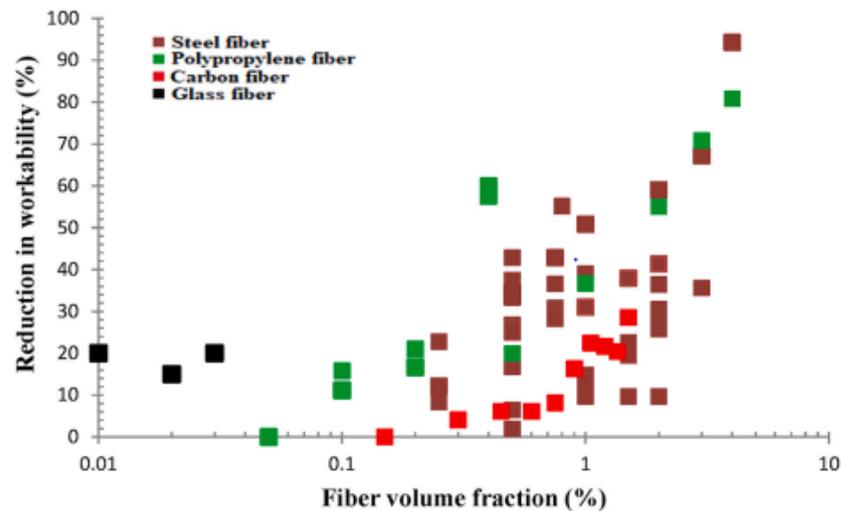


Figure II. 1 Effet de différentes fibres sur l'ouvrabilité des géopolymères (Farhan et al., 2021).

Il est évident qu'au-delà de 0.65% de fraction volumique de fibre (particulièrement l'acier) la réduction de l'ouvrabilité est d'environ 30%, ce qui est assez considérable. La réduction de l'ouvrabilité est principalement due à :

- ✚ L'augmentation des forces cohésives entre les fibres et la matrice (visqueuse et collante) en raison de l'augmentation de la surface et de la forme allongée de l'acier.
- ✚ L'amélioration de l'ancrage de la fibre dans la matrice en raison de la déformation de la surface des fibres d'acier ;
- ✚ La modification de la structure interne du squelette granulaire par ségrégation des plus grosses particules.

Alors que Tung Trans et al. (Singh et al., 2010) ont recommandé une fraction volumique de 0.75% de fibres d'acier dans les composites géopolymères. Aydın et Baradas (Aydın & Baradan, 2013) ont rapporté une réduction plus importante de l'ouvrabilité pour une fibre d'acier de 13 mm de long par rapport à une fibre de 6 mm.

La réduction de l'ouvrabilité s'arrête au-delà d'une fraction volumique de fibres de 1%. Gao et al. (Gao et al., 2017), tout en incorporant une combinaison hybride de fibres d'acier longues et courtes ont rapporté une influence significative sur les propriétés fraîches des composites géopolymères. (Ranjbar et al., 2016) ont rapporté une perte d'ouvrabilité due à l'incorporation de fibres courtes de polypropylène à faible densité. Cependant, pour le béton géopolymère auto-compactant, l'influence de l'ajout de fibres d'acier jusqu'à 1% a montré un effet modéré sur l'ouvrabilité. Noushini et al. (Noushini et al., 2018) ont montré une réduction de l'ouvrabilité et de la compactibilité pour les

mélanges géopolymères avec une fraction volumique de 0,5% de fibres de polypropylène mono-filament et fibrillées.

II.2.2. Impact des fibres sur les propriétés mécaniques

II.2.2.1. Résistance à la compression

La compression dans les matériaux fragiles entraîne une dilatation inélastique du volume qui conduit au développement des microfissures axiales, parallèles à la direction de la charge imposée. Le développement ultérieur d'une contrainte de traction transversale aux extrémités de ces microfissures contribue à leur propagation dans la direction de la charge de compression, ce qui entraîne des fractures locales. Ces points de rupture locaux se développent beaucoup plus facilement autour des "points faibles" comme les pores (Bažant & Ožbolt, 1992). Ainsi, la réponse à la contrainte de compression dans les matériaux quasi fragiles dépend principalement de leur fragilité, de la structure des pores, de la densité et de la distribution des microfissures. Pendant le pontage des fissures par les fibres dans les composites, une plus grande énergie est nécessaire pour arracher la fibre et faire progresser la propagation de la fissure (Ranjbar et al., 2015). Cette énergie dépend principalement de la liaison entre la fibre et le liant, de la rigidité de la fibre, du nombre de fibres et de leur orientation. La liaison inter-faciale augmente normalement avec l'augmentation de l'ancrage des fibres. (Ranjbar et al., 2015) ont constaté que l'augmentation de la teneur en fibres au-delà d'un certain seuil augmentant la non-homogénéité avec le développement de points de concentration des fibres dans la matrice. L'enchevêtrement des fibres conduit au blocage de l'écoulement de la matrice fraîche à l'intérieur, ce qui donne un composite poreux et faible. La figure 9 montre la zone de vide confinée entourée d'amas de fibres enchevêtrées. Par conséquent, l'ouvrabilité et la compactibilité d'un composite de fibre sont très importantes pour l'évaluation du contenu optimal de fibres, car elles permettent une matrice piégée suffisante (à l'intérieur du réseau de fibres) qui fournit l'adhérence interfaciale requise. En ce qui concerne la rigidité, une fibre dont le module est plus faible permet une compression plus importante.

Des études ont été entreprises pour améliorer les propriétés adhésives des fibres par des modifications de surface comme la liaison avec le ciment. Pour les fibres hydrophobes comme le polypropylène, le polyester et le PVA (Wang et al., 2006); des modifications mécaniques comme la fibrillation, l'abrasion de la surface et la micro-indentation ; traitement chimique de modification de la surface comme le silane et le traitement alcalin. Les Fig. II.2 (a) à (g) montrent l'indice de résistance à la compression des composites géopolymères (basés sur des données précédentes) incorporés avec des fibres et des teneurs en fibres variables. Il est évident à partir de la Fig. II.2 (a)

que les fibres métalliques à haute rigidité ont montré une meilleure résistance à la compression que les fibres synthétiques et naturelles.

Pour les composites géopolymères incorporant de l'acier, une fraction volumique entre 0.2 et 1.5% ont été trouvés comme des gammes optimales qui devraient améliorer la résistance à la compression entre 10 et 12%. Les fibres à haut module semblent fonctionner particulièrement bien pour les liants à faible résistance, c'est-à-dire pour les composites géopolymères à faible module.

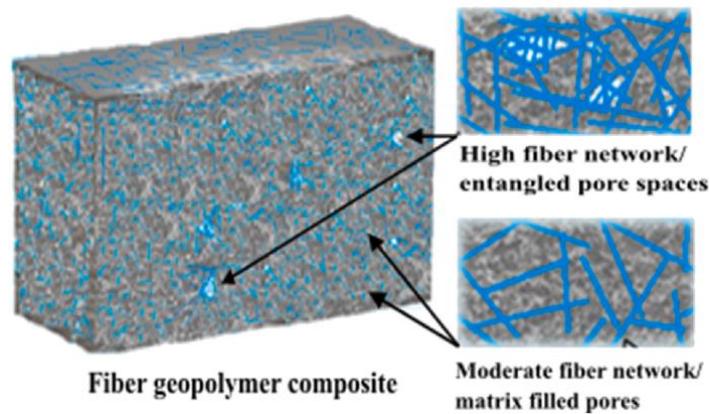


Figure II. 3 Effet de l'orientation des fibres sur la création des pores (Farhan et al., 2021)

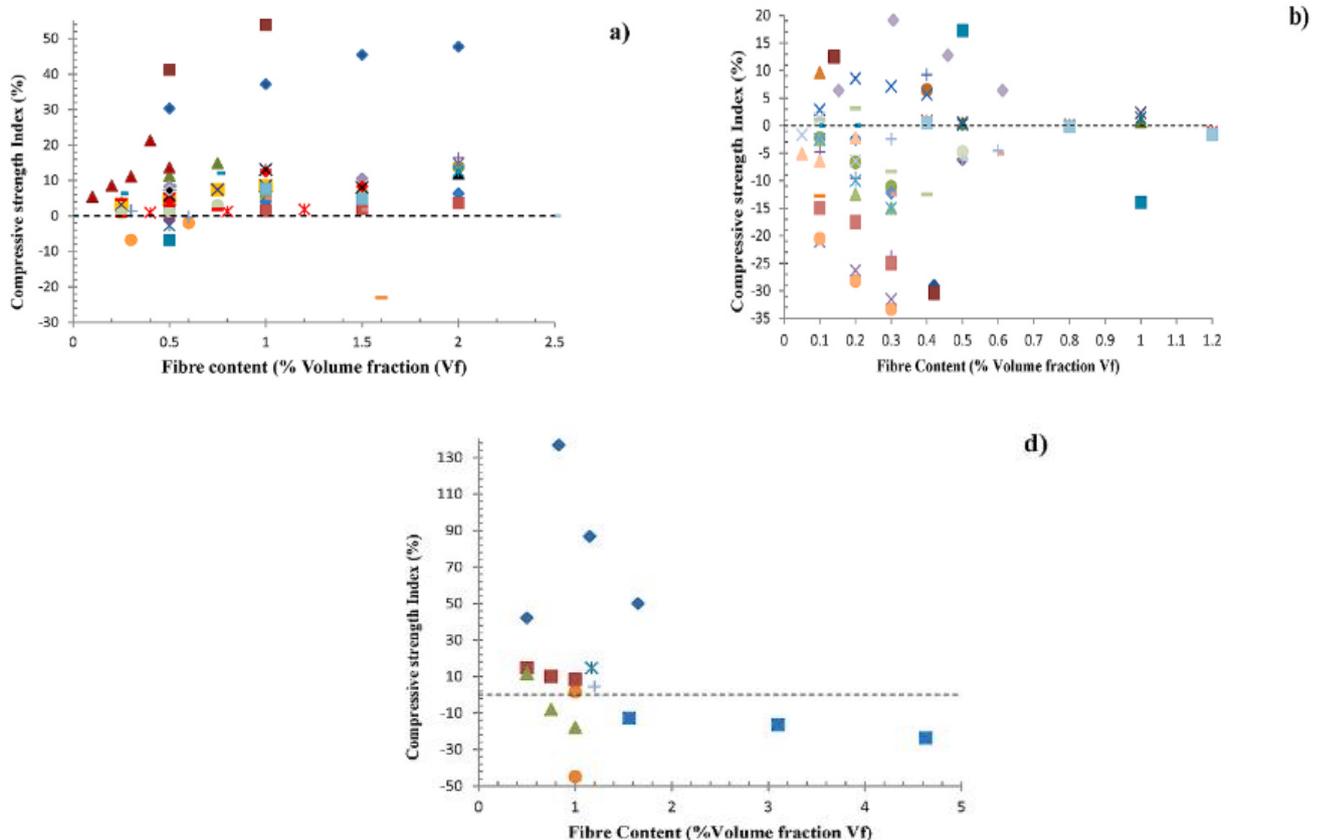


Figure II. 2 Effet des différentes fibres sur la résistance à la compression des géopolymères (a) fibre d'acier, (b) fibre de polypropylène (c) fibre végétale (Farhan et al., 2021).

II.2.2.2. Résistance à la flexion

Les renforts en fibres visent principalement à améliorer la résistance à la flexion des composites géopolymères et à résister à la formation/propagation des fissures. La contrainte de traction induite par les charges de flexion est principalement résistée par la liaison interfaciale entre la fibre et la matrice. La liaison interfaciale, qui augmente avec l'augmentation de l'adhésion, de la surface de contact et de l'abrasion de la surface des fibres, ne résiste pas seulement aux fissures passant par un plan mais dissipe également la fracture, et aussi la force de résistance à la rupture dans les zones adjacentes, radialement. Cependant, parfois, pour induire les caractéristiques d'écrouissage, la liaison interfaciale entre la fibre et la matrice est réduite en utilisant des fibres synthétiques ou en huilant les surfaces des fibres métalliques.

La teneur en fibres et son orientation jouent un rôle important dans l'amélioration des performances de flexion, car elles réduisent les macrofissures potentielles en microfissures multiples et contribuent ainsi à augmenter la ductilité et la résistance à la rupture. L'orientation des fibres devient cruciale dans les composites à fibres courtes, car des fibres placées au hasard peuvent ne pas passer par un plan unique, affectant ainsi la surface de renforcement des fibres disponible le long de cette section. Par conséquent, dans ces cas, la longueur optimale des fibres devient cruciale pour une résistance maximale. Sur la base de données précédentes provenant d'études antérieures, les Fig. II.4 (a) à (d) montre l'augmentation ou la diminution relative de la résistance à la flexion (indice de résistance à la flexion) de différents composites géopolymères lorsqu'ils sont incorporés avec des fibres de fraction volumique variable. Comme il est évident sur les graphiques, l'augmentation de la teneur en fibres d'acier augmente la résistance à la flexion. Ce gain en résistance à la flexion est comparativement beaucoup plus élevé que les gains obtenus en termes de résistance à la compression. (Wang et al., 2006) ont suggéré que l'augmentation de la résistance à la flexion dans les composites renforcés de fibres dépend principalement de la teneur en fibres d'acier que des caractéristiques du matrice produite.

(Bernal et al., 2010) ont rapporté un déficit dans la résistance à la compression d'une part et d'autre part, une amélioration considérable de la résistance à la flexion et de la résistance à la traction par fendage due à l'ajout de fibres. Cette augmentation de la résistance à la flexion est probablement due au module élevé des fibres d'acier.

D'après les Fig. II.4. (b) et (c), l'augmentation de la teneur en fibres de polypropylène et en fibres de verre a un effet positif sur la résistance à la flexion, principalement en raison de leur capacité de pontage des fissures. Cependant, la résistance à la flexion montre une tendance à la baisse lorsque la teneur en fibres dépasse de 0,3 % en volume. Cette réduction peut probablement être due à la faible compactibilité des composites à haute teneur en fibre à l'état frais, ce qui entraîne une structure poreuse hétérogène. (Senff et al., 2020) ont rapporté une augmentation de 23% de la résistance à la flexion dans un mortier géopolymère contenant des fibres de verre à une fraction de 2% en poids.

II.2.3. Propriétés de durabilité

L'aspect durabilité des géopolymères avec les fibres a reçu relativement peu d'attention alors que la plupart des recherches se sont concentrées sur les propriétés mécaniques des composites. Malgré cela, la durabilité et les propriétés mécaniques sont tout aussi importantes pour le développement de matériaux composites durables.

II.2.3.1. Retrait de séchage

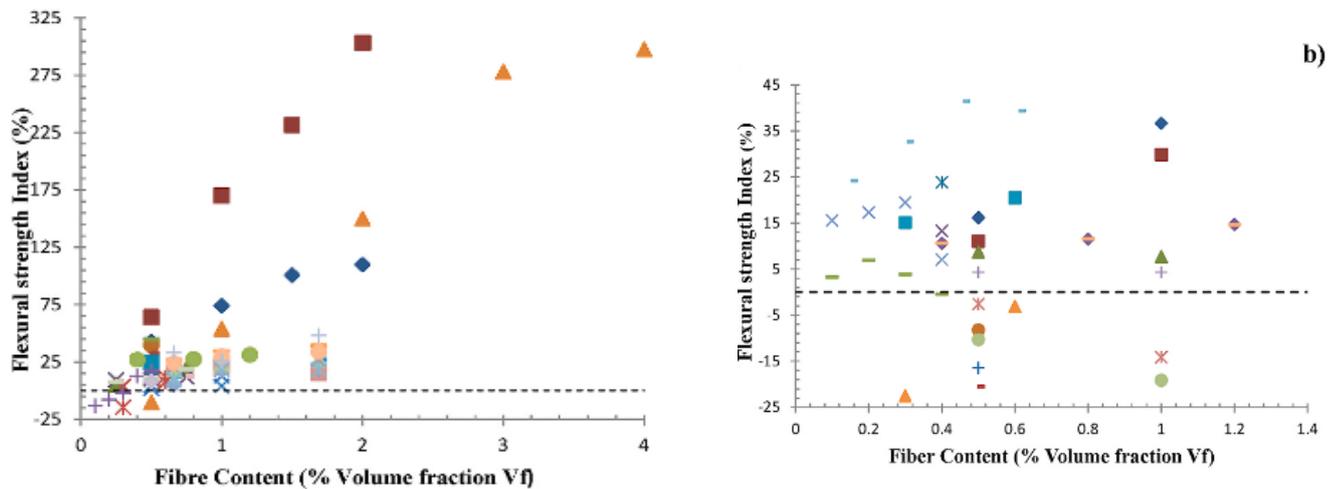


Figure II. 4 Effet des différentes fibres sur la résistance à la flexion des géopolymères (a) fibre d'acier, (b) fibre de polypropylène (Farhan et al., 2021).

Le retrait par séchage résulte de la pression capillaire élevée développée entre les zones sèches et humides du réseau de micropores, qui est initié pendant l'achèvement de la réaction géopolymérique. Ceci qui conduit à l'avancement de la réaction dans la génération de microfissures. Dans les géopolymères fibrés, la polymérisation continue, résulte en une augmentation de la liaison entre la fibre et la matrice qui limite par conséquent la progression du retrait au séchage (Castel & Foster, 2015)[. A l'état frais, l'énergie de retrait est supérieure à la pression de serrage de l'interface fibre-matrice. L'interface fibre-matrice, ce qui entraîne un retrait et une déformation de l'éprouvette. Les études déjà réalisées ont indiqué que les principaux paramètres qui contrôlent le retrait des composites renforcés par des fibres sont suivants : le module de la fibre, la teneur en fibre et l'interaction fibre-liant. Comme le montre la figure II.5, les fibres d'acier permettent une diminution maximale du retrait en raison de leur hydrophilie et de leur rigidité élevée qui améliorent la stabilité géométrique au retrait. Les fibres de verre et de polypropylène ont également été introduit pour réduire les retraits à des degrés divers. L'augmentation du dosage des fibres s'est avérée bénéfique pour l'amélioration de la performance de retrait à long terme, car les fibres ont tendance à maintenir un taux constant de retrait à long terme après 21 jours.

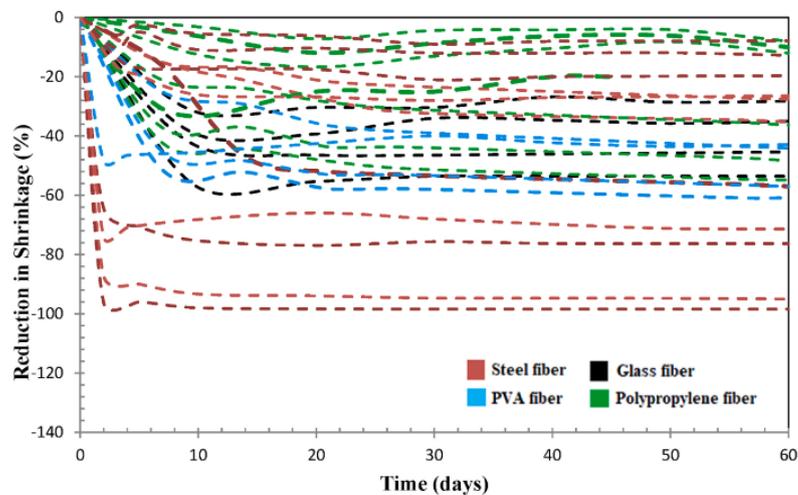


Figure II. 5 Effet des différentes fibres sur le retrait des géopolymères (Farhan et al., 2021).

II.2.3.2. Résistance à haute température :

Les composites géopolymères ont montré une résistance thermique beaucoup plus élevée que le béton OPC conventionnel.

Dans les géopolymères fibrés (GF), la résistance thermique dépend des propriétés individuelles du géopolymère, de la fibre et aussi de la compatibilité thermique entre les deux. (Lyon et al., 1997) ont rapporté un maintien d'environ 60% de la résistance à la traction des

GF contenant de carbone après l'exposition au feu à 800°C. (Hosan, 2016) ont rapporté que le GF avec une teneur en fibres d'acier de 0,5 % peut conserver sa résistance jusqu'à 600 °C, tandis que dans une autre étude une rétention de 59% et 44% de la résistance à la flexion a été rapportée lorsque des GF avec acier ont été soumis à 800 et 1050 °C .

Les panneaux FRGC ont montré une meilleure résistance au feu que les panneaux OPC, avec une capacité de charge résiduelle comprise entre 61 % et 71 %. Ce résultat met en évidence la résistance au feu supérieure du béton GF en acier par rapport au béton OPC. L'introduction des fibres synthétiques dans les géopolymères n'est généralement pas recommandée pour les applications à haute température. Car elles rétrécissent et entraînent la formation de vides importants dans les composites.

II.3.Conclusion

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les aspects mécaniques et de durabilité des géopolymères avec les fibres. Dans la plupart des études de recherche, les cendres volantes et les laitiers sont utilisées en combinaison ou seules et sont principalement activées par des solutions à base de Na, c'est-à-dire NaOH et/ou Na₂SiO₃. Les fibres d'acier et de polypropylène sont les renforts géopolymères les plus populaires, suivis des fibres de verre et de quelques autres matériaux fibreux. Sur la base des résultats limités disponibles sur les propriétés fraîches, mécaniques et de durabilité de ce nouveau composite de fibres géopolymères, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. L'impact du renforcement fibreux sur la résistance à la compression des composites géopolymères semblent être très contradictoires. Dans certaines études, l'introduction de fibres, en particulier d'acier et de polypropylène, a montré une amélioration de la résistance à la compression, attribuant à l'augmentation de la densité apparente de la matrice géopolymère.

Cependant, un nombre considérable d'études ont montré une tendance à la baisse ou un impact négatif sur la résistance à la compression, ce qui a été expliqué par le faible module d'élasticité, le développement des pores autour des fibres et le caractère hydrophobe de certaines fibres.

Dans les chapitres suivants on va étudier l'effet des fibres végétales et synthétiques sur le comportement à l'état frais et durci des géopolymères.

Chapitre 3

Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

III.1. Introduction

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un mortier géopolymère joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures.

Par conséquent, la normalisation des méthodes d'essai et d'identification de la composition des mortiers géopolymères selon les normes en vigueur devient nécessaire pour obtenir des mortiers comparables aux résultats expérimentaux donnés dans la littérature.

Ce chapitre décrit les différents matériaux utilisés pour la fabrication des mortiers à l'étude et les essais effectués selon les normes et pratiques en vigueur.

Les matériaux utilisés dans nos recherches sont des matériaux locaux et nous avons testé expérimentalement leurs propriétés dans le Laboratoire de Chimie et Génie Civil de l'Université EL BACHIR EL IBRAHIMI Bordj Bou Arreridj.

III.2. Granulats

III.2.1. Sable

Le sable utilisé dans notre étude expérimentale était du sable de dunes prélevé dans la zone d'OUED SOUF. Les tests pour le caractériser sont : Analyse granulométrique par tamisage, la masse volumique, le module de finesse et l'Équivalent de sable.

Les caractéristiques physiques de sable sont regroupées dans le tableau 3.1 suivant :

Tableau III. 1 Différentes caractéristiques du sable utilisé.

Equivalent de sable [NA EN 933-8]	Module de finesse	Masse volumique absolue (g/cm ³) [NA EN 1097-6]	Masse volumique apparente(g/cm ³) [NA EN 1097-6]
86,39%	2,072	2,620	1,551

L'équivalent de sable est un indicateur, caractérisant la propreté d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Le tableau montre de l'équivalent de sable (933-8+A1, 2015).

On constate d'après le tableau 3.1 que le sable utilisé est très propre et fin.

III.2.1.1. Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1]

La figure III.1 présente la courbe granulométrique de sable d'OUED SOUF.

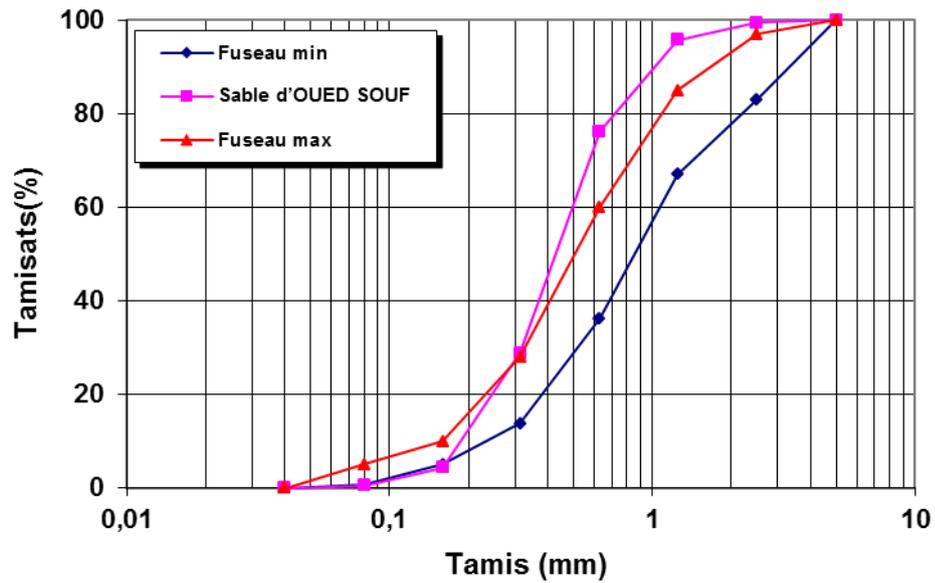


Figure III. 1 Courbe granulométrique du sable de dune (OUED SOUF).

On remarque que notre sable se situe dans le fuseau, de ce fait ce sable est utilisable pour la confection d'un mortier.

III.3. Activateurs

III.3.1. Silicate de sodium liquide

Le silicate de sodium utilisé dans cette étude a été fourni par ARES, SIDI AISSA M'SILA. Ces propriétés physico-chimiques sont résumées dans le tableau ci-dessous :



Figure III. 2 Silicate de sodium.

Tableau III. 2Caractéristiques chimiques du silicate de sodium.

Compositions chimiques	Résultat d'analyse
SiO ₂	29,8
Na ₂ O	14,43
PH	13,01
Densité à 20°cà'(en g/cm ³)	1,53
Concentration en%	45
R=(SiO ₂)/Na ₂ O	2,06
Degré Baumé	50,2

III.3.2.NaOH

Le NaOH utilisé dans cette étude a été fourni par le laboratoire SPECILAB, distribué par la société PROCHIMA SIGMA située à Tlemcen ALGERIE.

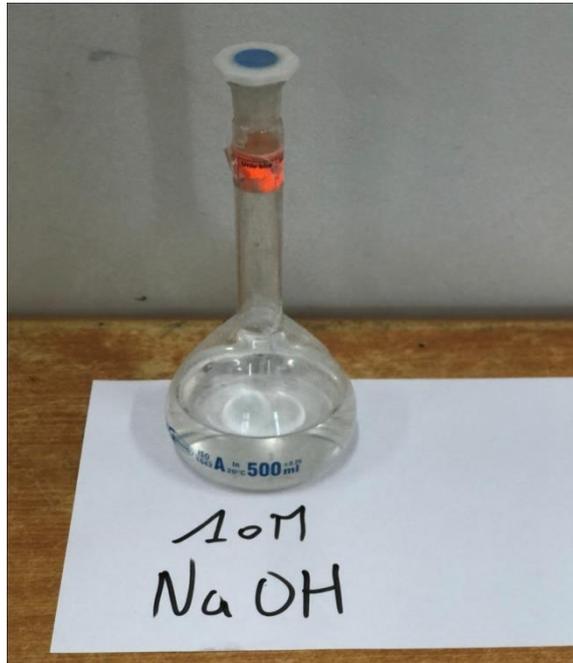


Figure 3.3. NaOH.

III.3.2.1. Propriétés physiques :

L'hydroxyde de sodium est un solide blanc, inodore, très hygroscopique, déliquescent. Les principales impuretés sont le chlorure de sodium ($\leq 2\%$), le carbonate de sodium ($\leq 1,0\%$) et le sulfate de sodium ($\leq 0,2\%$). L'hydroxyde de sodium est miscible à l'eau en toutes proportions mais il se solidifie à 20 °C si la concentration dépasse 52 % en poids. Cette valeur est considérée comme la solubilité maximale dans l'eau à 20 °C.

L'hydroxyde de sodium est très soluble dans les alcools tels que méthanol, alcool absolu, glycérol. Il est insoluble dans l'acétone et l'éther éthylique.

Dans le commerce, l'hydroxyde de sodium est livré soit sous forme solide (blocs, écailles, grains, perles, poudre), soit sous forme de solutions aqueuses à diverses concentrations.

Tableau III. 3Caractéristiques physiques de NaOH.

Nom Substance	Détails
Hydroxyde de sodium	Formule NaOH
	N° CAS 1310-73-2
	Etat Physique Solide
	Masse molaire 40,01
	Point de fusion 318 °C (solide, 100 %) 140 °C (solution à 80 %) 16 °C (solution à 40 %) - 26 °C (solution à 20 %)
	Point d'ébullition 1 390 °C (solide, 100 %) 216 °C (solution à 80 %) 128 °C (solution à 40 %) 118 °C (solution à 20 %)
	Densité 2,13 (solide, 100 %) 1,43 (solution à 40 %) 1,22 (solution à 20 %)
	Pression de vapeur < 10 hPa à 25 °C (calculée)

III.3.2.2. Propriétés chimiques

L'hydroxyde de sodium est un produit très hygroscopique qui absorbe rapidement l'humidité de l'air et, en même temps, fixe le dioxyde de carbone avec lequel il forme du carbonate de sodium.

La dissolution de l'hydroxyde de sodium dans l'eau s'accompagne d'une libération très importante de chaleur, la réaction peut être violente. Les solutions aqueuses libèrent également de la chaleur lorsqu'elles sont diluées : une solution à 40 % ou plus d'hydroxyde de sodium génère, lors de sa dilution dans l'eau, une grande quantité de chaleur portant la température au-delà du point de fusion, ce qui peut conduire à des projections sporadiques et incontrôlées de liquide corrosif. Des recommandations sont préconisées pour les opérations de dissolution ou de dilution. L'hydroxyde de sodium est une base forte dont les solutions aqueuses, très alcalines, réagissent vigoureusement avec les acides.

III.4. Poudres utilisées

III.4.1. Métakaolin

Le métakaolin est élaboré à partir de Kaolin brut de gisement de Tamazert, obtenu après broyage de 2h et 30 min et après un traitement thermique à 800 °C pendant 5h avec une vitesse de 10 °C/min. figure 3.4, présente le métakaolin broyé. Les caractéristiques physiques et chimiques de cette poudre sont illustrées dans le tableau 3.4.



Figure III. 3Métakaolin.

III.4.2. Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la production de fonte. Ils sont formés à partir de composants métalliques non ferreux, de fondants et de cendres carbonisées. Leur composition chimique suggère qu'ils ont les mêmes propriétés de liaison que le ciment. Actuellement, la qualité hydraulique de ces matériaux est estimée par des calculs basés sur leur composition chimique. Ils ne tiennent pas compte d'autres paramètres tels que les propriétés vitreuses ou cristallines, la granulométrie ou la surface spécifique, la température, etc. Lorsque le laitier est trempé et broyé finement, les propriétés de collage apparaissent et la température augmente la cinétique. Le produit formé, analysé par diffraction des rayons X et observé au MEB combiné à la microanalyse, est une phase semi-cristalline à basse température. Dans le produit cuit à la vapeur, la teneur en chaux est plus faible, elle réagit avec la silice : la teneur en CSH est plus élevée. Le sulfate de calcium hydraté et le sulfate d'aluminium (ettringite) se produisent à température ambiante, comme dans le cas de la prise du ciment Portland, mais ne sont pas présents dans le ciment de laitier de cuisson. A l'inverse, la formation d'hydrate d'aluminate de calcium facilite la cuisson.

Provient comme sous-produit de la fonderie d'El-Hadjar Annaba. Un broyage de 1h et 30 min du laitier granulé figure, a été effectué au laboratoire de la cimenterie de Lafargeholcim/hammam dala avec un broyeur horizontal a boulet type BURBERS ; les caractéristiques physiques et chimiques de L sont présentées dans le tableau3.4.



Figure III. 4Broyage de laitier.

Tableau III. 4.4Propriétés physiques de métakaloin et laitier

	PAF	SSB (cm ² /g)	ρ(g/cm ³)
MKT	1. 1	7041	2, 70
L	1, 03	4155	3, 08

III.5. Fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont :

La fibre de chanvre (Cannabis) est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3 m. Elle ressemble au lin. Le chanvre se développe beaucoup plus en Chine, au Canada et en Europe. Cette fibre possède une résistance élevée à la traction (entre 600 et 1100 MPa). Ceci favorise son utilisation dans plusieurs domaines tels que l'industrie du papier et en renforcement des matériaux cimentaires (bétons). Cette fibre a été utilisée avec une longueur environ 1,5 cm. Pour améliorer l'adhérence de ces renforts avec la matrice de géopolymère, les fibres de chanvre ont été mises dans une solution contenant 5% de l'hydroxyde de sodium à une température de 20°C durant 2 heures. Ces fibres sont ensuite séchées devant un chauffage à une température de 40°C. Ce traitement chimique peut éliminer la lignine et les substances cirieuses recouvrant la surface externe de la paroi cellulaire des fibres. L'hydroxyde de sodium (NaOH) est le produit chimique le plus couramment utilisé pour blanchir et/ou nettoyer la

surface des fibres végétales. Sur la figure 3.2 sont présentées des fibres de chanvre traitées et de la fibre de polypropylène. Cette dernière a été utilisée avec une longueur de 1,5 cm. Tableau 3.5. Présente les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des fibres de chanvre et de polypropylène.



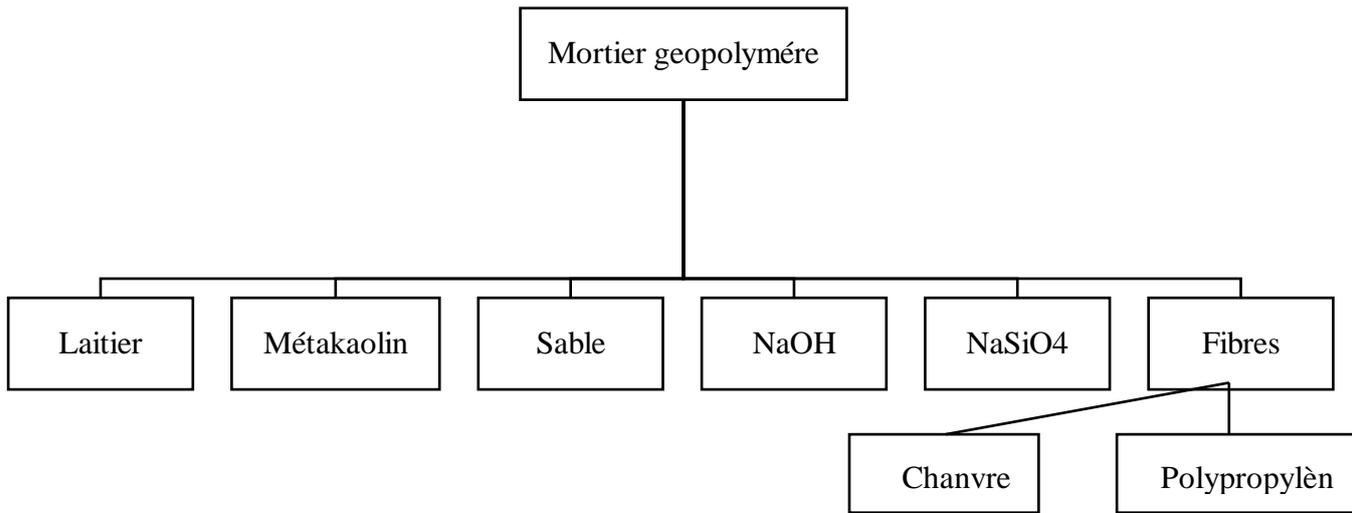
Figure III. 5 Photos de différentes fibres utilisées.

Tableau III. 5 Caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des fibres végétales et de la fibre polypropylène

Fibre naturel	Polypropylène	Chanvre
Densité absolue (Kg/m ³)	900-950	1580
Lignines (%)	/	6
Cellulose (%)	/	56.1
Hémicellulose (%)	/	10.9
Cendre (%)	/	/
Résistance à la traction (MPa)	240-760	619,2
Déformation maximale (mm)	/	0,682
Absorption d'eau (%)	/	158
Diamètre μm	30	110
Longueur cm	1,2	1,5

III.6. Formulation des géopolymères

La formulation des géopolymère reste de nos jours un peu approximatif, en effet plusieurs chercheur tel que Davidovits JOAO et CASTRO GOMEZ ont développé les méthodes les plus efficaces pour obtenir un mélange de géopolymère qui peut offrir des caractéristiques optimales avec une bonne revalorisation des déchets existants.



Notre étude expérimentale a consisté à ajouter différents dosages (0.1%, 0.3% par rapport au volume total du mortier) des fibres de chanvre et de polypropylène dans les mortiers.

Tableau III. 6 Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.

Quantité (kg/m ³)	MT	M-0.1CH	M-0.3CH	M-0.1PP	M-0.3PP
Laitier	453,89	\	\	\	\
Métakaolin	50,4	\	\	\	\
Sable	1350	\	\	\	\
NaOH	88,26	\	\	\	\
NaSiO₄	264,794	\	\	\	\
Fibres	-	1,4	4,2	0,8	2,4

III.7. Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes

III.7.1. Malaxage du mortier

On fait le malaxage de chaque gâchée de mortier géopolymère mécaniquement au moyen du malaxeur à mortier (figure 3.9).



Figure III. 6 Malaxeur à mortier.

- Tout d'abord on a mélangé les fibres et les poudres (métakaolin et laitier) à l'état sec.



Figure III. 7 mélangé les fibres et les poudres

- Puis on mis le mélange dans la cuve.
- En ajoutant la solution chimique (NaOH et NaSiO_4), qui été déjà préparé un jour à l'avance.



Figure III. 8 préparé la solution chimique

Pour préparé la solution chimique en mélangeant la silicate de sodium, l'hydroxyde de sodium et l'eau. Puis on mixe la solution à l'aide d'un agitateur.

- En mélange les composants 30s avec une vitesse lente, après on rajoute le sable avec des petites quantité en 30s.
- Le malaxage sera avec une vitesse rapide pendant 30s. Arrêter le malaxage puis racler pendant 15 secondes
- Finalement, mettre en marche le malaxeur pendant 1 minutes supplémentaires.

III.7.2. Préparation des éprouvettes

- Les éprouvettes sont de forme cubiques (25 mm × 25 mm × 25 mm) et de forme rectangulaire (40 mm × 40 mm × 160 mm).

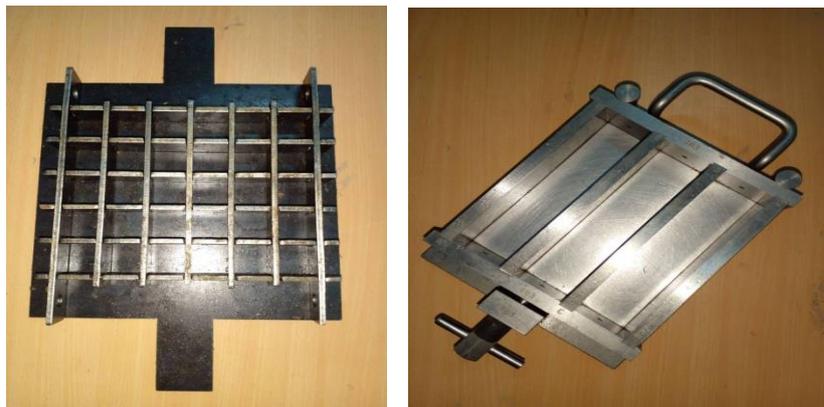


Figure III. 9 Les moules

- Les moules doivent être huilés avant le coulage.
- La mise en place doit être par couche et on utilise la table vibrante pour un mortier moins de pores.

- Le démoulage doit être après 24 heures depuis le coulage.



III.7.3. Conservation

Afin de déterminer les propriétés mécaniques et physiques, les moules contenant les mortiers ont été recouverts d'un film plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Les échantillons ont été démoulés après 24 h et conservés dans des boites en plastique jusqu'aux tests à 7 et 28. Alors que les échantillons utilisés pour déterminer la résistance à la chaleur, nous le mettons dans un four à différentes températures (600 °C , 300 °C, 150 °C).



Figure III. 10 Conservation des éprouvettes



Figure III. 11 traitement thermique

III.8. Résistances mécaniques

III.8.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression du mortier est évaluée à l'aide de nombres semi-premiers. Le demi-prisme est situé entre les deux plateaux du dispositif MATEST, et le chargement s'effectue à une vitesse constante de 0,05 MPa/s jusqu'à rupture. Nous effectuons la charge d'écrasement p et la résistance de l'appareil en MPa. L'essai est réalisé selon la norme NF P 15-471.

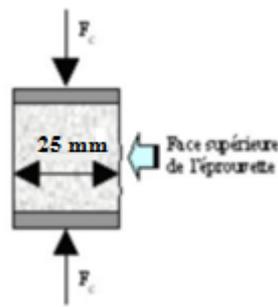


Figure III. 12 schéma de l'essai de compression

III.8.2. Résistance à la flexion

La détermination de la résistance à la flexion par traction des mortiers a été effectuée à l'aide d'une presse hydraulique MATEST conformément à la norme NF EN 196-1 [199]. Pour chaque formulation, trois prismes $40 \times 40 \times 160$ mm³ ont été confectionnés et après 28 jours de durcissement, les éprouvettes ont été testées en flexion trois points avec une vitesse de chargement de 0,5 et 0,05 MPa par seconde pour l'essai respectivement figure





Figure. Essai de flexion sur mortier géopolymère.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous décrivons la caractérisation de différents mélanges de matériaux de base. La composition répond aux normes et recommandations des mortiers géopolymères. Cela nous permet d'adopter plus facilement la méthode de formulation appropriée. Ces propriétés inhérentes aux différents composants permettent de comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges sous différentes contraintes.

Chapitre 4

Résultat et discussion

IV.1. Introduction

Les travaux suivants portent sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques des mortiers de géopolymère à base de laitier et métakaolin contenant différentes proportions et types de fibres (chanvre et polypropylène).

IV.2. Résultats et discussion

IV.2.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers témoins et modifiés par les fibres en fonction de l'âge et de la teneur en fibres (polypropylène et chanvre) sont illustrés par la figure 4.1. Ces résultats sont la moyenne de six essais sur des éprouvettes cubiques de dimensions (25 mm × 25 mm × 25 mm).

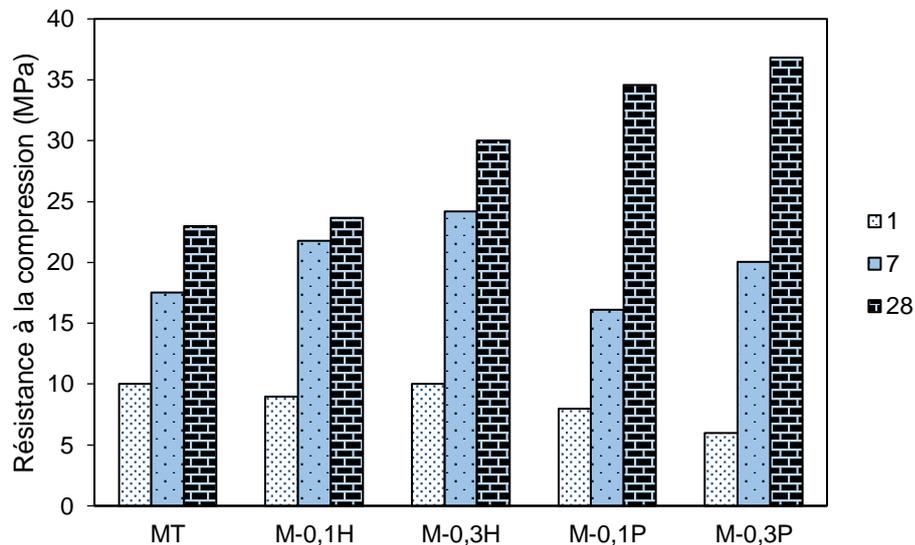


Figure IV. 1 Résistance à la compression des différents mortiers confectionnés

Une première analyse des résultats, conduit à l'observation suivante :

La durée de durcissement a eu un effet positif sur la majorité des échantillons testés. De plus, la résistance à la compression de MT est diminuée à 7 et 28 jours d'âge respectivement par rapport au mortier modifier par des fibres (chanvre et polypropylène). De plus, on constate que l'introduction de 0.3% de fibres de chanvre dans les mortiers géopolymères révèle une augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours de 27 % et 30 % respectivement par rapport au MT. Ainsi, la présence de 0.3 % de fibre polypropylène dans les mortiers géopolymères provoque une augmentation remarquable à 28 jours de 45% respectivement. Dans une étude récente de (Candamano et al., 2021) ont montré que le

prétraitement chimique des fibres de chanvre est efficace pour éliminer les hémicelluloses, la lignine et les cires, offrant ainsi une surface de fibres propre (Belkadi et al., 2018). On conclut que l'utilisation de 0.3% de fibre de chanvre favorise une amélioration de la résistance à la compression des mortiers géopolymères mais l'utilisation de 0.3% de fibre de polypropylène donne une meilleure amélioration de résistance que MT et M-CH.

IV.2.2. Résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion des mortiers témoins et modifiés en fonction de l'âge et la teneur en fibres (polypropylène et chanvre) sont illustrés par la figure 4.2. Ces résultats sont la moyenne de trois essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (40 mm x 40 mm x 160 mm).

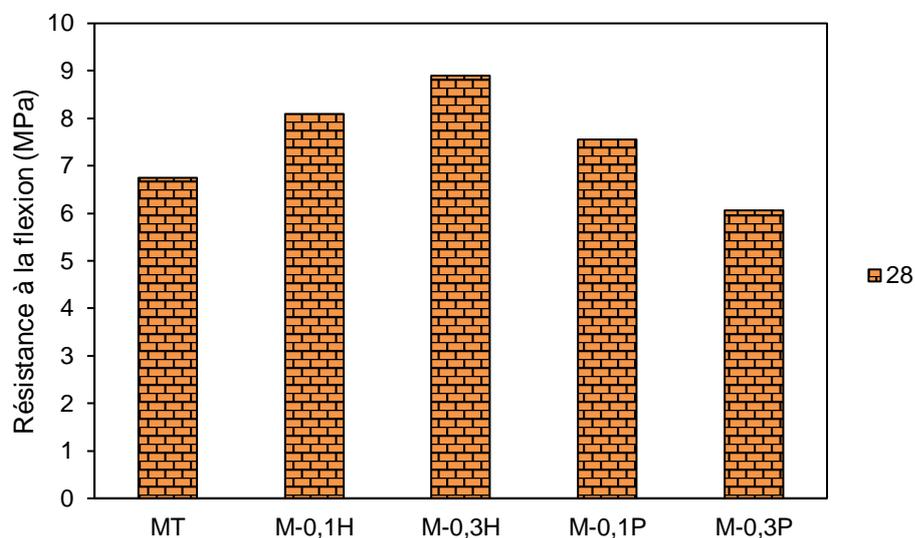


Figure IV. 2 Résistance à la flexion des différents mortiers confectionnés.

La figure 2 représente la résistance à la flexion des différents mortiers confectionnés. A 28 jours, Les mortiers modifiés contiennent des fibres (chanvre et polypropylène) présentent les meilleures résistances à la flexion par rapport aux MT Cette amélioration varie selon le dosage et la nature des fibres. La teneur des fibres optimale est de 0.3 % pour les fibres de chanvre et 0.1% pour la fibre de polypropylène qui révèle une augmentation d'environ 30% et 12% par rapport au MT. Le traitement alcalin des fibres de chanvre provoque une amélioration de la liaison interfaciale entre la chaîne cellulosique des fibres et le géopolymère. Cette liaison améliorée peut être créditée de la précipitation du géopolymère dans la surface exposée des fibrilles et les cavités des fibres. Ce phénomène a grandement amélioré la résistance aux fissures et réduit la propagation des fissures des composites. De

plus, Selon (Xu et al., 2010) la matrice géopolymère montre une bonne adhérence avec les fibres de polypropylène grâce au film polymère mince qui comble les vides entre les particules. Ceci, provoque une amélioration de la résistance à la traction et la ténacité des mortiers à base de géopolymère.

4.2.3. Masse volumique

La densité est un facteur important pour déterminer la porosité des mortiers géopolymères et évaluer la durabilité.

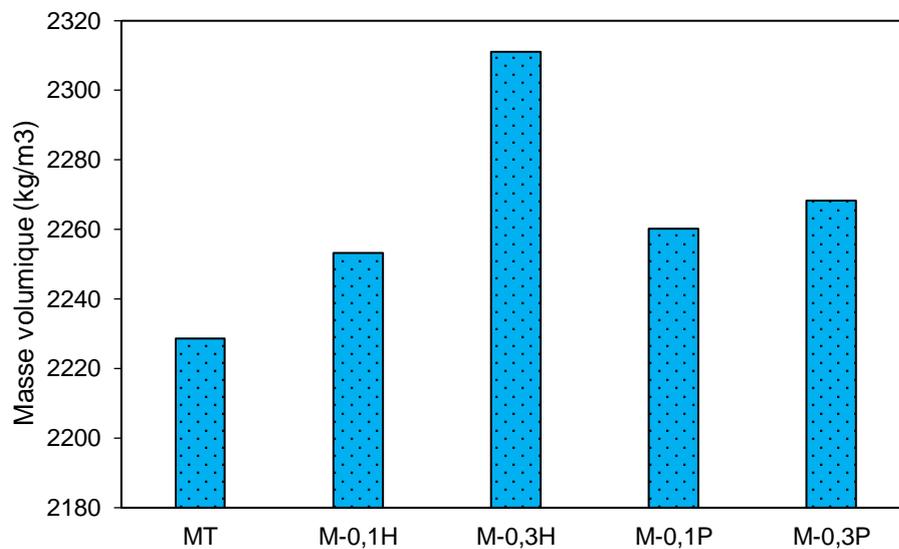


Figure IV. 3 La masse volumique de différents mélanges.

Dans la figure. 3, on constate que la présence de fibres dans le mortier géopolymère augmente la densité par rapport au témoin. Il convient également de noter que M-0.3H a une densité très élevée par rapport aux autres mélanges.

IV.2.3. Résistance à haute température

Généralement les géopolymères se comportent bien à haute température.

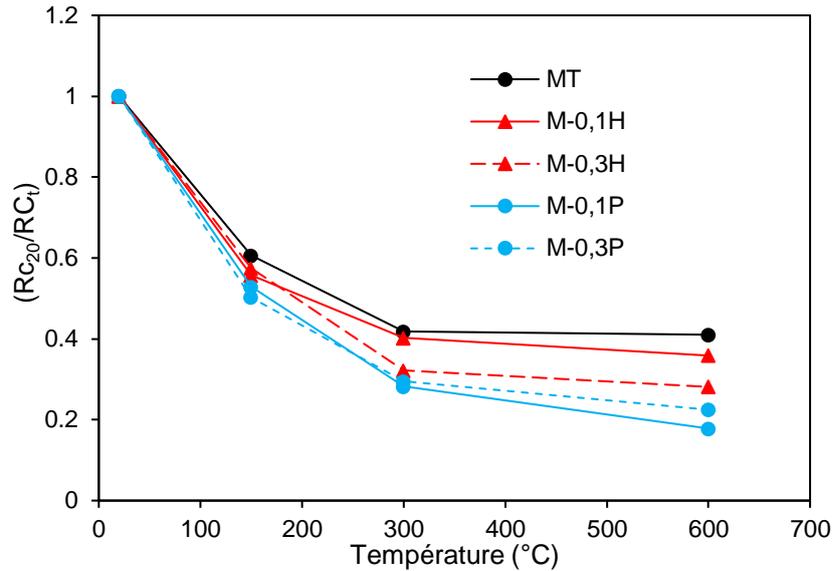


Figure IV. 4 Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température.

Le comportement des mortiers géopolymères avec des fibres et sans fibres diffère sensiblement entre 20°C et 600 ° C. Ainsi :

A une température comprise entre 20°C et 150°C : une diminution de la résistance pour tous les mortiers géopolymères a été remarquée. Cette diminution varie entre 15% et 38%. La plus faible résistance concerne les M-P, Cela est dû probablement à la fusion de la fibre de polypropylène provoquant des pores supplémentaires. Ces pores ont conduit à une réduction rapide de la résistance. Les mortiers géopolymères avec les fibres végétales présentent une légère diminution d'environ de 15%.

A une température entre 150 et 300°C : on observe une diminution de la résistance d'environ de 50% à 70%. On constate que les mortiers géopolymères sans fibres ont un meilleur comportement par rapport au M-H et au M-P.

A une température de 600 °C : tous les échantillons présentent une diminution de la résistance de 55 % à 80 %. Les mélanges présentent de faible dans ses propriétés mécaniques. La microstructure est détériorée rapidement par une transformation chimique et la décomposition. A ces températures, de nombreuses fissures ont été observées dans la zone de transition interfaciale (Fares, Remond et al. 2010).

En conclusion, les fibres végétales jouent un rôle important sur le comportement mécanique des mortiers géopolymères que des fibres de polypropylènes sous élévation de la température.

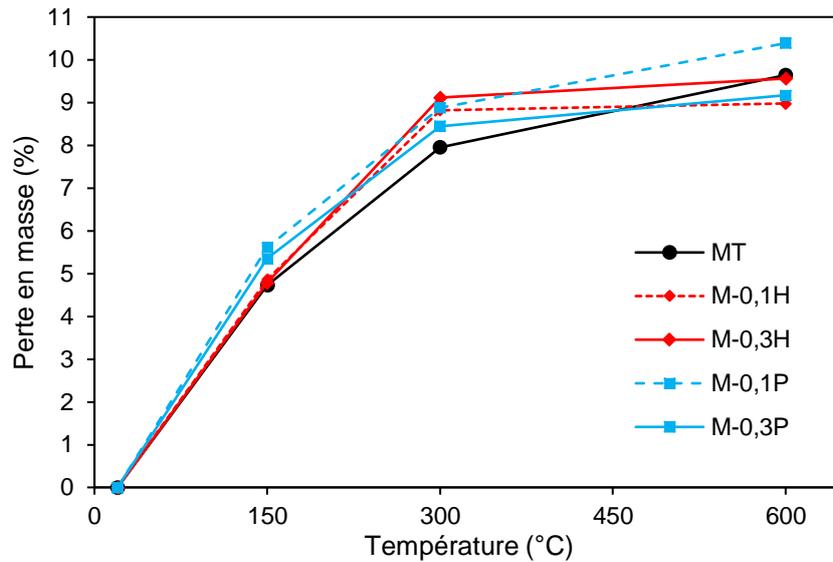


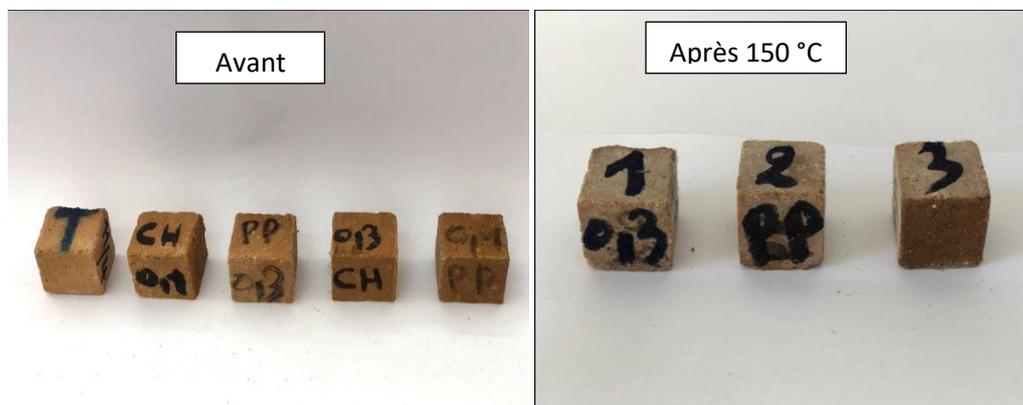
Figure IV. 5 Evolution de la perte en poids des géopolymères aux différentes températures

Sur la figure. 5, nous observons que l'évolution de la perte de masse en fonction de la température est à peu près similaire pour les cinq mélanges étudiés. On remarque entre 20°C et 150 ° C une variation du poids assez faible dans tous les mélanges. Dans ce cas cette perte de masse correspond au départ de l'eau libre contenant dans les pores capillaires.

Entre 150 et 300 ° C, on constate une augmentation importante de la perte en poids d'environ 7 et 9% par rapport à la masse initiale. D'après M. K. Tshimanga (Tshimanga 2006) la perte de masse entre 150 et 300 ° C correspond à l'évaporation de l'eau liée. Au-delà de 300 la cinétique de la perte de masse diminue. La perte en poids des mélanges fibrés est moyennement moins élevée que les MT.

IV.2.4.Observation visuelle

Figure 4.7.Illustre une examinassions visuelle des différents mélanges de géopolymères



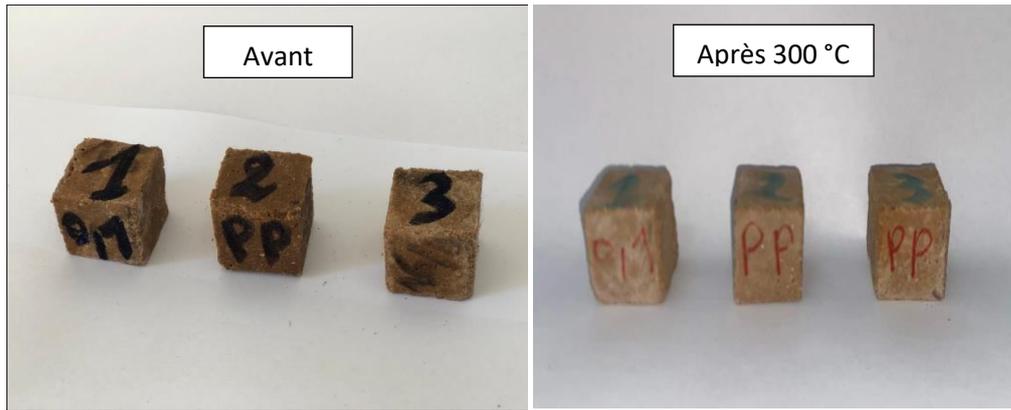


Figure IV. 6 Observation visuelle des différents mélanges confectionnés.

On constate d'après la figure 4.6 que la couleur des éprouvettes après le traitement thermique est devenue claire. De plus aucune d'apparition des fissures existe dans les tous les mélanges traités thermiquement.

IV.3. Conclusion

Cette étude a le potentiel de mettre en évidence l'impact des fibres végétales sur les propriétés mécaniques et propriétés de transfert du mortier géopolymère. Ces fibres améliorent spécifiquement les propriétés mécaniques et physiques à court terme et long terme. De plus, les fibres de chanvre sont plus performantes que comportement des fibres de polypropylènes.

Conclusion générale

Cette étude a fait l'objet de l'élaboration des matériaux géopolymère à faible impact environnemental en utilisant deux fibres matériaux distincts, fibre de chanvre et fibre de polypropylène.

L'objectif de notre étude était de voir l'effet de ces fibres dans les mortiers géopolymères sur les plans : performances mécaniques, physiques et durabilité.

Pour cela, fibre de chanvre et de polypropylène ont été utilisées avec différents pourcentages 0.1% et 0.3%. L'approche est essentiellement expérimentale on peut tirer les conclusions suivantes :

En se basant sur les résultats obtenus, on peut dire qu'il est possible d'utiliser ces deux fibres dans les mortiers géopolymères avec un taux qui ne dépasse pas 0.3%. Ainsi la présence de 0.3% de fibre de chanvre dans le mortier présente des performances mécaniques intéressantes du mortier par rapport au mortier témoin à 28 jours.

Par ailleurs, le remplacement 0.1% avec polypropylène les propriétés mécaniques et physiques se diminuent. De plus la présence de ces fibres végétales rend les matériaux géopolymères plus économique et écologique.

L'introduction des fibres diminue la résistance des géopolymères vis-à-vis au feu par rapport témoin sans fibre.

Dans les géopolymères fibrés, ne peut pas être utilisée plus de 0,3% des fibres, car le mélange à 0,5% qu'on a fait dans le laboratoire ne pouvait même pas être mélangé avec le malaxeur.

References

- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- Aydın, S., & Baradan, B. (2013). The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 63-69.
- Barsoum, M., Ganguly, A., & Hug, G. (2006). Microstructural evidence of reconstituted limestone blocks in the Great Pyramids of Egypt. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(12), 3788-3796.
- Bažant, Z. P., & Ožbolt, J. (1992). Compression failure of quasibrittle material: Nonlocal microplane model. *J. Eng. Mech*, 118(3), 540-556.
- Bernal, S., De Gutierrez, R., Delvasto, S., & Rodriguez, E. (2010). Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 24(2), 208-214.
- Boumediene, M. (2022). *ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX GÉOPOLYMÉRES ÉTUVÉS*].
- Castel, A., & Foster, S. J. (2015). Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 72, 48-53.
- Davidovits, J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis*, 35(2), 429-441.
- El Alouani, M., Saufi, H., Moutaoukil, G., Alehyen, S., Nematollahi, B., Belmaghraoui, W., & Taibi, M. h. (2021). Application of geopolymers for treatment of water contaminated with organic and inorganic pollutants: State-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105095.
- Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., & Demirboğa, R. (2021). Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 44, 102628.
- Gao, X., Yu, Q., Yu, R., & Brouwers, H. (2017). Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites. *Materials and Structures*, 50(2), 1-14.
- Hosan, M. A. (2016). *Residual mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer concrete (SFRGC) after exposure to elevated temperatures*, Curtin University].
- Lyon, R. E., Balaguru, P., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J., & Davidovics, M. (1997). Fire-resistant aluminosilicate composites. *Fire and materials*, 21(2), 67-73.
- Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., & Aslani, F. (2018). Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 454-475.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Mehrali, M., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2015). Graphene nanoplatelet-fly ash based geopolymer composites. *Cement and Concrete Research*, 76, 222-231.
- Ranjbar, N., Talebian, S., Mehrali, M., Kuenzel, C., Metselaar, H. S. C., & Jumaat, M. Z. (2016). Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Composites Science and Technology*, 122, 73-81.
- Senff, L., Novais, R., Carvalheiras, J., & Labrincha, J. (2020). Eco-friendly approach to enhance the mechanical performance of geopolymer foams: Using glass fibre waste coming from wind blade production. *Construction and Building Materials*, 239, 117805.
- Singh, S., Singh, A., & Bajaj, V. (2010). Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres.

- Wang, W., Wang, L., Shi, Q., Yu, H., Chen, T., Wang, C., & Sun, T. (2006). Progress of the surface modification of PP fiber used in concrete. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 45(1), 29-34.
- Wei, B., Zhang, Y., & Bao, S. (2017). Preparation of geopolymers from vanadium tailings by mechanical activation. *Construction and Building Materials*, 145, 236-242.