

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 GENIE CIVIL

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Matériaux

Par

- SILEM Ismail
- SEGHOOR Hicham

Intitulé

*Etude de la nature des nouvelles additions et du traitement thermique sur le
comportement mécanique des géopolymères*

Soutenu le : 15 septembre 2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.NOUI Ammar</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BOUGLADA Mohamed Salah</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à remercier Allah le tout puissant de nous avoir aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous adressons, nos vifs remerciements à nos encadrants :
M. NOUI Ammar et M.BELKADI Ahmed Abderraouf pour leur contribution dans l'élaboration de ce projet grâce à leurs orientations et conseils.

Nous exprimons toute notre gratitude à nos parents qui nous ont soutenu tout au long de notre cursus dès le primaire jusqu'à l'écriture de ces lignes. Mille mercis.

Un grand merci à nos enseignants qui par leurs paroles et leurs critiques, ont guidés nos réflexions afin de perfectionner notre savoir-faire.

Enfin, nous témoignons toute notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Le ciment géopolymère a des propriétés physiques exceptionnelles et un impact positif sur l'environnement par rapport au ciment conventionnel. L'effort actuel met en évidence une stratégie de gestion des déchets de verre et de béton démolé pour les recycler dans les mortiers géopolymères.

Dans cette recherche, 3 mélanges de mortiers géopolymères ont été formulés pour étudier l'effet de la présence de la poudre de verre et de fine recyclée sur le comportement des géopolymères. Différents traitements thermiques (température (60 °C) et humidité 100%) ont été réalisés. Des essais à l'état frais (étalement) et à l'état durci (résistance à la compression) ont été effectués.

Les résultats obtenus par ce travail montrent que le mortier géopolymère à base des fines de béton démolé présente une meilleure résistance à la compression par rapport aux mortiers témoin. Ainsi le traitement thermique à 60°C révèle une résistance élevée des différents mélanges étudiés. Les résultats obtenus par ce présent travail laissent penser qu'il existerait un avenir prometteur pour l'utilisation des fines recyclées dans les matériaux.

Mots clés :

Mortier géopolymère, déchets de verre, fines de béton démolé, résistance à la compression, traitement thermique.

Summary

Geopolymer cement has exceptional physical properties and positive environmental impact compared to conventional cement. The current effort highlights a strategy for managing waste glass and demolished concrete for recycling into geopolymer mortars.

In this research, 3 mixtures of geopolymer mortars were formulated to study the effect of the presence of glass powder and recycled fines on the behavior of geopolymers. Various heat treatments (temperature (60°C) and 100% humidity) were carried out. Tests in the fresh state (spreading) and in the hardened state (compressive strength) were carried out.

The results obtained by this work show that the geopolymer mortar based on demolished concrete fines has better compressive strength compared to the control mortars. Thus the heat treatment at 60°C reveals a high resistance of the various mixtures studied. The results obtained by this present work suggest that there would be a promising future for the use of recycled fines in materials.

Key words :

Geopolymer mortar, glass waste, demolished concrete fines, compressive strength.

ملخص

يتميز الأسمنت الجيوبوليمر بخصائص فيزيائية استثنائية وتأثير بيئي إيجابي مقارنة بالأسمنت التقليدي. يسلمت الجهد الحالي الضوء على استراتيجية لإدارة نفايات الزجاج والخرسانة المهذمة لإعادة تدويرها في ملاط جيوبوليمر. في هذا البحث تمت صياغة 3 مخاليط من ملاط الجيوبوليمر لدراسة تأثير وجود مسحوق الزجاج والغرامات المعاد تدويرها على سلوك الجيوبوليمرات. تم إجراء معالجات حرارية مختلفة (درجة حرارة 60 درجة مئوية) ورطوبة 100%). تم إجراء الاختبارات في الحالة الطازجة (الانتشار) وفي الحالة الصلبة (مقاومة الانضغاط). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذا العمل أن مونة الجيوبوليمر المعتمدة على حبيبات الخرسانة المهذمة تتمتع بمقاومة ضغط أفضل مقارنة بملاط التحكم. وهكذا تكشف المعالجة الحرارية عند 60 درجة مئوية عن مقاومة عالية للخلائط المختلفة التي تمت دراستها. تشير النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذا العمل الحالي إلى أنه سيكون هناك مستقبل واعد لاستخدام الغرامات المعاد تدويرها في المواد.

Table des métiers

RESUME

Introduction générale	11
Chapitre I : Etat de l'art sur les géopolymères	13
I.1 Introduction	14
I.2 Historique	14
I.3 Définition des géopolymères	17
I.4 Différents types de géopolymère	18
I.4.1 Géopolymère à base de laitier	18
I.4.2. Géopolymère à base des roches volcaniques.....	19
I.4.3 Ciment géopolymère à base de cendres volantes	19
I.5 Microstructure du liant géopolymère à l'état durci.....	20
I.6 Formulation des géopolymères.....	20
I.7 Application des geopolymeres.....	21
I.8 Avantages et inconvénients des géopolymère.....	23
I.9 Conclusion.....	24
Chapitre II : Généralité sur les déchets de verre	
II.1 Introduction	26
II.2 Poudre de verre.....	26
II.3 Composition chimique et minéralogique.....	26
II.4 Utilisation des déchets de verre dans une matrice cimentaire.....	27
II.5 Activité pouzzolanique du verre.....	27
II.6 Utilisation des granulats et correcteur granulaire.....	27

II.7 Réaction Alkali-Silice de la poudre de verre.....	28
II.8 Domaines d'applications.....	29
II.9 Conclusion	29

Chapitre III : Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

III.1 Introduction.....	31
III.2 Granulats.....	31
III.2.1 Sable.....	31
III.3 Activateurs.....	32
III.3.1 Silicate de sodium liquide.....	32
III.3.2 NaOH.....	33
III.3.2.1 Propriétés physiques.....	34
III.3.2.2 Propriétés chimiques.....	34
III.4 Laitier granulé de haut fourneau	35
III.5 Formulation des géopolymères.....	35
III.6 Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes.....	37
III.6.1 Malaxage du mortier.....	37
III.6.2 Préparation des éprouvettes.....	37
III.7 Traitement thermique	
III.8 Résistances mécaniques	38
III.9 Conclusion	39

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction	41
IV.2. Propriétés à l'état frais.....	41
IV.2.1. Etalement.....	41
IV.3. Propriétés à l'état durci	42

IV.3.1 Résistance à la compression.....	42
IV.4. Conclusion	46
V. Conclusion générale.....	48

Liste des figures

Figure I.1. Pavé de géopolymère en Australie(www.zeobond.com).....	16
FigureI.2. Buildings made with alkali-activated binders based on slag a) in Lipetsk (Russia)from 1994 b) In Mariupol (Ukraine) 1960.....	18
FigureI.3. Micrographies SEM de (a-e) sections polies et (f) surface de fracture des échantillons (flèches indiquant les grains de Na–Al–Si)	21
FigureI.4. Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994	23
FigureI.5. L’institut GCI (The Global Change Institutue) à l’université du Queensland, Australie, 2013.....	24
Figure II.1 : Fissurations et formation du gel dans les granulats de verre.....	29
Figure II.2 : Valorisation des déchets de verre dans diverses applications de construction.....	30
FigureIII.1. Courbe granulométrique du sable de dune (OUED SOUF)	33
FigureIII.2. Silicate de sodium.....	33
Figure III.3. NaOH.....	34
Figure III.4. Broyage de laitier.....	36
Figure III.5. Conservation des éprouvettes.....	37
Figure III.6. Malaxeur à mortier.....	38
Figure III.7. Schéma de l’essai de compression.....	40

Figure IV.1. Diamètre de l'étalement de différents mélanges.....	42
Figure IV.2. Photos de l'essai d'étalement de différents mélanges.....	43
Figure IV.3 Résistance à la compression des différents mortiers.....	44
Figure IV.4. Photo de l'écrasement des différents mélanges.....	45

Liste des tableaux

Tableau III.1. Différentes caractéristiques du sable utilisé.....	32
Tableau III.2. Caractéristiques chimiques du silicate de sodium.....	34
Tableau III.3. Caractéristiques physiques de NaOH.....	35
Tableau III.4. Propriétés physiques de métakaloin et laitier.....	36
Tableau III.5. Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.....	37

Introduction général

Introduction général

Les matériaux en ciment sont largement utilisés dans la société moderne. La demande du ciment est variée du fait de la souplesse de mise en œuvre, sur site ou préfabriqué, aussi en raison de ces propriétés ; le ciment Portland (CPA) 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 du 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'application car leurs propriétés telle que la résistance au feu et la résistance aux attaques acides.

Pouvoir utiliser les déchets industriels comme des liants peut réduire les émissions massives de dioxyde de carbone par rapport au ciment Portland. A titre d'exemple, une tonne de ciment géopolymère a 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 recherches 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 étudiés.

Dans le cadre de cette étude, des fines recyclées et de verre ont été utilisées en remplacement de laitier, Ainsi, notre 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).

Introduction général

- ✚ Le deuxième chapitre, est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur la nature des fines utilisées et leur influence sur les géopolymères à l'état frais, durcissant et durable.

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 regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus. Ceci constitue le troisième chapitre.
- ✚ Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude de l'influence des fines recyclées sur le comportement et la durabilité des géopolymères ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre 1

Etat de l'art sur les géopolymères

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 l'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 kaolinitiques, 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 ça

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 présente un ciment Pyrament 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 et 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. Buildings made with alkali-activated binders based on slag a) in Lipetsk (Russia) from 1994 b) In Mariupol (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.

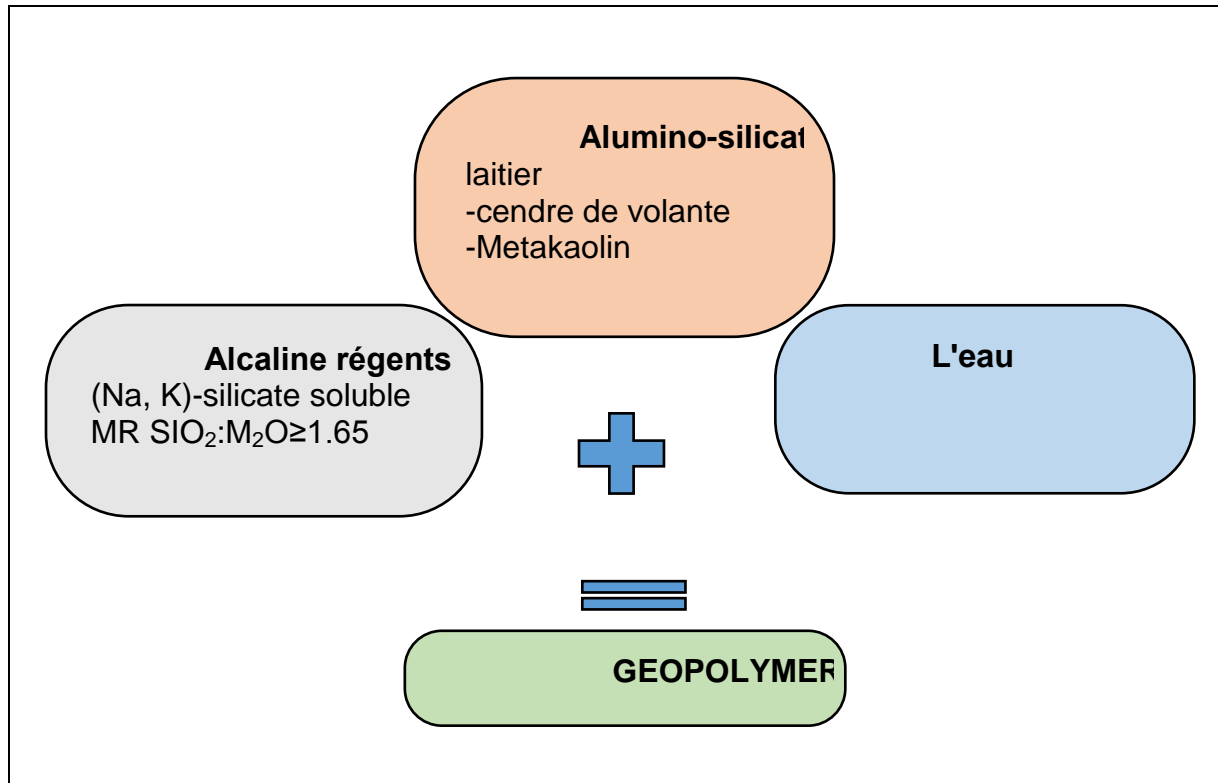


Figure I. 1 formulation de géopolymère

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 (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.

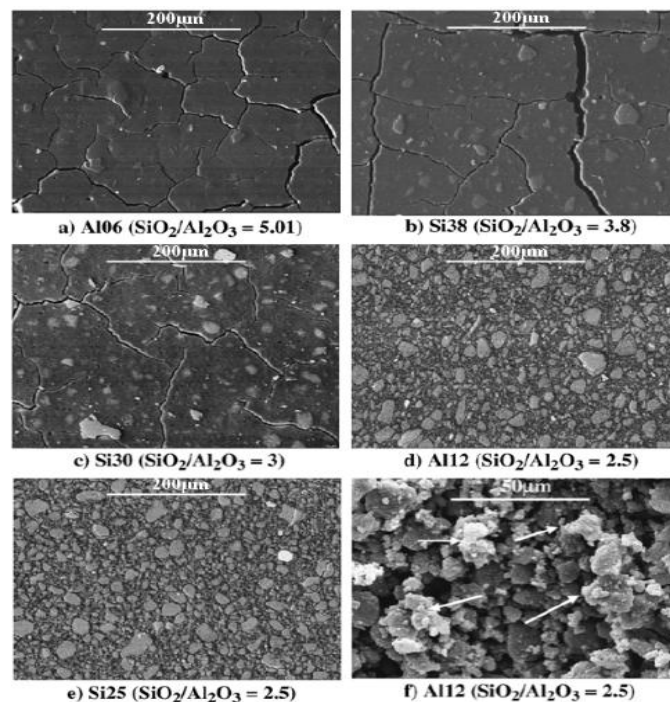


Figure I.3. Micrographies SEM de (a-e) sections polies et (f) surface de fracture des échantillons (flèches indiquant les grains de Na-Al-Si)

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 $\text{H}_2\text{O}/\text{m}_2\text{O}$ ($\text{m}=\text{Na}$ 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 géopolymères

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 réussi à réaliser une série de bâtiments en utilisant des bétons géopolymères à base de Laitier.



FigureI.4. 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.



FigureI.5. L'institut GCI (The Global Change Institute) à l'université du Queensland, Australie, 2013. (Boumediene, 2022).

I.8 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 :« cimenter ». 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 est 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 du 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

Généralité sur les déchets de verre

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons voir les différentes éventuelles utilisations de la poudre de verre comme substituant du laitier ainsi que sa composition chimique et la faisabilité de cette substitution.

Ensuite, nous montrons l'utilisation des déchets de verre comme correcteur granulaire et essayons de prouver son efficacité dans la construction.

II.2 Poudre de verre

Le verre hybride est une grande quantité de déchets générés tout au long du processus de fabrication de verre dans le monde. Le fait que ce verre ne soit pas recyclé est un problème impact environnemental majeur car contrairement aux autres déchets (papier, déchets organiques), le verre mélangé ne peut pas être mis en décharge. Ses propriétés sont considérées comme des propriétés physico-chimiques stables garantissent que le matériau n'est pas biodégradable opportun.

D'autre part, le verre incolore peut être réutilisé plusieurs fois. Ses propriétés physico-chimiques n'ont pas changé de manière significative, C'est pourquoi ce verre a une bonne valeur ajoutée.

Différentes méthodes et applications de recyclage du verre sont introduites dans le béton. Récemment, des études portant sur l'utilisation du verre mixte dans le béton ont mis en évidence les avantages d'exploitation et de valorisation de ce produit.

II.3 Composition chimique et minéralogique

La composition chimique et minérale du verre a des propriétés intéressantes pour le béton, en effet l'utilisation de verre finement broyé en remplacement partiel du ciment dans le béton a été fabriqué pour la première fois dans les années 1970. Le résultat montre que le

verre est avant tout un matériau amorphe principalement composé de silice et considéré comme le matériau de choix dans la fabrication de la pouzzolne. Cependant, le verre contient une teneur en alcali relativement élevée (10-16%), ce qui peut favoriser les réactions alcalines dans le béton et les liaisons des agrégats réactifs (Khmiri et al. 2013, Tagnit-Hamou&Tognonvi 2013).

Selon les résultats de la recherche sur la composition chimique du verre retrouvé dans les matières résiduelles et recyclables, la composition chimique du verre est très constante (Pereira-de-Oliveira et Paragraphe 2008)

II.4 Utilisation des déchets de verre dans une matrice cimentaire

Les déchets de verre peuvent être utilisés sous forme de granulats de verre ou sous forme de poudre (Verox).

De nombreux chercheurs ont élucidé les propriétés pouzzolaniques du verre. Cette activité pouzzolanique est parfois similaire ou supérieure à celle de certains adjuvants ou additifs Cimentaire (CA) comme les cendres volantes ou la fumée de silice. En revanche, du fait de la présence de métaux alcalins et alcalino-terreux (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) et de silice amorphe dans les déchets de verre, il est possible d'envisager l'utilisation de cette poudre comme matière première pour la fabrication du ciment géopolymère.

A noter que ces ciments sont plus écologiques que les ciments Portland et que la durabilité de la matrice cimentaire contenant de la poudre de verre a également fait l'objet de plusieurs travaux.

II.5 Activité pouzzolanique du verre

Observation de l'activité des déchets de verre selon plusieurs protocoles test tel que défini dans la norme ASTM C311. Tous les travaux montrent que la poudre de verre est un matériau pouzzolanique à activité retardée par rapport aux autres additifs.

Cela offre la possibilité d'utiliser la poudre de verre pour :

- a. Substituer de la poudre de quartz dans des bétons ultra-hautes performances
- b. Substituer des liants cimentaires
- c. Comparer son activité pouzzolanique avec d'autres additions minérales (MK, CV, FS, ...).

II.6 Utilisation des granulats et correcteur granulaire

L'utilisation des granulats ou de la poudre de verre comme correcteur granulaire est l'une des voies les plus adaptées pour la valorisation des déchets de verre.

D'une part, leurs propriétés mécaniques sont proches de celles du quartz (sable). D'autre part, ils sont disponibles sous forme de fragments (granulats d'environ 1 à 5 cm) ce qui permet d'adapter la granulométrie de façon à atteindre une compacité structurale la plus élevée possible. L'utilisation du verre comme correcteur granulaire nécessite une optimisation du mélange granulaire.

II.7 Réaction Alkali-Silice de la poudre de verre

De nombreuses recherches ont été menées sur le comportement du verre (concassé et granulé) dans les matrices cimentaires.

Il semble que la classe de verre fin est similaire à la granulométrie du ciment, et montre une activité pouzzolanique significative sans aucun risque sur la réaction alcali-silice (RAS). D'autre part, les granulats de verre présentent à la fois une activité Cendres volcaniques moins importantes et RAS très important responsable de la formation de gel (N, K-C-S-H) à l'intérieur des agrégats.

Ce gel crée une pression lacunes dans le granulat de verre, provoquant le développement de fissures vers le cœur du granulat.

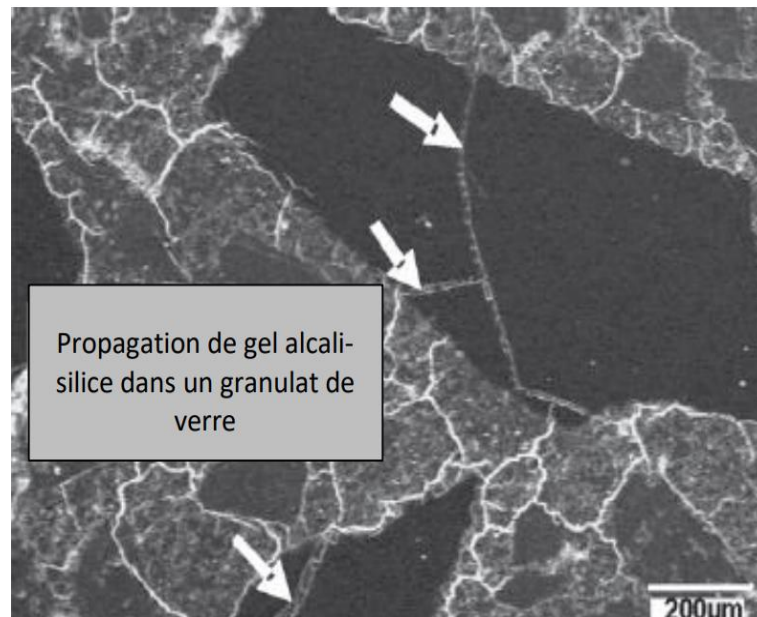


Figure II.1 : Fissurations et formation du gel dans les granulats de verre

De nombreux travaux révèlent une inter-diffusion des éléments de nature alcalino-métallique (Na^+ , K^+ et Li^+) entre la pâte cimentaire et la surface du granulats de verre. Cette inter-diffusion des ions est nécessaire pour établir un équilibre électrochimique entre la pâte riche en alcalins (K^+ , Na^+ et Li^+) et les granulats de verre.

Pour mieux comprendre ce phénomène d'échange sous l'influence du changement de charge Entre lisier et agrégat, L'ajout de lithium Li^+ permet un mouvement rapide entre les sites interstitiels et l'interface de la pâte du verre. Les résultats obtenus montrent que Li^+ se déplace plus vite que Na^+ et K^+ vers le cœur des granulats de verre.

II.8 Domaines d'applications

De nombreuses études ont été réalisées sur le verre à grande échelle ainsi que dans des conditions climatiques réelles afin de suivre la durabilité des ouvrages. La Figure reprend quelques applications dans lesquelles le verre est utilisé comme par exemple :

- Les Bétons Ultra-Hautes Performances (BUHP) par la construction d'une passerelle à base de verre broyé ;
- Les géopolymères ;
- Les mortiers à base de verre ;
- Le Béton Auto Plaçant (BAP) ;
- Le Béton Ordinaire (BO) par la construction de trottoirs et de dalles ;
- La Technique Routière (TR) ;

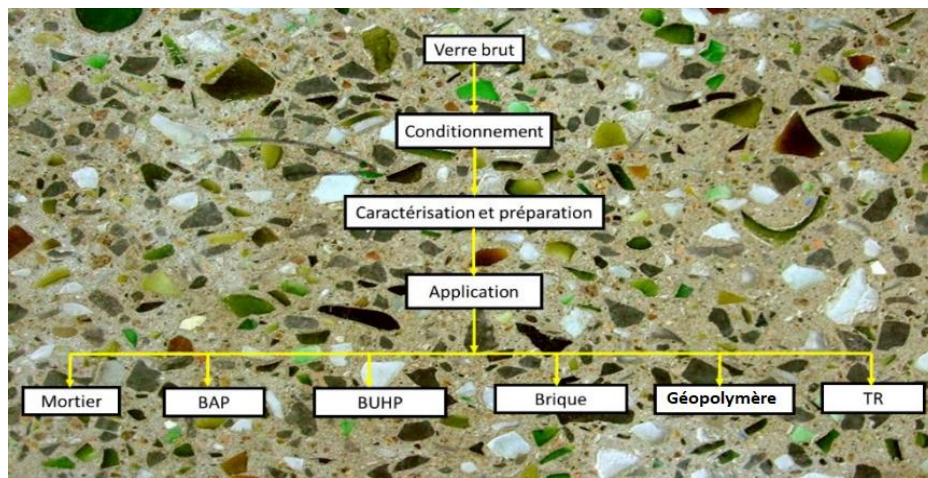


Figure II.2 : Valorisation des déchets de verre dans diverses applications de construction

II.9 Conclusion

En guise de conclusion, nous avons constaté comme le montrent plusieurs études et recherches citées ci-dessus, que le verre et notamment la poudre de verre est l'avenir de l'écologie dans le monde de construction parce qu'il participe dans la diminution du gaz à effet de serre et de par le fait qu'il soit recyclé et non jeté dans la nature d'une façon sauvage.

Chapitre 3

Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

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

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 III.1 :

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.

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 :

Tableau III.2. Caractéristiques 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°çà'(en g/cm ³)	1,53
Concentration en%	45
R=(SiO ₂)/Na ₂ O	2,06
Degré Baumé	50,2

III.3.2NaOH

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



Figure III.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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ si la concentration dépasse 52% en poids. Cette valeur est considérée comme la solubilité maximale dans l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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.3. Caractéristiques 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 $318\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solide, 100 %) $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solution à 80 %) $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solution à 40 %) $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solution à 20 %)
	Point d'ébullition $1390\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solide, 100 %) $216\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solution à 80 %) $128\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solution à 40 %) $118\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solution à 20 %)
	Densité 2,13 (solide, 100 %) 1,43 (solution à 40 %) 1,22 (solution à 20 %)
	Pression de vapeur $< 10\text{ hPa}$ à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (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 Laitier granulé de haut fourneau

Provient comme sous-produit de la fonderie d'El-Hadjar Annaba. Un broyage de 1h et 30 min du laitier granulé figure 3.5, a été effectué au laboratoire de la cimenterie de Ain Elkabira/Sétif avec un broyeur horizontal à boulet type BURBERS ; les caractéristiques physiques et chimiques de laitier sont présentées dans le tableau III.4.

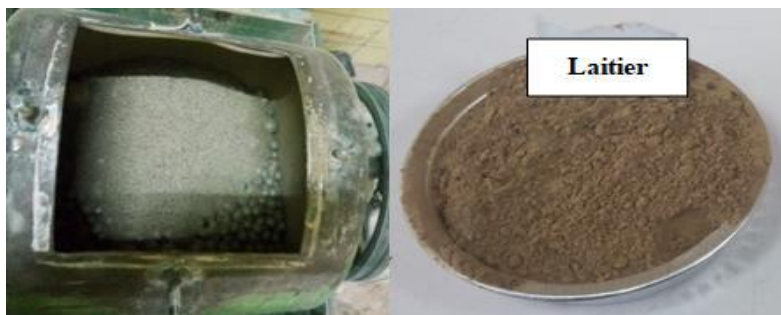


Figure III.4. Broyage de laitier.

Tableau III.4. Propriétés physiques de métakaloin et laitier.

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

III.5 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 (10%, 20% et 30% par rapport au laitier) des fines recyclés dans les mortiers.

Tableau III.5. Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.

Quantité (g /cm³)	MT	M-10V	M-20V	M-30V	M-10FR	M-20FR	M-30FR
Sable	384.8	384.8	384.8	384.8	384.8	384.8	384.8
Laitier	153.93	138.53	123.1	107.7	138.53	123.1	107.7
Verre	0	15.4	30.8	46.2.	0	0	0
FR	0	0	0	0	15.4	30.8	46.2
NaOH	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7
NaSiO4	80.1	80.1	80.1	80.1	80.1	80.1	80.1

Les
co
mp
osa
nts
des

mortiers géopolymères avec fibre ont été mélangés selon la norme EN 196-1. 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.



Figure III.5. Conservation des éprouvettes

III.6 Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes

III.6.1 Malaxage du mortier

On fait le malaxage de chaque gâchée de mortier géopolymère mécaniquement au moyen du malaxeur à mortier (figure III.6).



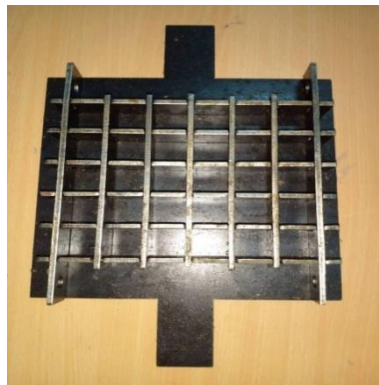
Figure III.6. Malaxeur à mortier.

- Tout d'abord on a mélangé les poudres (laitier plus adition) à l'état sec.
- Puis on mis le mélange dans la cuve.
- En ajoutant la solution chimique (NaOH et NaSiO₄) , qui été déjà préparé un jour à l'avance.

Pour préparer 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 afitateur. .

III.6.2 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont de forme cubiques (25 mm ×25 mm ×25 mm) et de forme rectangulaire



- 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. Traitement thermique

Dans cette étude on a opté deux traitements, le premier consacre à mettre les éprouvettes dans une étuve à une température 60 °C pendant 24 heures. Ainsi, le deuxième consiste à mettre les échantillons dans une chambre climatique à une humidité est égale 100% pendant 24 heures.

III.8 Résistances mécaniques 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.7. Schéma de l'essai de compression.

III.8 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 :

Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Les travaux suivants portent sur l'étude des propriétés mécaniques et physico-chimiques des mortiers de géopolymère à base de laitier et à différents déchets recyclés (verre et poudre issue du béton démolie). L'objectif de ce chapitre est de confectionner un mortier écologique et économique en utilisant des déchets du recyclage de ces produits en tant qu'ajouts minéraux dans la fabrication d'éco-géopolymère et, par conséquent, d'éliminer le besoin de stocker ces matériaux dans des usines de recyclage/stockage.

IV.2. Propriétés à l'état frais

IV.2.1. Etalement

L'essai de l'étalement est un test important qui évalue les propriétés à l'état frais des mortiers. Figure IV.1 présente les résultats du diamètre de l'étalement des mortiers géopolymères confectionnés.

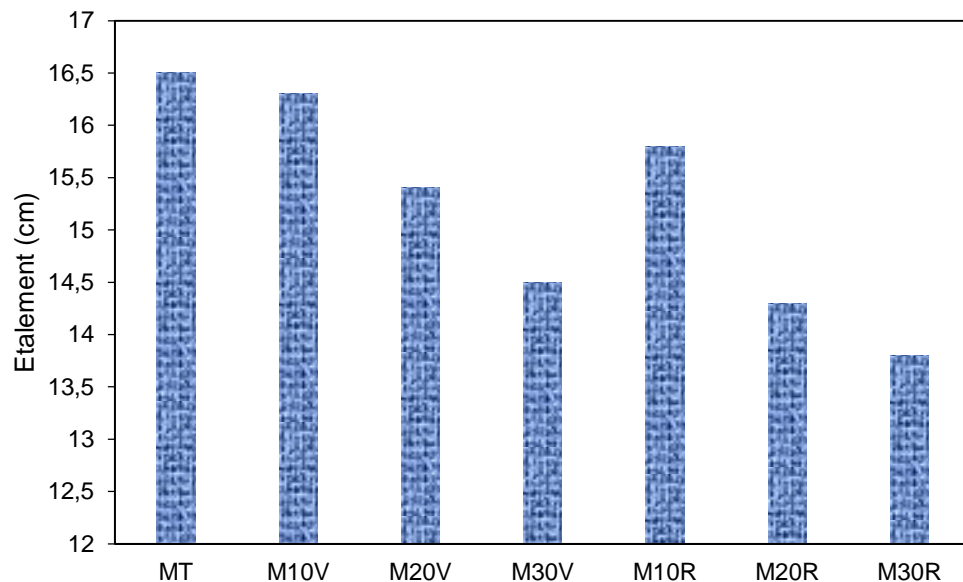


Figure IV.1. Diamètre de l'étalement de différents mélanges.

D'après la figure IV.1 on constate que l'introduction des fines de verre provoque une diminution de l'étalement des mortiers. Cette diminution est variée en fonction de la teneur de

Chapitre 4 : Résultats et discussion

la poudre de verre à titre d'exemple les mélanges M-10V, M-20V et M-30V présentent un étalement est égal 16.2 cm, 15.3 cm, 14.5cm respectivement. De plus, l'effet des fines recyclées est le même que celle du verre. Pour être plus précis, les mélanges M-10R, M-20R et M-30R révèlent un étalement est égal 15.8 cm, 14.3cm, 13.8cm respectivement. Ceci est dû à l'absorption d'eau élevée de ces fines recyclées.



100%L =16.5

10%V=16.3

20%V=15.4



30%V=14.5

10%FR=15.8

20%FR=14.3

Figure IV.2. Photos de l'essai d'étalement de différents mélanges.

IV.3. Propriétés à l'état durci

IV.3.1 Résistance à la compression

L'essai de compression consiste à soumettre les éprouvettes de forme carrée entre deux plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées.

Chapitre 4 :Résultats et discussion

La figure IV.3 illustre l'effet de la présence des poudres verre et/ou fine recyclée sur la résistance à la compression des différents mortiers de géopolymère.

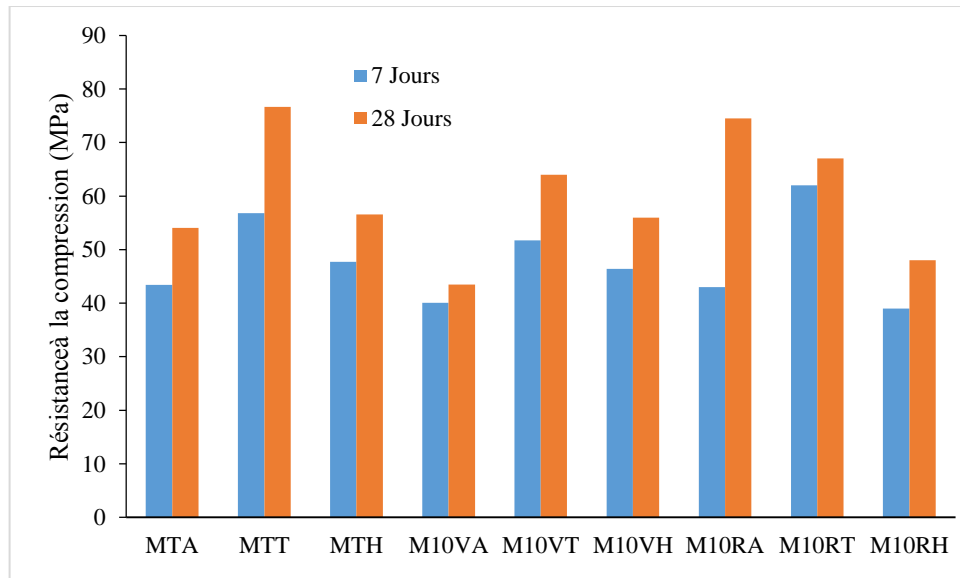


Figure IV.3 Résistance à la compression des différents mortiers.

La résistance à la compression à 7 et à 28 jours pour chaque mélange est indiquée dans la figure 4.3. On constate une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement par la poudre de verre augment. Le traitement thermique à 60°C provoque une augmentation considérable de la résistance à la compression notamment pour le mortier avec 100% de laitier. De plus, les mortiers traités à 60°C à base de verre présentent une augmentation de la résistance par rapport au mortier confectionné dans une température ambiante.

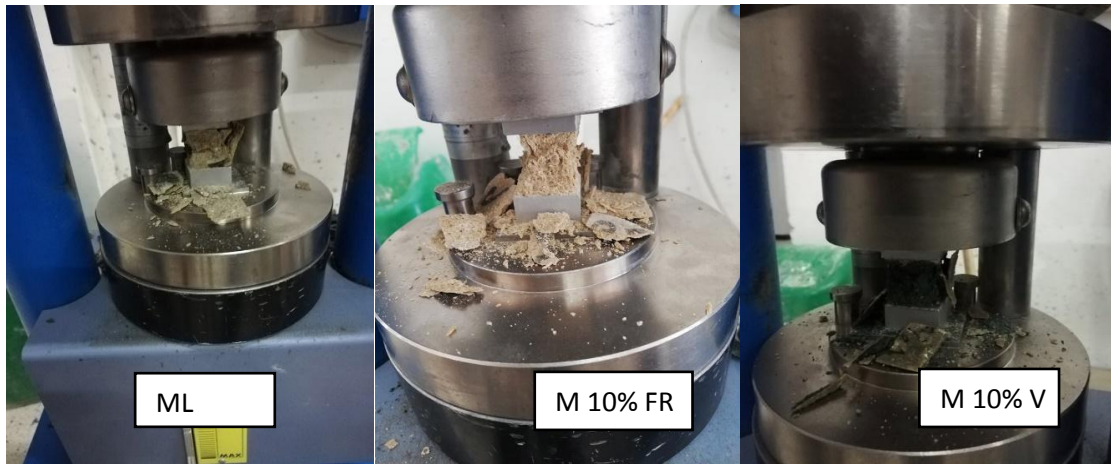


Figure IV.4.Photo de l'écrasement des différents mélanges.

IV.4. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence le rôle important de fine issue des bétons recyclés et de verre avec différents taux de substitution sur le comportement mécanique et les propriétés de transfère des mortiers géopolymères. Le remplacement de fines recyclées dans le laitier présente des performances mécaniques intéressantes du mortier par rapport au mortier témoin. Par ailleurs, le remplacement par des fines de verre, les propriétés mécaniques se diminuent en comparant avec le mortier avec laitier seul. De plus la présence de ces déchets rend les matériaux géopolymères plus économiques et écologiques.

Conclusion général

Cette étude a fait l'objet de l'élaboration des matériaux géopolymère à faible impact environnemental en utilisant trois matériaux distincts, le laitier granulé de haut fourneau, verre et fine de béton démolé.

L'objectif de notre étude était de voir l'effet de ces poudres dans les mortiers géopolymères sur les plans : état frais et performances mécaniques.

Pour cela, poudre de verre et de fine de béton ont été utilisées en remplacement partiellement du laitier avec un pourcentage 10%. 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 fines dans les mortiers géopolymères avec un taux est égale 10%. Ainsi la présence de 10 de fines recyclées dans le laitier présente des performances mécaniques intéressantes du mortier par rapport au mortier témoin à 28 jours. Par ailleurs, le traitement thermique augmente la résistance à la compression des géopolymères. De plus la présence de ces déchets rend les matériaux géopolymères plus économique et écologique.

A partir ces résultats on va attester de la viabilité scientifique du recyclage de ces produits en tant qu'ajouts minéraux dans la fabrication d'éco-géopolymères et, par conséquent, d'éliminer le besoin de stocker ces matériaux dans des usines de recyclage/stockage.

Références

- A.A. Aliabdo, A.E.M. AbdElmoaty, A.Y. Aboshama, Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Construction and Building Materials*. 124 (2016) 866–877. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016.
- A. Bouchikhi, M. Benzerzour, N.E. Abriak, W. Maherzi, Y. Mamindy-Pajany, Study of the impact of waste glasses types on pozzolanic activity of cementitious matrix, *Construction and Building Materials*. 197 (2019) 626–640. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.180.
- A. Tagnit-Hamou, N. Soliman, A. Omran, Green Ultra - High - Performance Glass concrete, first International Interactive Symposium on UHPC – 2016. 3 (2016) 1–10
- A. Zidol, Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre, Sherbrooke (Québec) Canada, 2014.
- 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.
- Boumediene, M. (2022). *ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX GÉOPOLYMÉRES ÉTUVÉS*].
- Davidovits, J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis*, 35(2), 429-441.
- M. Torres-Carrasco, F. Puertas, Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and Microstructural characterisation, *Journal of Cleaner Production*. 90 (2015) 397–408. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.074.
- M. Vafaei, A. Allahverdi, High strength geopolymer binder based on waste-glass powder, *Advanced Powder Technology*. 28 (2017) 215–222. doi:10.1016/j.apt.2016.09.034.
- M.T. Tognonvi, A. Zidol, P.-C. Aïtcin, A. Tagnit-Hamou, Aging of glass powder surface, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 427 (2015) 175–183. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2015.07.042.226
- N. Schwarz, H. Cam, N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability
- N.A. Soliman, A. Tagnit-Hamou, Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC, *Construction and Building Materials*. 145 (2017) 243–252. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.187.
- N.A. Soliman, A.F. Omran, A. Tagnit-Hamou, Laboratory characterization and field application of novel ultra-high-performance glass concrete, *ACI Materials Journal*. 113 (2016) 307–316. doi:10.14359/51688827
- R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials*. 24 (2010) 1309–1312. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030.
- R.IDIR, Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, SHERBROOKE, 2011.

R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ?, *Technologie Valorisation*. 16 (2010) 70–77.

R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cement and Concrete Composites*. 33 (2011) 19–29. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013.

R.H DOREMUS, Interdiffusion of alkali and hydronium ions in glass : partial ionization, 48 (1982) 431–436.

225 characteristics of concrete and its comparison to flyash, *Cement and Concrete Composites*. 30 (2008) 486–496. Doi : 10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001.

S. Luhar, T.W. Cheng, D. Nicolaidis, I. Luhar, D. Panyas, K. Sakkas, Valorisation of glass wastes for the development of geopolymer composites – Durability, thermal and microstructural properties: A review, *Construction and Building Materials*. (2019). doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.169.

J. Zapala-Slaweta, Z. Owsiak, The role of lithium compounds in mitigating alkali-gravel aggregate reaction, *Construction and Building Materials*. 115 (2016) 299–303. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.058.

Wei, B., Zhang, Y., & Bao, S. (2017). Preparation of geopolymers from vanadium tailings by mechanical activation. *Construction and Building Materials*, 145, 236-242.