



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي بـرج بوعـريـرج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

قسم الهندسة المدنية

Département de génie civil

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Intitulé :

Intégration des géo déchets dans la production des matériaux de construction durables

Présenté par :

Afaf KHOUDOUR

Soutenu le : _19_/_06_/_2024

	Nom & Prénom	Affiliation/Institution
Encadrant :	Dr. Ahmed Abderraouf BELKADI	Université B.B.A
Co-encadrant :	Amirouche BERKOUCHE	Université B.B.A

Année Universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Monsieur **BELKADI AHMED ABDERRAOUF**, Finir ce chapitre de ma vie à vos côtés est un honore pour moi. Je vous suis reconnaissant pour votre expertise, vos conseils avisés tout au long de mon parcours académique, pour la confiance que vous avez placée en moi.

Monsieur **BERKOUCHE AMIROUCHE**, Merci pour vos efforts considérables pour m'aider dans cette recherche, votre mentorat précieux a été essentiel pour ma réussite et je vous en suis extrêmement reconnaissante.

Un grand merci au Doyen de la faculté de Génie Civil *monsieur* **NOUI AMMAR**,

Mademoiselle **BENADDACHE LYSA** et le laboratoire du génie civil.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux *membres de jury*.

Enfin, je tiens à présenter toute ma gratitude et mes remerciements à *ma famille* mon moteur de vie et à tous *mes amis*

Résumé

Ce mémoire explore le développement d'un éco-béton géopolymère en utilisant des déchets de céramique et de coquilles d'œufs comme substituts partiels au laitier de haut fourneau. Les objectifs comprennent la caractérisation des précurseurs, la formulation de mélanges géopolymères binaires et ternaires, ainsi que des tests physiques et mécaniques pour évaluer les propriétés des géopolymères. Les résultats indiquent que l'incorporation de la poudre de céramique et de coquilles d'œufs influence la maniabilité, la densité, la porosité et la résistance des géopolymères. Les mélanges ternaires montrent des interactions complexes entre les précurseurs substituants. Ce travail contribue à la recherche sur les matériaux de construction durables en explorant des approches innovantes pour valoriser les déchets industriels et agricoles, ouvrant ainsi la voie à des bétons écologiques plus respectueux de l'environnement.

ملخص

يستكشف هذا الأطروحة تطوير خرسانة جيوبوليمر صديقة للبيئة باستخدام مسحوق السيراميك ومسحوق قشر البيض كبديل جزئي لخبث أفران الصهر. تشمل الأهداف توصيف المكونات الأولية، وصياغة خلائط جيوبوليمر ثنائية وثلاثية، واختبارات فيزيائية وميكانيكية لتقييم خصائص الجيوبوليمر. تشير النتائج إلى أن إدماج مسحوق السيراميك ومسحوق قشر البيض يؤثر على قابلية العمل، والكثافة، والمسامية، والقوة للجيوبوليمرات. تظهر الخلائط الثلاثية تفاعلات معقدة بين المكونات المستبدلة. يسهم هذا العمل في البحث حول المواد البنائية المستدامة من خلال استكشاف نهج مبتكرة لتقييم النفايات الصناعية والزراعية، مما يمهد الطريق للخرسانات الجيوبوليمرية الأكثر احترامًا للبيئة.

Abstract

This research explores the development of an eco-friendly geopolymer concrete using waste ceramic powder and eggshell powder as partial substitutes for blast furnace slag. The objectives include precursor characterization, formulation of binary and ternary geopolymer mixes, and physical and mechanical testing to evaluate geopolymer properties. Results indicate that incorporating ceramic powder and eggshell powder influences workability, density, porosity, and strength of geopolymers. Ternary mixes exhibit complex interactions among substituting precursors. This work contributes to research on sustainable construction materials by exploring innovative approaches to valorize industrial and agricultural waste, paving the way for more environmentally friendly geopolymer concretes.

Liste des figures

Figure 1 Nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si/Al	16
Figure 2 Photos de l'aéroport de Brisbane West Wellcamp.....	17
Figure 3 Classification des matériaux alcali-activés, en comparaison avec le ciment Portland et la chimie des liants sulfoaluminés.....	19
Figure 4 Réactions d'attaque alcaline	23
Figure 5 Effet de différents facteurs sur le temps de prise des matériaux géopolymères.....	25
Figure 6 Contours de résistance à la compression pour les Na-géopolymères.....	26
Figure 7 Applications des matériaux géopolymères selon le rapport Si/Al	28
Figure 8 Processus de concassage et de broyage du DDB ; (A) Échantillon DDB, (B) Broyeur à marteaux, (C) Broyeur à boulets et (D) Poudre DDB.	34
Figure 9 (a) les verres usagés tels que reçus (b) la poudre de verre recyclée	37
Figure 10 Génération de cendres de paille de riz.	39
Figure 11 boues d'épuration	41
Figure 12 Déchets de coquilles d'œuf.....	42
Figure 13 Apparences des précurseurs utilisés.....	45
Figure 14 Courbes granulométriques des précurseurs.....	46
Figure 15 Préparation de la solution NaOH	48
Figure 16 Silicates de sodium.....	49
Figure 17 Les apparences des sables utilisés.....	50
Figure 18 Granulométries des sables utilisés	50
Figure 19 Remplissage des moules	52
Figure 20 Les échantillons démoulés	53
Figure 21 Essai d'étalement.....	53
Figure 22 Essai de porosité accessible à l'eau	54
Figure 23 Essai de la résistance à la compression	54
Figure 24 Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique	55
Figure 25 Effet de la PC sur l'étalement.....	58
Figure 26 Effet de la PCO sur l'étalement.....	59
Figure 27 Effet combiné de la PC et PCO sur l'étalement.....	60
Figure 28 Effet de la PC sur la résistance à la compression.....	61
Figure 29 Effet de la PCO sur la résistance à la compression	62
Figure 30 Effet combiné de la PC et la PCO sur la résistance à la compression.....	63
Figure 31 Effet de la PC sur la masse volumique	65
Figure 32 Effet de la PCO sur la masse volumique.....	66
Figure 33 Effet combiné de la PC et la PCO sur la masse volumique	67
Figure 34 Effet de la PC sur la porosité	68
Figure 35 Effet de la PCO sur la porosité.....	68
Figure 36 Effet combiné de la PC et la PCO sur la porosité	69
Figure 37 Effet de la PC sur la vitesse d'impulsion.....	70
Figure 38 Effet de la PCO sur la vitesse d'impulsion.....	72
Figure 39 Effet combiné de la PC et la PCO sur la vitesse d'impulsion.....	73
Figure 40 Relation entre la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression des mélanges confectionnés.....	74

Liste des tableaux

Tableau 1 Composition chimique des précurseurs	46
Tableau 2 Propriétés physiques des précurseurs	46
Tableau 3 Composition chimique de la soude caustique.....	47
Tableau 4 Caractéristiques des silicates de sodium utilisées.....	49
Tableau 5 Propriétés physiques des sables utilisés.....	50
Tableau 6 Compositions des mélanges confectionnés du premier groupe	51
Tableau 7 Compositions des mélanges confectionnés du deuxième groupe.....	51
Tableau 8 Compositions des mélanges confectionnés du troisième groupe.....	51

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	13
CHAPITRE I	15
<i>1.1 Introduction</i>	16
<i>1.2 Introduction à la géopolymérisation</i>	16
1.2.1. Définition de la géopolymérisation en tant que procédé durable pour la fabrication de matériaux de construction	16
1.2.2. Historique et évolution des géopolymères	17
<i>1.3. Constituants des géopolymères</i>	19
1.3.1. Précurseurs aluminosilicates	19
1.3.1.1 Cendres volantes	20
1.3.1.2. Metakaolin	20
1.3.1.3 Laitier de haut fourneau	21
1.3.2. Activateurs alcalins	21
1.3.2.1. NaOH/ KOH	21
1.3.2.2 Silicates alcalins ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{K}_2\text{SiO}_3$)	22
<i>1.4. Mécanisme de formulation des géopolymères</i>	22
<i>1.5. Propriétés des géopolymères</i>	24
1.5.1. Temps de prise des géopolymères	24
1.5.2. Résistance mécanique des géopolymères	25
1.5.3. Durabilité des matériaux géopolymères	26
<i>1.6. Applications des géopolymères</i>	28
<i>1.7. Conclusion</i>	28
CHAPITRE II	30
<i>2.1. Introduction</i>	31
<i>2.2. Utilisation des déchets dans les géopolymères</i>	31
2.2.1. Rôle des déchets dans la construction durable	31
2.2.2. Réduction de la consommation de ressources naturelles	32
2.2.3. Réduction des déchets envoyés en décharge	32
2.2.4. Réduction des émissions de gaz à effet de serre	32
2.2.5. Promotion de l'innovation et de l'économie circulaire	33
<i>2.3. Classification des déchets utilisés et leurs effets sur les propriétés des géopolymères</i>	33
2.3.1. Déchets industriels	33

2.3.1.1. Déchets de démolition de béton	33
2.3.1.2. Déchets de la brique	34
2.3.1.3. Déchets de plastique	35
2.3.1.4. Les déchets de verre	36
2.3.1.5. Déchets de céramique	37
2.3.2. Déchets agricoles et biomasses	38
2.3.2.1. Cendres de balle de riz	39
2.3.2.2. Cendre de feuille de bananier (CFB) et cendre d'écorce de plantain (CEP)	40
2.3.2.3. Boues d'épuration	41
2.3.2.4. Les déchets des coquilles d'œuf	42
2.4. Conclusion	43
CHAPITRE III	44
3.1. Introduction	45
3.2. Matériaux et caractérisation	45
3.2.1. Précurseurs	45
3.2.2. Activateurs	47
3.2.2.1. Soude caustique	47
3.2.2.2. Silicates de sodium	48
3.2.4. Sables	49
3.3. Méthodologie	51
3.3.1. Préparation des mélanges	51
3.3.3. Essais expérimentaux	53
3.4. Conclusion	55
CHAPITRE IV	56
Résultats et discussions	56
4.1 Introduction	57
4.2. Essai de maniabilité (étalement)	57
4.2.1. Effet de la poudre de céramique	57
4.2.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs	58
4.2.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs	59
4.3. Résistance mécanique	60
4.3.1. Effet de la poudre de céramique	61
4.3.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs	62
4.3.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs	63
4.4. Masse volumique	64
4.4.1. Effet de la poudre de céramique	64
4.4.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs	65

4.4.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs	66
4.5. Porosité accessible à l'eau	67
4.5.1. Effet de la poudre de céramique	67
4.5.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs	68
4.5.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs	69
4.6. Analyse d'impulsion ultrasonique	70
4.6.1. Effet de la poudre de céramique	70
4.6.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs	71
4.6.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs	72
4.7. Relation entre la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression	74
4.8. Conclusion	75
Conclusion générale	77
Références bibliographiques	81

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le développement durable est devenu une priorité mondiale dans le domaine de la construction, poussant les chercheurs et les professionnels à explorer de nouvelles approches pour réduire l'empreinte environnementale tout en améliorant les performances des matériaux de construction. Dans ce contexte, les géopolymères émergent comme une alternative prometteuse aux bétons traditionnels, offrant des avantages significatifs en termes de durabilité, de résistance et de réduction des émissions de CO₂. Ce mémoire se concentre sur le développement d'un éco-béton géopolymère novateur à base de poudre de déchets de céramique et de coquilles d'œufs, explorant leur potentiel en tant que substituts du laitier de haut fourneau (LHF) dans les mélanges géopolymères.

- **Problématique**

La production massive de déchets de céramique et de coquilles d'œufs constitue un défi environnemental majeur, nécessitant des solutions innovantes pour leur valorisation. Les géopolymères offrent une opportunité unique de transformer ces déchets en ressources précieuses, tout en réduisant la dépendance aux matériaux conventionnels comme le LHF. Cependant, la formulation optimale des mélanges géopolymères à base de ces déchets et leur impact sur les propriétés finales du matériau restent des domaines de recherche cruciaux.

- **Objectifs du mémoire**

Ce mémoire vise à étudier et à développer un éco-béton géopolymère innovant à base de poudre de déchets de céramique et de coquilles d'œufs, en remplaçant partiellement le LHF dans la formulation des mélanges. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Caractériser les propriétés physico-chimiques des déchets de céramique et de coquilles d'œufs en vue de leur utilisation comme substituts dans les mélanges géopolymères.
- Évaluer l'impact de la substitution de la poudre de céramique (PC) et de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) sur les propriétés physiques, mécaniques, et la maniabilité des mélanges géopolymères.
- Analyser les résultats expérimentaux et formuler des recommandations pour l'utilisation pratique des éco-bétons géopolymères à base de déchets de céramique et de coquilles d'œufs dans l'industrie de la construction.

- **Plan du mémoire**

Ce mémoire est structuré en plusieurs parties pour atteindre les objectifs fixés :

La première partie se compose de deux chapitres, elle comprendra une revue de la littérature sur les géopolymères, les déchets de céramique et les coquilles d'œufs, ainsi que sur les techniques de formulation des mélanges géopolymères.

La deuxième partie portera sur la méthodologie expérimentale et les résultats obtenus, elle se compose de deux chapitres : le troisième chapitre qui décrit les matériaux utilisés, les procédures de préparation des échantillons et les tests de caractérisation effectués. Le quatrième chapitre présentera les résultats obtenus, avec une analyse détaillée des performances des mélanges géopolymères en fonction des proportions de substitution de PC et PCO, ainsi que la discussion des résultats, mettant en évidence les conclusions tirées des expériences et les implications pour le développement de bétons géopolymères durables.

Enfin, la conclusion résumera les principales découvertes et recommandations pour la mise en œuvre pratique des éco-bétons géopolymères à base de déchets de céramique et de coquilles d'œufs dans l'industrie de la construction.

Ce mémoire vise à contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine des matériaux de construction durables, en proposant une approche novatrice pour valoriser les déchets industriels tout en améliorant les performances des composites géopolymères.

CHAPITRE I

Généralités sur les géopolymères

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, une étude bibliographique sur les généralités des matériaux géopolymères, leurs propriétés et applications sera présentée dans un premier lieu. Ensuite, des généralités sur le procédé de mécanosynthèse ainsi que ses principaux paramètres et applications seront décrits.

1.2 Introduction à la géopolymérisation

1.2.1. Définition de la géopolymérisation en tant que procédé durable pour la fabrication de matériaux de construction

Les géopolymères sont définis comme des chaînes de monomères inorganiques, caractérisés par une structure amorphe à semi-cristalline [1] [2]. Ils sont constitués d'un enchaînement de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 liés par les atomes d'oxygène comme unités structurales de base. Les géopolymères ont la formule générale $M_n\{(\text{SiO}_2)_z, \text{AlO}_2\}_n, w \text{H}_2\text{O}$ [2] [3].

Avec : M représentant le cation K^+ , Na^+ ou Ca^{2+} , n le degré de polymérisation, z égal à 1, 2, 3 ou plus, jusque 32, w le nombre de molécules d'eau.

Selon le rapport Si/Al, on peut distinguer plusieurs familles de géopolymères (Figure 1) à savoir :

- Si/Al = 1 : Poly Sialate (PS),
- Si/Al = 2 : Poly Sialate Siloxo (PSS),
- Si/Al = 3 : Poly Sialate DiSiloxo (PSDS).

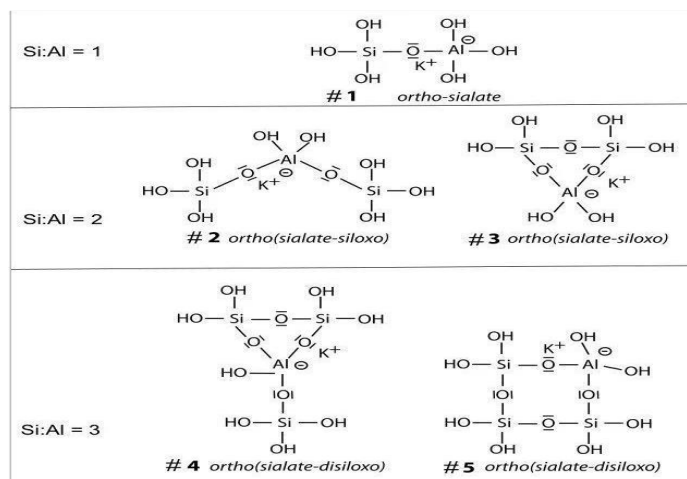


Figure 1 Nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si/Al

Le domaine du préfabriqué est l'une des premières applications qui a été testée pour les matériaux géopolymères [2], notamment la production de ciment-géopolymères préfabriqué. Le béton géopolymères à base de cendres volantes à faible teneur en calcium et durci thermiquement a également été testé avec un excellent potentiel pour des applications dans l'industrie de la préfabrication. Ses performances répondent bien aux exigences de la norme australienne AS 3600:2009 et le code de construction de l'American Concrete Institute ACI 318-11:2011 [4].

L'aéroport de Brisbane West Wellcamp (BWWA) est le plus grand projet de béton géopolymères au monde (Figure 2) [5]. Devenu pleinement opérationnel en novembre 2014. BWWA a été construit avec environ 40 000 m³ de béton géopolymères à base de cendres volantes. Ce matériau, connu sous le nom de Earth Friendly Concrete (EFC), a été fourni par Wagners [5].



Figure 2 Photos de l'aéroport de Brisbane West Wellcamp

1.2.2. Historique et évolution des géopolymères

Les géopolymères ont été utilisés depuis l'Antiquité, sans être connus. En effet, plusieurs chercheurs ont avancé des théories selon lesquelles des monuments historiques datant de plusieurs siècles avant Jésus-Christ comme les pyramides d'Égypte, les Phaistos en Crète ou les Ziggurats en Mésopotamie, ont été construits à partir d'aluminosilicates alcali-activés. Ces ouvrages ont survécu sans dégradations à des conditions météorologiques extrêmes et aux pluies acides [2]. Glukhovski, un chercheur de l'Institut d'ingénierie civile en Ukraine, a été le premier auteur à avoir étudié les liants utilisés dans les anciennes constructions romaines et

égyptiennes [6]. Ensuite, le scientifique Français Davidovits a affirmé que les pyramides en Égypte ont été construites à base de blocs de matériaux alcali-activés, moulés sur place [7] [8]. Plusieurs étapes importantes ont eu lieu dans la chimie du développement des composés alumino-silicatés avant la création du terme « géopolymères » par Davidovits en 1979 [9]. Les premières découvertes de l'activation alcaline remontent à 1908, lorsque Kühl a breveté sa première formulation appelée « ciment de laitier en mélangeant le laitier de haut fourneau avec des composants alcalins » [10].

Plus tard pendant les années 1940, Purdon [11], qui était un ingénieur civil, a étudié la réaction d'une gamme de minéraux silico-alumineux, dont le laitier de haut fourneau, avec des solutions alcalines. Purdon a constaté une prise des matériaux avec des résistances en compression comparables à celles du ciment Portland [12]. Par la suite, Glukhovskii a développé un nouveau liant qu'il a nommé « soil-silicate ciment » par activation alcaline de roche broyée, donnant lieu à un matériau fortement consolidé [13].

Ensuite, les multiples incendies catastrophiques survenus en France dans la période allant de 1970 à 1973, et dont la gravité est attribuée pour la plupart aux matériaux de décoration de type polyester utilisés, qui produisent des fumées toxiques asphyxiantes en brûlant, ont rendu impératif de produire de nouveaux matériaux plastiques résistant au feu, des matériaux ininflammables et incombustibles. C'est dans ce contexte que Davidovits a décidé d'orienter ses travaux vers la conception de nouveaux matériaux, qu'il appela « géopolymères » [1]. Le terme « géo » vient de la stabilité de ces matériaux à haute température, à leur non inflammabilité et à leur nature inorganique. Ce type de matrice a été nommé autrement par d'autres scientifiques : « alkali activation slag », proposé par Purdon, ou « granulosilikaty – gruntocementy », par Glukhovskii [14] [15].

Les géopolymères sont généralement considérés comme un sous-ensemble des matériaux alcali-activés (Figure 3) [16]. Pour former un réseau de type géopolymères, la teneur en calcium disponible des composants réactifs devrait être généralement faible, pour permettre la formation d'une structure de réseau pseudo-zéolitique plutôt que les chaînes caractéristiques des hydrates de silicate de calcium [17]. Récemment, le terme « géopolymères » est devenu très répandu et utilisé pour tout type de matériaux alcali-activés, y compris pour un taux élevé en calcium, plutôt à des fins de marketing que scientifiques [17].

Le développement des géopolymères s'est accéléré dans les années 1990, lorsque leur nature non combustible favorable a ouvert la voie à leur utilisation comme boucliers thermiques à l'intérieur d'avions et dans d'autres applications automobiles spécialisées pour l'amélioration de la résistance au feu [18]. Actuellement, les géopolymères suscitent un grand intérêt car ils

ouvrent la porte à l'exploitation de produits abondants ou secondaires silico-alumineux pour l'obtention de matériaux hautement résistants et durables à moindre coût. De plus, les préoccupations environnementales, en raison du rejet de CO₂ lors de la production de ciment Portland, ont placé les matériaux géopolymères à l'avant-plan en tant que liant de nouvelle génération pour le béton.

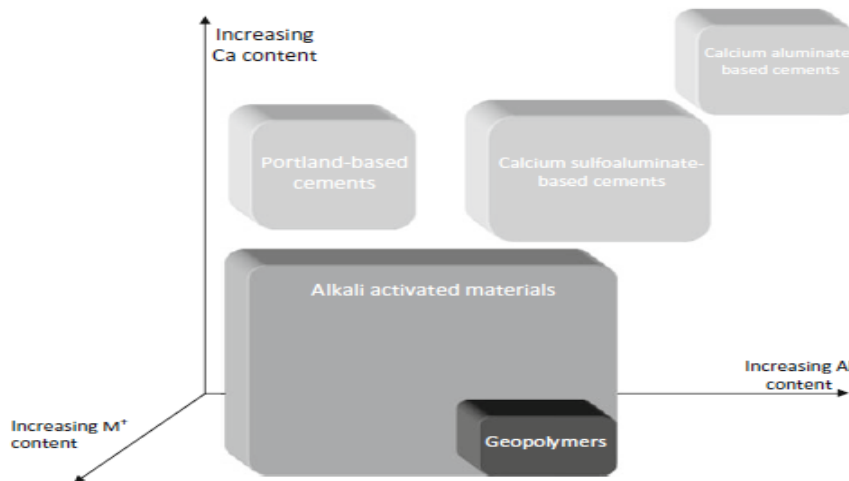


Figure 3 Classification des matériaux alcali-activés, en comparaison avec le ciment Portland et la chimie des liants sulfoalumineux

1.3. Constituants des géopolymères

Les géopolymères sont produits par activation de divers matériaux aluminosilicates, appelés précurseurs aluminosilicates, avec une solution alcaline forte telle que l'hydroxyde de sodium, l'hydroxyde de potassium, le silicate de sodium ou le silicate de potassium, appelés activateurs alcalins.

1.3.1. Précurseurs aluminosilicates

Tout matériau contenant principalement du silicium (Si) et de l'aluminium (Al) sous forme amorphe peut être une source d'aluminosilicates pour la fabrication des matériaux géopolymères [19]. Différents types de matières premières ont été testés, tels que la pouzzolane naturelle, les scories volcaniques, les cendres de balle de riz [20], etc. Par la suite, nous allons décrire plus particulièrement certains types d'aluminosilicates qui ont été utilisés dans la littérature.

1.3.1.1 Cendres volantes

Les cendres volantes sont l'une des principales sources potentielles d'élaboration des géopolymères en raison de la présence de silice et d'alumine comme constituants principaux. Les cendres volantes sont des résidus solides fins (c'est-à-dire un sous-produit industriel) des centrales électriques alimentées au charbon [21]. Pendant la combustion, les impuretés minérales du charbon (argile, feldspath, quartz et schiste) fusionnent en suspension et flottent hors de la chambre de combustion avec les gaz d'échappement. Au fur et à mesure que le matériau fondu monte, il se refroidit et se solidifie en particules vitreuses sphériques appelées cendres volantes. Il s'agit d'un matériau particulaire pulvérulent à grains fins qui est recueilli des gaz d'échappement par des précipitâtes électrostatiques ou des filtres à manches.

Les cendres volantes produites par les centrales thermiques ne sont pas toujours identiques en raison de plusieurs paramètres, notamment le type et la composition minéralogique du charbon, le degré de pulvérisation du charbon, le type de four, les conditions d'oxydation et la manière dont les cendres volantes sont collectées, manipulées et stockées avant utilisation. Cela veut dire que les propriétés des cendres volantes peuvent également varier au sein d'une même usine si les conditions de charge ne sont plus les mêmes.

Selon l'ASTM C618 [22] [23], deux grandes classes de cendres volantes peuvent être identifiées. Ces deux classes sont liées au type de charbon brûlé et sont désignées classe F et classe C dans la littérature actuelle.

La morphologie d'une particule de cendre volante est contrôlée par la température de combustion et la vitesse de refroidissement. En général, les particules sont vitreuses ; celles inférieures à 50 µm de diamètre sont très souvent de forme sphérique. Toutefois, certaines d'entre elles sont creuses : elles sont appelées écosphères ou flotteurs car elles sont très légères et ont tendance à flotter à la surface de l'eau [21].

1.3.1.2. Metakaolin

Le Metakaolin est un matériau naturel riche en silice et en alumine. Il est obtenu à partir de la calcination du kaolin brut qui contient de la kaolinite comme minéral principal.

La kaolinite est un silicate d'aluminium hydraté, dont la structure minérale contient des feuillets/couches d'oxyde d'aluminium (hydroxyde) faiblement liées avec des feuillets de silice. Le processus de calcination élimine l'eau présente dans le minéral ; il est également connu sous le nom de dés hydroxylation, correspondant à la perte d'ions hydroxyle. La calcination de la

kaolinite se produit selon la réaction suivante à une température de 550 à 800 °C et le produit calciné est appelé Metakaolin [24] [25].

La morphologie du Metakaolin observée par microscopie électronique à balayage apparaît comme celle de la kaolinite de départ, sous forme de cristaux assez réguliers. Ceux-ci se présentent sous la forme de plaquettes hexagonales, accolées les unes aux autres, d'une épaisseur de quelques Angströms [23].

1.3.1.3 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un coproduit de l'industrie sidérurgique issu de la fabrication d'acier. Il existe différentes façons de produire de l'acier : la filière fonte ou filière minerai de fer et la filière électrique (ou filière « ferraille »). On obtient donc des laitiers différents suivant le processus de fabrication de l'acier [26] [27]. Selon le traitement thermique que le laitier subit lors de son refroidissement, différents types de laitiers sont formés :

- Du laitier agrégat, matériau cristallin gris pierreux,
- De la laine de laitier, matériau isolant pour la construction,
- Du laitier granulé de haut fourneau, utilisé pour les ciments.

1.3.2. Activateurs alcalins

Les activateurs alcalins sont responsables de deux processus simultanés : la dissolution de la matière première d'aluminosilicate en entités monomériques à base de silicium et d'aluminium et la polymérisation de ces entités. Alors que les groupes OH jouent un rôle principal dans la dissolution des entités à base de Si et d'Al, la présence d'ions alcalins est très importante pour la polycondensation de ces espèces dans le réseau polymérique 3D [14] [28].

Parmi les activateurs alcalins les plus utilisés pour l'élaboration des géopolymères, on retrouve l'hydroxyde de sodium NaOH, l'hydroxyde de potassium dont l'usage est cependant moins fréquent, et les silicates alcalins ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{K}_2\text{SiO}_3$) [28].

1.3.2.1. NaOH/ KOH

L'hydroxyde de sodium reste l'activateur alcalin le plus couramment utilisé dans la synthèse des géopolymères en raison de sa large disponibilité, de son faible coût et de sa faible viscosité. Généralement, dans les solutions alcalines de type NaOH ou KOH, les cations Na^+ sont connus pour accroître la dissolution de la phase amorphe par association avec des monomères de silicate, et les cations K^+ sont connus pour augmenter la croissance du gel par association avec

de plus gros anions aluminosilicates. Van Jaarsveld et Van Deventer [29] ont démontré une meilleure dissolution des précurseurs aluminosilicates en présence du cation Na^+ qu'en présence de cations K^+ . Par contre, le potassium permet d'obtenir un meilleur degré de formation de gel dans les géopolymères [30].

1.3.2.2 Silicates alcalins ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{K}_2\text{SiO}_3$)

Comme pour les hydroxydes, les silicates alcalins les plus utilisés sont à base de sodium et moins fréquemment de potassium. Ils jouent un rôle très important dans la réaction de géopolymérisation. En effet, plusieurs travaux ont montré que cette réaction est plus rapide lorsque la solution alcaline contient du silicate de sodium ou de potassium, en comparaison avec celle ne contenant que de l'hydroxyde alcalin [31] [32]. La formation des matériaux de type géopolymères repose sur la dissolution des matières minérales solides initialement présentes dans le mélange. La solubilité de la silice amorphe est très faible en solution neutre mais augmente rapidement avec la concentration en ions alcalins [28] [32].

1.4. Mécanisme de formulation des géopolymères

A ce jour, le mécanisme de formation des matériaux géopolymères est particulièrement complexe, en raison de la rapidité de la réaction de géopolymérisation. Cependant, la plupart des auteurs le décrivent comme un mécanisme de dissolution des précurseurs utilisés, suivi d'une polycondensation sous forme de gel. Ces étapes peuvent se chevaucher et se produire presque simultanément, ce qui rend difficile l'examen de chacune d'elles séparément [33].

Le premier modèle de mécanisme de réaction d'activation alcaline a été proposé pendant les années 1950 par le scientifique Glukhovskii [6] [15]. Plus récemment, différents auteurs ont considéré et étendu les théories de Glukhovskii et ont appliqué les connaissances accumulées sur la synthèse de zéolite afin d'expliquer le processus de géopolymérisation dans son ensemble. Le processus d'activation alcaline a tout d'abord été étudié en détail par Davidovits. Le mécanisme de formation des géopolymères a ensuite été décrit par Xu et Van Deventer [34], Fernández-Jimenez *et al* [35] et Duxson *et al* [36].

Les trois premières étapes concernent la dissolution de la source d'aluminosilicate solide par hydrolyse alcaline (consommation d'eau) : c'est l'attaque chimique du milieu liquide hautement alcalin sur les particules des précurseurs aluminosilicates. Cette attaque conduit à la rupture des liaisons Si-O-Si et Si-O-Al et entraîne la libération des aluminates et des silicates (probablement sous forme monomère), tout en consommant des molécules d'eau selon les réactions suivantes

Ainsi, les précurseurs réactifs $\text{Si}(\text{OH})_4$ et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ formés dans la solution se condensent et cèdent à la précipitation du produit zéolitique. Les monomères $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ sont particulièrement plus réactifs car ces espèces ont une charge partielle plus élevée, une taille plus importante que les monomères de silicate et possèdent quatre groupements hydroxyles. Ainsi, si des silicates sont initialement présents en solution, les monomères $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ réagissent « immédiatement » avec ces silicates [37]. Le mélange réactionnel porte ainsi une charge négative due à la substitution d'un cation Si_4^+ par un cation Al_3^+ (associé à l'hydroxyde). Ce déséquilibre électronique est compensé par un cation alcalin ou alcalinoterreux (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}).

La quatrième étape est une étape de réorganisation / création de monomères : ce processus se produit en même temps que le processus de dissolution. Pendant ce mécanisme, les espèces $\text{Si}(\text{OH})_4$ et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ sont attirées par un groupe hydroxyle et se lient en partageant un atome d'oxygène et en libérant une molécule d'eau H_2O , formant ainsi des structures coagulées (Figure 4) [13]. Ces monomères réagissent ensemble pour former différentes structures telles que des tétramères, des dimères, des trimères (inférieures à 10) de la liaison polymérique covalente. Ces structures, appelées oligomères, commencent à former des noyaux [3] [38].

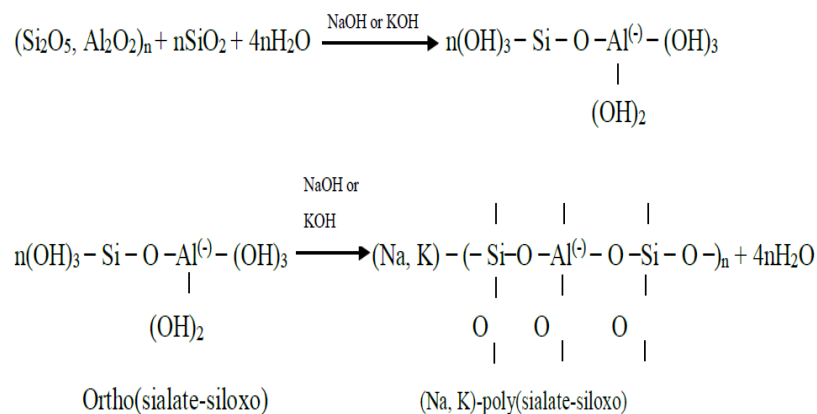


Figure 4 Réactions d'attaque alcaline

La dernière étape de polymérisation se produit lorsque les noyaux atteignent une plus grande taille. Au cours de cette étape, une certaine quantité d'eau est libérée par évaporation [34] [39]. L'eau qui reste dans le système n'est pas évaporable au-dessous de 1050 °C. Cette dernière étape de réaction conduit à une chaîne polymère tridimensionnelle et une structure en anneaux composés de Si-O-Al-O. Après la gélification, le système continue de se réarranger et de se réorganiser à mesure que la connectivité du réseau de gels augmente, ce qui donne lieu au réseau tridimensionnel d'aluminosilicate communément attribué aux géopolymères.

1.5. Propriétés des géopolymères

Différentes propriétés physico-chimiques, mécaniques et thermiques des matériaux géopolymères seront produites en fonction de la nature des matières premières et des activateurs alcalins utilisés, des rapports Si/Al et liquide/solide et des conditions de durcissement.

Les géopolymères ont révélé de nombreuses propriétés avancées, à savoir un séchage rapide, des résistances mécaniques intéressantes et une bonne résistance au feu et aux acides [39] [40].

1.5.1. Temps de prise des géopolymères

Plusieurs applications, telles que la préfabrication, la réparation et la réhabilitation/construction de chaussées rigides nécessitent des bétons à prise rapide. Les géopolymères peuvent être utilisés dans une variété d'applications associées au domaine du préfabriqué, en raison de leurs propriétés prometteuses. Une prise rapide et une résistance à la compression élevée sont les principales propriétés des géopolymères.

Wijaya et Hardjito [51], ont étudié les facteurs affectant le temps de cure des matériaux géopolymères à base de cendres volantes. Ils ont conclu que le temps de prise du géopolymère à base de cendres volantes peut être affecté par divers facteurs à la fois, notamment les propriétés physico-chimiques du précurseur ainsi que la composition du mélange, la température initiale de durcissement et le volume du mélange. Siyal *et al* [41], ont exploré l'effet de plusieurs paramètres sur le temps de prise des matériaux géopolymères. Ils ont montré que le rapport eau/solide (W/S) a l'effet le plus élevé (Figure 5) [41], tandis que le rapport Na/Al a l'effet le plus faible sur le temps de prise final.

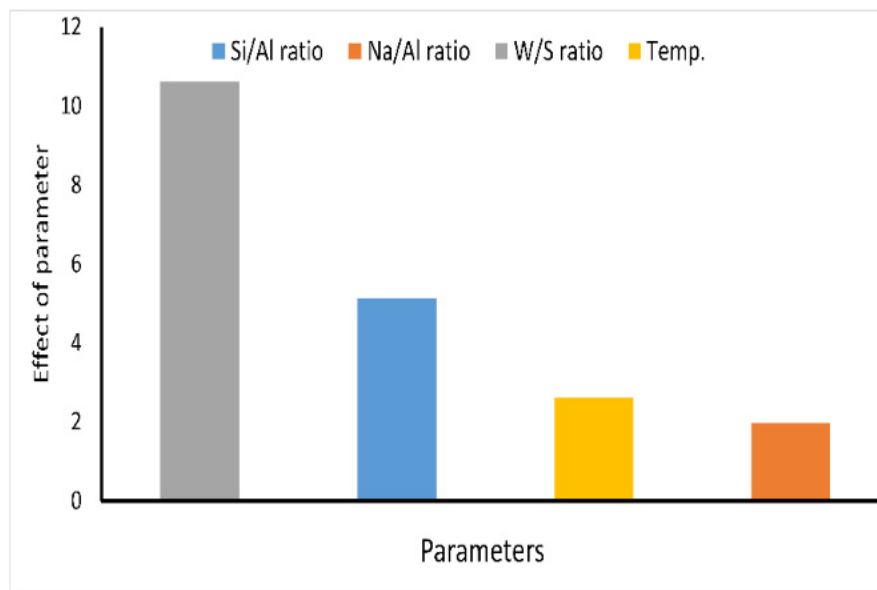


Figure 5 Effet de différents facteurs sur le temps de prise des matériaux géopolymères

Selon Davidovits[2] [3], le pH mesuré dans les cendres volantes peut affecter le temps de prise du béton géopolymère. A un pH supérieur à 11, les cendres volantes en tant que matière première ont une forte possibilité de prise instantanée après 5 minutes de mélange. La teneur en CaO du précurseur joue un rôle très important sur le temps de prise. Plusieurs études ont montré que le pH est étroitement lié à la teneur en CaO des cendres volantes [42]. Des niveaux élevés de CaO dans les cendres donnent lieu à un matériau géopolymère avec une prise rapide et une haute résistance à la compression, tandis que les géopolymères fabriqués avec des cendres volantes à faible teneur en calcium peuvent ne pas faire prise, même au-delà de 120 minutes après le mélange [43].

1.5.2. Résistance mécanique des géopolymères

Les géopolymères sont devenus des matériaux de choix, particulièrement dans le domaine de la construction, grâce à leurs résistances mécaniques prometteuses. Cependant, le comportement à la compression des géopolymères varie selon les matières premières, le temps de séchage et les méthodes de traitement utilisées.

Davidovits [44] a déterminé les propriétés physico-chimiques et mécaniques d'un ciment géopolymère à base de kaolin calciné pur, appelé PZ-Geopoly® cement, produit à partir de matériaux kaoliniques calcinés. Après 4 heures de durcissement à 20 °C, le géopolymère possède une résistance à la compression d'environ 20 MPA et atteint une valeur maximale comprise entre 70 et 100 MPA après 28 jours de séchage.

Abdulkareem et Ramli [45], ont étudié l'effet du rapport massique $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sur la résistance à la compression afin de connaître les conditions optimales. Les auteurs ont ainsi activé des cendres volantes de classe C en mélangeant une solution de NaOH 12M et du Na_2SiO_3 avec des rapports de mélange $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ allant de 0,5 à 3,0 par incrément de 0,5. Après 5 min de mélange manuel, les géopolymères homogènes frais ont été versés dans des moules en plastique de 50 mm × 50 mm × 50 mm et durcis à une température allant de 60 à 90 °C pendant 24h. Les auteurs ont trouvé que la résistance à la compression du géopolymère à base de cendres volantes pouvait atteindre 70 MPA après 24h de séchage à 70 °C et 28 jours de durcissement à température ambiante avec un rapport $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 1.

Rowles et O'Connor [46] ont évalué la résistance à la compression des Na-géopolymères synthétisés à l'aide de solutions de silicate de sodium et de Metakaolin. Les géopolymères avec un rapport $\text{Si}/\text{Al} = 1 \sim 3$, $\text{Na}/\text{Al} = 0,5 \sim 2$ ont été durcis à 75 °C pendant 24 heures et vieillis pendant 7 jours. Figure 6 [46], résume les résultats de leurs recherches. Selon ces résultats, la résistance à la compression dépend des quantités de Na, Si et Al. La plus élevée (67 MPA) a été mesurée pour des rapports Si/Al de 2,5 et Na/Al de 1,3 après 7 jours de cure.

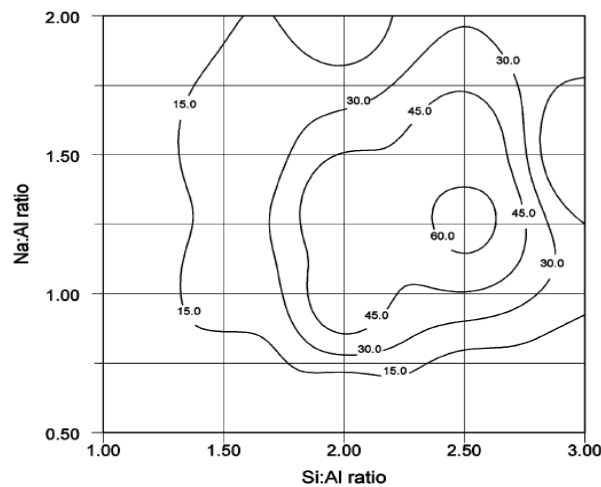


Figure 6 Contours de résistance à la compression pour les Na-géopolymères

1.5.3. Durabilité des matériaux géopolymères

➤ Résistance au feu

Les matériaux géopolymères possèdent une excellente résistance au feu. De nombreuses études ont prouvé que les matériaux géopolymères sont supérieurs au ciment Portland en termes de résistance à la chaleur et au feu, car le ciment Portland subit une détérioration rapide de sa

résistance à la compression dès 300 °C, tandis que les ciments géopolymères sont stables jusqu'à 600 °C [47].

Duan *et al.*[48], ont mené une étude de durabilité du géopolymère à base de cendres volantes-métakaolin et ont comparé les résultats avec ceux du ciment Portland. Les auteurs ont constaté que la résistance à la compression du géopolymère de départ est de 60 MPA et augmente d'environ 3 % après exposition à une température de 400 °C, atteignant une résistance maximale de 72 MPA. La résistance à la compression diminue et se stabilise à 25 MPA après exposition à 1000 °C.

➤ **Résistance aux acides**

Les géopolymères sont très résistants lorsqu'ils sont exposés à des environnements agressifs. Certains auteurs [49] ont rapporté des résultats de tests de résistance aux acides des pâtes, mortiers et bétons géopolymères. Ces chercheurs ont conclu que les géopolymères ou les bétons géopolymères sont plus résistants aux acides comparés aux bétons de ciment Portland, car la perte de poids après exposition est beaucoup plus faible.

Bakharev [49], a examiné la durabilité des matériaux géopolymères à base de cendres volantes de classe F et d'activateurs alcalins. Les géopolymères ont été exposés à des solutions d'acides acétique et sulfurique à 5 %, et différents paramètres ont été étudiés après immersion tels que la perte de poids, la résistance à la compression, les produits de dégradation et les modifications microstructurales. Les résultats ont montré que la performance des matériaux géopolymères exposés à des solutions acides était supérieure à celle du ciment Portland ordinaire. Cependant, une importante dégradation de la résistance a été observée pour certains matériaux géopolymères préparés avec du silicate de sodium et un mélange d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de potassium en tant qu'activateurs. Bakharev a expliqué la détérioration par la dépolymérisation des polymères aluminosilicates dans des milieux acides et la formation de zéolites. La meilleure performance a été notée dans le matériau géopolymère préparé avec de l'hydroxyde de sodium seul et durci à température élevée, elle est due à la haute stabilité de la structure du gel aluminosilicate réticulé formé dans ce matériau.

Škvára *et al.*[50] se sont intéressés à la durabilité des géopolymères à base de cendres volantes dans des milieux agressifs contenant les ions sulfates et chlorures. Ils ont ainsi immergé les échantillons de géopolymères dans des solutions de $MgSO_4$, Na_2SO_4 et $NaCl$. Un produit blanc a été observé à la surface des échantillons exposés à du sulfate de magnésium $MgSO_4$. Les

résultats ont révélé que les géopolymères à base de cendres volantes possèdent d'excellentes résistances aux milieux contenant des sels comparativement au ciment Portland ordinaire.

1.6. Applications des géopolymères

Les géopolymères peuvent être appliqués dans différents domaines, tels que :

- L'isolation thermique [51].
- La fonderie [52].
- Les objets de décoration en pierre [53].
- Les biotechnologies (applications médicales) [54].
- La réparation et le renforcement des infrastructures [55].
- La fabrication de ciments et bétons [40].
- Et dernièrement la gestion des déchets radioactifs et toxiques [56].

Le rapport atomique Si/Al dans la structure du poly(sialate) détermine les propriétés et le domaine d'utilisation des matériaux géopolymères [2]. Figure 7 [2] résume les applications réussies réalisées depuis 1979 avec des géopolymères de différents types suivant le rapport Si/Al.

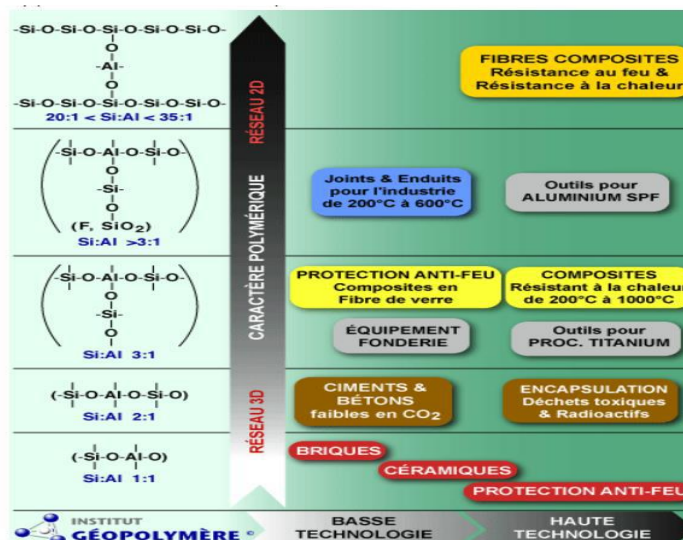


Figure 7 Applications des matériaux géopolymères selon le rapport Si/Al

1.7. Conclusion

Les géopolymères sont une classe de matériaux aluminosilicates amorphes à semi-cristallins, généralement synthétisés à température ambiante ou légèrement élevée. Ils sont conventionnellement préparés par une activation alcaline d'un précurseur d'aluminosilicate avec une solution alcaline hautement concentrée. Les géopolymères sont devenus des matériaux de choix grâce à leurs nombreuses propriétés avancées ainsi qu'une faible émission de CO₂ lors de leur synthèse. Ceci permet de les appliquer dans différents domaines, plus particulièrement dans le domaine de la construction.

CHAPITRE II
Déchets dans les géopolymères

2.1. Introduction

Dans un monde confronté à des défis environnementaux sans précédent, la recherche de solutions durables pour la construction est devenue une priorité absolue. L'utilisation des déchets comme matière première dans les géopolymères émerge comme une stratégie prometteuse, offrant à la fois des avantages environnementaux et économiques. Ce chapitre explore en profondeur le rôle crucial des déchets dans la construction durable à travers les géopolymères. Nous commencerons par examiner l'importance des déchets dans le contexte de la durabilité de la construction, mettant en lumière leur potentiel transformateur. Ensuite, nous procéderons à une classification des déchets les plus couramment utilisés dans la fabrication des géopolymères, mettant en évidence leur diversité et leurs applications potentielles. La caractérisation des déchets sera ensuite abordée. Nous examinerons également les effets des déchets sur les propriétés des géopolymères.

2.2. Utilisation des déchets dans les géopolymères

L'utilisation des déchets dans les géopolymères offre de nombreux avantages pour la construction durable, notamment en réduisant la dépendance aux ressources naturelles, en minimisant les déchets envoyés en décharge et en réduisant l'empreinte carbone de l'industrie de la construction.

2.2.1. Rôle des déchets dans la construction durable

L'utilisation des déchets dans les géopolymères contribue à la construction durable en offrant une alternative écologique aux matériaux de construction conventionnels. Cela permet de réduire la consommation de ressources naturelles non renouvelables et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre associées à leur production. Les géopolymères à base de déchets contribuent ainsi à la préservation de l'environnement et à la promotion de pratiques de construction respectueuses de l'écosystème [57].

- L'objectif premier de la construction durable est de contribuer à la protection de notre environnement naturel. Pour résoudre ce problème, le secteur de la construction s'efforce d'adopter une approche plus durable en combinant différentes stratégies [58].
- Réduire les déchets de construction: Jusqu'à 40 % de l'ensemble des déchets produits dans chaque pays européen proviennent du secteur de la construction [59]. La gestion des déchets est donc un objectif clé de la construction durable.

- Réduire les émissions de carbone: Étant donné qu'en Europe et au Royaume-Uni, le secteur de la construction est responsable à lui seul de 36 % des émissions de gaz à effet de serre [60] la réduction de l'empreinte carbone est une priorité.
- Créer un environnement de vie sain : Au-delà de la protection de l'environnement naturel, la construction durable vise également à protéger l'espace intérieur. Le respect de la santé et du bien-être des occupants d'un bâtiment durable est donc un impératif.
- Offrir des possibilités de logement équitable : Alors que la durabilité est généralement associée à la protection de l'environnement, l'un de ses principes est d'atteindre les communautés les plus vulnérables. La construction durable aborde ce principe en créant des possibilités de logement abordable.

2.2.2. Réduction de la consommation de ressources naturelles

En intégrant des déchets comme matières premières dans la construction, on diminue la demande pour l'exploitation de nouvelles ressources naturelles, telles que les agrégats minéraux et les matériaux traditionnels de construction. Cette approche favorise ainsi la préservation des écosystèmes et la conservation des ressources non renouvelables. En réduisant la pression exercée sur ces ressources précieuses, nous travaillons vers une utilisation plus responsable des éléments essentiels à notre environnement, contribuant ainsi à assurer leur disponibilité pour les générations futures [61].

2.2.3. Réduction des déchets envoyés en décharge

En donnant une nouvelle vie aux déchets à travers leur intégration dans les processus de construction, nous réduisons significativement la quantité de déchets destinés aux sites d'enfouissement. Cette approche contribue ainsi à résoudre les problèmes liés à la saturation des décharges et à l'enfouissement des déchets, tout en favorisant une gestion plus efficace des déchets. Ces actions s'alignent parfaitement avec les principes de l'économie circulaire, mettant en avant la valorisation des ressources existantes pour créer un cycle vertueux de réutilisation et de réduction des déchets [62].

2.2.4. Réduction des émissions de gaz à effet de serre

L'utilisation de déchets dans la construction permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la production et au transport des matériaux de construction conventionnels. Par exemple, l'utilisation de cendres volantes dans les géopolymères réduit les émissions de CO₂ par rapport à la fabrication de ciment Portland. Cela contribue à l'atténuation du changement climatique en réduisant l'empreinte carbone de l'industrie de la construction [63].

2.2.5. Promotion de l'innovation et de l'économie circulaire

L'importance cruciale de l'utilisation des déchets dans la construction. Cette approche ouvre de vastes possibilités en matière de développement technologique et de transformation des pratiques de construction. En effet, elle stimule la recherche de nouveaux matériaux et de processus de fabrication novateurs. De plus, l'intégration de déchets dans la construction représente un pilier fondamental de l'économie circulaire. En donnant une seconde vie à ces matériaux, elle transforme ce qui était autrefois considéré comme un fardeau en une précieuse ressource. Ce changement de perspective non seulement réduit le gaspillage, mais crée également des boucles d'approvisionnement fermées, où les déchets deviennent des matières premières pour de nouveaux produits. Cette transition vers une économie circulaire a des implications profondes sur le plan économique. Elle ouvre de nouvelles opportunités commerciales, notamment dans le domaine du recyclage et de la valorisation des déchets. De plus, en réduisant la dépendance aux matériaux vierges, elle contribue à la sécurité et à la stabilité des approvisionnements en matières premières donc, elle favorise une croissance économique durable et résiliente.

2.3. Classification des déchets utilisés et leurs effets sur les propriétés des géopolymères

2.3.1. Déchets industriels

2.3.1.1. Déchets de démolition de béton

Actuellement, les plus grands producteurs de débris dans le monde sont les États-Unis d'Amérique, la Chine et les pays qui constituent la Communauté européenne. On estime que la Chine produit environ 200 millions de tonnes par an ; cependant, ce nombre pourrait être plus élevé en raison des catastrophes naturelles de ces dernières années [64]. Les États-Unis génèrent environ 143 millions de tonnes , et dans l'Union européenne, le volume des déchets de construction et de démolition représente environ 35 % du total des déchets générés et est estimé à environ 700 millions de tonnes par an [65]. Dans certains pays, comme l'Allemagne, le Danemark et les Pays-Bas, la réutilisation atteint 80 %, alors que dans les autres pays, en moyenne, la réutilisation ne dépasse pas 30 %. En Colombie, bien qu'il n'existe pas d'étude statistique nationale, on rapporte que dans plusieurs villes à plus forte croissance démographique, comme la ville de Bogota, jusqu'à 12 millions de tonnes sont produites par an et ne sont pas utilisées [66].

Il est donc évident que l'utilisation des déchets de démolition du béton dans la synthèse des géopolymères est actuellement un sujet de grand intérêt, en particulier dans les pays qui ont des lacunes dans la gestion de ce type de déchets, comme la Colombie, car leur utilisation peut réduire l'impact environnemental généré par une élimination finale inadéquate de ces résidus, en particulier lorsque cette technologie permet une large utilisation des déchets. De plus, les géopolymères sont des liants alternatifs au ciment Portland avec le potentiel de réduire les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie [67]. En ce sens, le but du présent article est de déterminer les paramètres de synthèse optimaux (rapports Na₂O/SiO₂ et SiO₂/Al₂O₃) de systèmes géopolymères simples, hybrides et binaires à base de DDB avec ajouts de Portland. Ciment (CPA) et métakaolin (MK). Pour le broyage des DDB, il était nécessaire d'utiliser un broyeur à marteaux (concassage primaire) et, par la suite, un broyeur à boulets (broyage final), comme le montre la figure 8 [68].

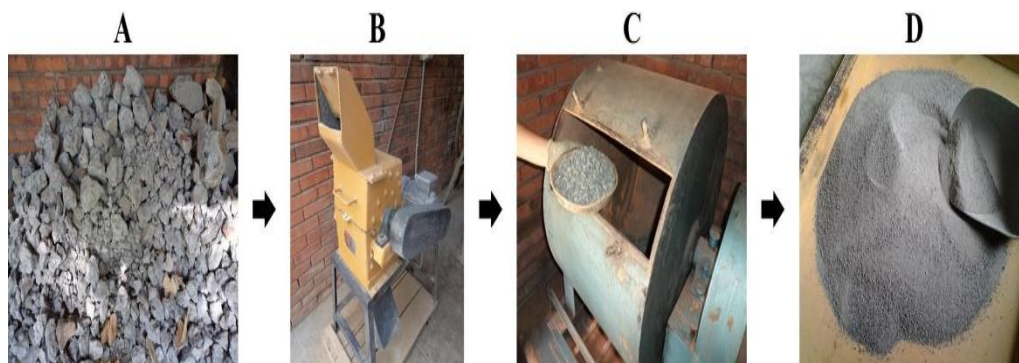


Figure 8 Processus de concassage et de broyage du DDB ; (A) Échantillon DDB, (B) Broyeur à marteaux, (C) Broyeur à boulets et (D) Poudre DDB.

2.3.1.2. Déchets de la brique

L'augmentation des déchets de briques en terre cuite, principalement due à l'augmentation des travaux de construction et de démolition dus au réaménagement urbain mondial, a suscité d'importantes préoccupations environnementales. Une partie importante, impropre à la réutilisation, contribue à la pollution et à des coûts d'élimination élevés. Avec des déchets de maçonnerie atteignant 25 millions de tonnes en 2019 contre 15 millions de tonnes en 2007, ils constituent l'un des principaux déchets d'Australie [69]. Cette élimination présente des risques environnementaux. Malgré les efforts de recyclage, une quantité importante reste inutilisée. Intégrer ces déchets dans la production de géopolymères marquerait une étape notable dans leur processus de recyclage. En revanche, la diminution progressive de la disponibilité des cendres

volantes avec le passage à davantage d'énergies renouvelables entraînera à l'avenir une pénurie de matériaux cimentaires supplémentaires et de précurseurs géopolymères. Il est donc crucial de trouver des matériaux de liaison alternatifs. Cette étude a examiné la faisabilité de l'utilisation des déchets de briques comme précurseur partiel de géopolymère. La sélection était basée sur la similitude des compositions chimiques du (DBTC) et des cendres volantes, notamment en termes de teneurs en silicium (Si) et en aluminium (Al).

Des études antérieures utilisaient souvent un mélange d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH) avec du silicate de sodium (Na_2SiO_3) comme activateur alcalin habituel lors de la synthèse d'un liant géopolymère [70]. Certaines études ont également utilisé ces activateurs individuellement [71] [72]. Des recherches antérieures utilisaient 7 à 44 % d'activateur alcalin en masse du précurseur solide total [73]. D'autre part, les conditions de durcissement variaient, incluant à la fois le durcissement ambiant et thermique. Le durcissement thermique a été réalisé dans une plage de températures allant de 60 °C à 115 °C. En outre, différentes matières premières, utilisant diverses proportions de mélange de sable et de granulats grossiers, et méthodes de mélange différentes caractéristiques, notamment la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion et le module d'élasticité, ont été évaluées, montrant des résultats comparables à ceux du béton de ciment à base de clinker [74].

2.3.1.3. Déchets de plastique

Les impacts négatifs sur les écosystèmes, la vie marine et la santé humaine ont fait des déchets plastiques une crise environnementale mondiale. Les pratiques traditionnelles de gestion des déchets, telles que la mise en décharge et l'incinération, ne sont pas respectueuses de l'environnement et aggravent au contraire la pollution et l'épuisement des ressources. En conséquence, il est essentiel que nous découvriions dès maintenant de nouvelles approches pour traiter les déchets plastiques [75]. Cependant, une part importante des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine est produite par le secteur du bâtiment. Une partie importante de ces émissions provient de la fabrication du principal ingrédient du béton conventionnel, le ciment Portland typique [76]. Les alternatives durables au béton conventionnel attirent de plus en plus l'attention comme moyen de réduire les effets négatifs du secteur du bâtiment sur l'environnement. Des options durables comme le béton géopolymère commencent à se développer. Il remplace le ciment Portland par des déchets industriels comme les cendres volantes ou les scories dans le processus de liant [54] [77].

La promesse du béton géopolymère en matière de réduction des émissions de carbone et de la consommation d'énergie en fait un candidat incontournable pour les méthodes de construction respectueuses de l'environnement [78]. Il y a un double avantage à utiliser du béton géopolymère intégrant du plastique recyclé [79]. Premièrement, il offre un moyen pratique de traiter les déchets plastiques en utilisant ces matériaux de manière productive. Deuxièmement, cela offre la possibilité d'améliorer les qualités et la fonctionnalité du béton géopolymère. Des études plus approfondies sont nécessaires pour découvrir tout le potentiel du béton géopolymère lorsque du plastique recyclé y est ajouté [80] [81].

2.3.1.4. Les déchets de verre

Les déchets de verre urbains sont un candidat prometteur, répertorié comme un type courant de déchets solides municipaux non biodégradables par l'agence américaine de protection de l'environnement. Le cumul annuel des déchets de verre résultent de la production continue de produits en verre qui ont généralement une durée de vie courte. En raison de la difficulté de décoloration et tri du verre brisé, la plupart des déchets de verre ne peuvent pas être utilisés pour produire de nouveaux produits en verre, ce qui conduit à un faible niveau global de recyclage (20 à 28 %) aux États-Unis [82]. Cependant, des études récentes sur un géopolymère à base de poudre de verre (GP) sans ciment semblent confirmer l'idée que les déchets de verre sont une ressource pour le béton géopolymère [83] [84]. La synergie potentielle entre le recyclage du verre et le béton la production est basée sur l'attribut du verre, qui est largement connu comme un matériau amorphe et riche en silice (~ 70 % SiO₂). De plus, la composition chimique des déchets de verre est généralement stable puisque la majorité des produits verriers sont en verre sodocalcique [85]. La figure 9 (a) et (b) montre respectivement l'image tel que reçu et du verre recyclé sous forme de poudre [86].



Figure 9 (a) les verres usagés tels que reçus (b) la poudre de verre recyclée

2.3.1.5. Déchets de céramique

L'utilisation des déchets céramiques dans la construction s'avère prometteuse pour valoriser ces débris indésirables. Regroupés en tant que déchets, ces matériaux peuvent être réemployés comme compléments cimentaires ou granulats dans la fabrication du béton. Cette approche pourrait non seulement réduire les coûts de production du béton, mais aussi le rendre plus écologique, offrant ainsi une solution aux problèmes environnementaux. De plus, les déchets céramiques possèdent des propriétés physicochimiques à la fois de charge et de matériau pouzzolanique. Des études ont également montré qu'ils pourraient être intégrés dans des géopolymères, agissant à la fois comme précurseur et agrégat. Les géopolymères, des liants à base d'aluminosilicate, offrent l'avantage de réduire l'empreinte carbone en remplaçant le ciment par des cendres volantes de charbon. Par conséquent, l'exploration de l'utilisation d'autres déchets solides, tels que les déchets céramiques, pourrait favoriser une gestion plus efficace des ressources. Il est également noté que la taille des particules des agrégats de déchets sanitaires ne présente généralement pas de différence significative, sauf si les particules sont inférieures à $80\ \mu\text{m}$, car ces petites particules pourraient réagir avec une solution alcaline, agissant comme précurseur ou matériau de remplissage pour les particules non réactives [87] [88].

Une substitution importante de granulats de déchets céramiques (GDC) a également été étudiée, entraînant une augmentation progressive parallèlement à l'augmentation du remplacement [89]. L'étude a en outre révélé qu'un remplacement complet des granulats améliorerait la résistance à la compression jusqu'à 35 %. Cependant, les caractéristiques de la microstructure de cette application GDC n'ont pas été évaluées. Les caractéristiques et les comportements de liaison

entre les GDC et la matrice géopolymère pourraient être un attribut important affectant cette résistance accrue. En revanche, un type de granulats issus de déchets de carreaux de céramique rouge a entraîné une réduction de la résistance à la compression et une accélération du temps de prise dans les BUHPGC [90]. Dans cette étude, une enquête sur les performances des mortiers géopolymères à base de cendres volantes contenant divers GDC en remplacement du sable de rivière, en mettant l'accent sur la résistance à la compression, les temps de prise et les microstructures, a été menée pour accroître la clarté de l'effet des GDC.

2.3.2. Déchets agricoles et biomasses

La combustion de biomasse est une source majeure de préoccupation environnementale dans le secteur agricole, en raison de ses répercussions sur la qualité de l'air, entraînant ainsi de sérieux problèmes de santé, notamment dans les zones culturelles. Comme le rapporte la Réf [91] le brûlage annuel de la biomasse en Asie est d'environ 750 Tg (Téra grammes = 10¹² g), dont près de 250 Tg (33,3 %) résultaient du brûlage à l'air libre. Par exemple, les brûlages de biomasse en plein champ en Inde et en Chine étaient de 84 et 10 Tg, respectivement. En conséquence, alors que les volumes de cendres de biomasse augmentent dans le monde et le coût d'élimination augmente, une méthode durable pour l'élimination de ces le gaspillage est justifié [92]. Ressources renouvelables et durables comme les cendres de résidus agricoles retiennent l'attention en raison de leur viabilité en tant que complément matériaux cimentaires. Cela est principalement dû à la réalité disponibilité, faible coût et excellente réactivité de ces cendres résiduelles dans le mélange de béton. Ces dernières années, les sous-produits industriels (c.-à-d. le charbon) cendres, Metakaolin, fumée de silice et scories de haut fourneau), ainsi que les sous-produits agro industriels (c'est-à-dire les cendres de balle de riz et les cendres de carburant d'huile de palme), ont été largement incorporés par l'industrie du béton, pré- évacuer leur combustion incontrôlée et leur accumulation dans des décharges qui autrement, cela polluerait la terre, l'eau et l'air [93]. Par conséquent, les avantages économiques et environnementaux de l'industrie du béton ont été renforcés. En général, l'intégration de cendres de biomasse dans le ciment et le béton présente des avantages pour la technologie de zéro déchet et le développement durable. Les sous-produits de la biomasse, riches en silice, peuvent servir de sources d'énergie renouvelable et présenter des propriétés pouzzolaniques élevées lorsqu'ils sont brûlés dans des conditions spécifiques. De plus, les cendres finement broyées peuvent également être utilisées comme matériau de remplissage, améliorant ainsi la densité de compactage du béton.

2.3.2.1. Cendres de balle de riz

La production mondiale de paille de riz était estimée entre 685 [94] et 731 millions tonnes par an. La pratique la plus courante pour se débarrasser de la paille/coque de riz est brûlée en plein champ (Figure 10) [95].



Figure 10 Génération de cendres de paille de riz.

Cela peut entraîner divers problèmes de santé et environnementaux, principalement dus à des polluants toxiques tels que le monoxyde de carbone, le méthane, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote, le carbone imbrûlé et les dioxines [96]. La combustion de la paille/de la balle de riz est responsable de 5 à 10 % des émissions mondiales de méthane et du potentiel de réchauffement climatique du méthane est bien supérieure à celle du dioxyde de carbone. La combustion de la paille de riz génère des cendres de paille de riz (CPR) contenant des propriétés pouzzolaniques, faisant du CPR un candidat potentiel pour être incorporés dans des composites cimentaires. D'après la Réf [97] Chaque 1 000 kg de paille de riz produit environ 150 kg de cendres lors de sa combustion .comprenant 15% de cendres de paille de riz de couleur grise avec une teneur en silice de 82%, une surface spécifique de 18 460 cm²/g, et un spécifique gravité de 2,25. Utilisé CPR pour remplacer CPA à titre de remplacement de 5 % et 10 % dans béton et mortier, respectivement. L'affaissement du béton observé était environ 70 mm, et le débit moyen de mortier était de 106 mm. Comme conclu par Réf [95], la maniabilité du béton diminue avec les CPR ajout en raison de sa grande surface et de sa forme irrégulière, donc exigeant de l'eau supplémentaire pour obtenir une maniabilité acceptable. Le l'écoulement d'affaissement dans le béton contenant du CPR variait entre 600 et 750 mm. Les résultats T50 des mélanges étaient confinés dans la plage de 3 à 7 s. Les résultats de l'entonnoir en V étaient compris entre 7,3 et 14,4 s. a noté que le les temps de prise initiale et finale et la demande en eau pour obtenir une consistance standard ont augmenté avec l'augmentation des taux de remplacement du CPR dans la matrice cimentaire.

2.3.2.2. Cendre de feuille de bananier (CFB) et cendre d'écorce de plantain (CEP)

Cendres d'écorces de plantain préparées en séchant à l'air les écorces de plantain mûres, les brûler en cendres en utilisant la méthode à température ouverte, et enfin tamisage à travers un tamis BS de 150 mm [98]. brûlé la banane séchée laisse les feuilles à 850 °C puis les broie dans un broyeur à boulets pendant 30 min pour augmenter l'activité pouzzolanique au-dessus du niveau minimum [99]. Signalé les conditions optimales (c'est-à-dire brûler à 900 °C pendant 24 h dans l'air) pour préparer du CFB comme SCM potentiel avec une taille moyenne de particules de 15 µm. Le total des teneurs significatives en oxydes (c'est-à-dire $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) était plus de 50 %, et sa LOI était donc dans les limites. De plus, 83% de CFB (en poids) était amorphe. Analyse par microscopie électronique à balayage a indiqué que ce CFB avait des particules à face inclinée allant de 1 à 10 µm de diamètre, une surface spécifique Blaine de 14 000 cm^2/g , et un particulier masse de $2,440 \pm 0,012 \text{ g}/\text{cm}^3$. Comme les résultats satisfaisaient les exigences pouzzolaniques indice d'activité (PAI) du matériau (7,9 MPa) et minimum de 7 jours exigence de résistance à la compression de 6 MPa, il a été conclu que le CFB pourrait être utilisé comme matériau pouzzolanique potentiel. Les tests PAI ci-dessus ont été développés avec des éprouvettes de référence en mortier de $50 \times 100 \text{ mm}$ en les proportions de 104 : 936 g (CaO : sable) et la consistance de $(225 \pm 5) \text{ mm}$, comme vérifié par le test de la table de flux. Le CFB a été ajouté au mortier de référence puis analysé. [100] ont utilisé du CEP comme adjuvant dans le béton (CPA), incorporant jusqu'à Niveaux de remplacement de 25 % (en poids) avec des incréments de 5 %. Le la résistance à la compression du béton contenant du CEP a été progressivement diminuait à mesure que le niveau de remplacement du CEP augmentait. Le mélange de contrôle La résistance à la compression sur 28 jours était de 28,5, tandis que les mélanges de béton contenant 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 % de CEP étaient de 27,6, 26,84, 26,30, 25,76 et 25,40 MPa, respectivement [99]. A rapporté que 10% Le mortier contenant du CFB avait respectivement des résistances à la compression et à la traction 25 % et 10 % supérieures à celles du mortier de référence. Le béton contenant 10 % et 20 % de CFB présentait une résistance à la compression plus élevée de $38 (\pm 2) \text{ MPa}$ et $47 (\pm 2) \text{ MPa}$, respectivement, à 28 jours de durcissement. De plus, le béton contenant du CFB a montré une plus grande résistance à la corrosion de l'acier induite par les chlorures, mesurée par les potentiels des demi-cellules électrode de référence r.t Cu/CuSO_4 , après exposition à une solution saline

Pendant 300 jours. Les valeurs potentielles résultantes correspondaient aux critères

de « aucune probabilité de corrosion » spécifiée dans les directives RILEM [101].

2.3.2.3. Boues d'épuration

Ces dernières années, les cendres de boues d'épuration, produites à partir du traitement de calcination des boues d'épuration déshydratées, sont également devenues un bon candidat pour les précurseurs du géopolymère. Actuellement, les productions annuelles de boues d'épuration (Figure 11) [103] dépassent 70 millions de tonnes en Chine en raison de l'augmentation rapide de la consommation d'eau urbaine et industrielle dont l'élimination et le traitement sont devenus un problème urgent. Les boues d'épuration sont riches en matières organiques biodégradables, en métaux lourds, en micro-organismes, en agents pathogènes et autres substances nocives et les méthodes d'élimination traditionnelles telles que l'utilisation agricole, la mise en décharge et la pyrolyse peuvent consommer des ressources terrestres précieuses et beaucoup d'énergie, ou provoquer pollution secondaire [104] En effet, les boues d'épuration sont riches en SiO_2 , Al_2O_3 et CaO , qui existent également dans les précurseurs aluminosilicates du géopolymère. Une certaine partie de ces matériaux existe toujours sous forme de cristaux de silice et d'alumine, ce qui affecte dans une certaine mesure la dépolymérisation des tétraèdres de Si et d'Al [105], tandis que le Si et l'Al sont principalement sous forme amorphe dans le SSA, ce qui améliore le degré de réaction de géopolymérisation ainsi que les propriétés physiques et chimiques du géopolymère [106].



Figure 11 boues d'épuration

2.3.2.4. Les déchets des coquilles d'œuf

Les coquilles d'œuf peuvent être transformées en poudre fine et utilisées comme matériau de substitution dans la fabrication des géopolymères. Leur composition chimique, principalement constituée de carbonate de calcium, peut contribuer à la formation de liants géopolymères.

Une coquille d'œuf contient 94% de carbonate de calcium (CaCO_3), 1% de phosphate de calcium ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), 1% de carbonate de magnésium (MgCO_3) et 4% de matière organique [107] qui remplacent calcaire. Le ciment mélangé présente de nombreux avantages pour l'environnement, l'économie et la technologie. La composition chimique de la poudre de coquille d'œuf (PCO) est similaire à celle du calcaire. La poudre de calcaire est la charge utilisée dans le ciment, le béton et les briques [108]. Le remplacement du ciment par de l'PCO augmente le processus d'hydratation et donne des résistances précoces, améliorant la résistance à la traction, à la compression et à la flexion [109]. Par conséquent, une alternative à l'élimination directe vers la décharge a été étudiée en réutilisant les PCO dans le béton [110]. L'PCO est utilisé comme source de calcium dans la synthèse des phosphates de calcium depuis 1999, mais l'étude de son effet sur les propriétés du béton est limitée. Une étude approfondie a été réalisée sur la réutilisation des déchets solides dans les matériaux de construction. Le gaspillage total de coquilles d'œufs s'élève à 10 milliards de dollars chaque année. L'utilisation des déchets solides crée un environnement durable ainsi qu'une construction durable [111].



Figure 12 Déchets de coquilles d'œuf

2.4. Conclusion

En conclusion il y'a une importance cruciale de l'utilisation des déchets dans les géopolymères pour promouvoir la construction durable. En examinant le rôle des déchets dans ce contexte, il devient évident qu'ils peuvent servir de ressources précieuses plutôt que de simples matériaux à éliminer. La classification des déchets utilisés offre une vue d'ensemble claire de la diversité des matériaux pouvant être incorporés dans les géopolymères, ouvrant ainsi la voie à une utilisation plus large et plus efficace de ces ressources. De plus, la caractérisation des déchets permet une compréhension approfondie de leur impact sur les propriétés des géopolymères, ce qui est essentiel pour garantir des performances optimales des matériaux de construction finaux.

CHAPITRE III
Matériaux et méthodes

3.1. Introduction

Ce chapitre présente une analyse détaillée des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour évaluer les propriétés des géopolymères préparés dans cette étude. Les essais comprennent des évaluations physiques telles que la masse volumique, la porosité et l'étalement, ainsi que des tests mécaniques tels que la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique. Ces caractérisations permettront de mieux comprendre les performances des géopolymères et leur potentiel pour diverses applications dans le domaine de la construction durable.

3.2. Matériaux et caractérisation

3.2.1. Précurseurs

Dans cette section, nous décrivons les trois principaux précurseurs utilisés dans notre étude pour formuler les composites géopolymères. Ces précurseurs incluent le laitier de haut fourneau (LHF), la poudre de céramique (PC) et la poudre de coquilles d'œufs (PCO), chacun apportant des contributions uniques aux propriétés finales du matériau (Figure 13). Chaque précurseur a fait l'objet d'une caractérisation approfondie pour évaluer sa composition chimique, sa granulométrie et d'autres caractéristiques pertinentes.

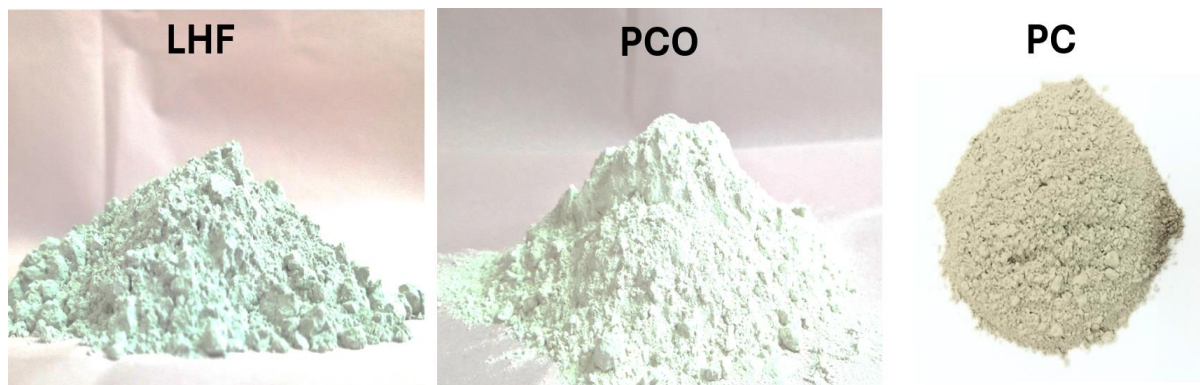


Figure 13 Apparences des précurseurs utilisés

Le tableau 1 présente les compositions chimiques des précurseurs. Le LHF est principalement composé de calcium, de silice et d'alumine, tandis que la PC affiche une teneur élevée en silice

et en alumine. La PCO présente une proportion notable d'oxyde de calcium, contribuant ainsi à sa réactivité dans les mélanges géopolymères.

Tableau 1 Composition chimique des précurseurs

%	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	SO ₃
LHF	43.2	41.1	7	2.8	0.32	0.6	4.7	0.25
PC	0.88	59.67	27.45	1.47	1.3	2.14	0.28	0.02
PCO [102]	33–99	<1	<1	<1	<1	0–2.9	<1	0–1.3

La Figure 14 montre les courbes de distribution de la taille des particules des précurseurs, mesurées à l'aide d'un analyseur de taille des particules. Le diamètre moyen des particules varie de 16,73 μm pour le LHF à 28,32 μm pour la PC.

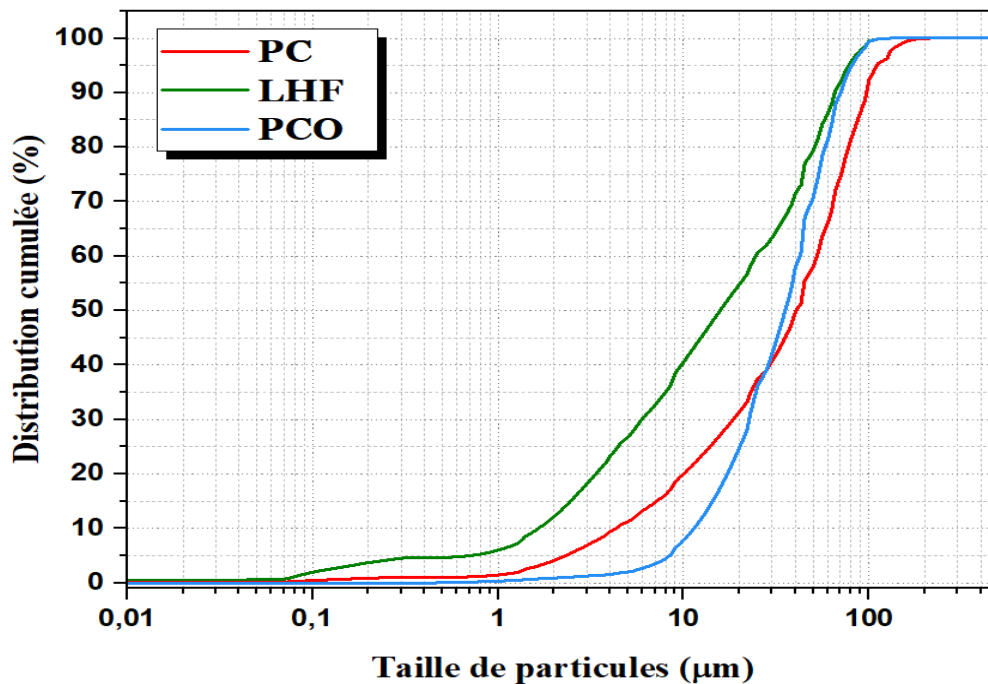


Figure 14 Courbes granulométriques des précurseurs

Les densités et les finesses des précurseurs sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 Propriétés physiques des précurseurs

Précurseurs	Densité	Surface spécifique de Blaine (g/cm ²)
LHF	2.94	2364.22
PC	2.68	2684
PCO	2.52	2845

3.2.2. Activateurs

3.2.2.1. Soude caustique

La soude caustique employée dans notre étude est de l'hydroxyde de sodium sous forme de perles, avec une pureté d'au moins 99%. Ce produit est fourni par la société SPECILAB en Algérie sous la référence SP11271S025, ayant une masse moléculaire de 40. Les spécifications détaillées de sa composition sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 Composition chimique de la soude caustique

Composition	Teneur (%)
Hydroxyde de Sodium	99,6
Carbonate de Sodium	0,41
Chlorure de Sodium	0,002
Sulfate de sodium	0,005
Fer (Fe_2O_3)	0,001
Mercure (Hg)	0,00002

Pour préparer 1000 ml d'une solution de NaOH (10M) au laboratoire, nous avons suivi une méthode méticuleuse. Nous avons commencé par peser avec précision la quantité requise de sodium hydroxyde en perles (NaOH) en fonction de sa formule moléculaire et de la concentration cible de 10M (équivalent à 40% de concentration). Ensuite, nous avons ajouté cette quantité de NaOH (404,04 g) à un volume calculé d'eau déionisée, en prenant les précautions nécessaires en raison de la réactivité de la soude caustique avec l'eau (Figure 15).



Figure 15 Préparation de la solution NaOH

Une fois le NaOH ajouté à l'eau, nous avons utilisé un agitateur pour mélanger doucement la solution jusqu'à ce que le solide soit entièrement dissous. Cette opération a été effectuée dans un environnement bien ventilé et en portant des équipements de protection individuelle, car la dissolution de la soude caustique dans l'eau produit de la chaleur et des vapeurs irritantes.

Enfin, la solution de NaOH (10M) a été transférée dans un récipient approprié, étiqueté avec les informations essentielles sur le produit chimique et sa concentration. Nous avons observé les précautions de sécurité appropriées tout au long du processus de préparation et de manipulation de la solution de NaOH.

3.2.2.2. Silicates de sodium

Les silicates de sodium utilisés dans cette étude ont été fournis par SARL GC à Sidi Aïssa, M'Sila, comme indiqué dans la Figure 16. Les caractéristiques physico-chimiques de ce silicate de sodium sont résumées de manière synthétique dans le Tableau 5.



Figure 16 Silicates de sodium

Tableau 4 Caractéristiques des silicates de sodium utilisées

Paramètre	Composition
SiO ₂ (%)	29,8
Na ₂ O (%)	14,43
PH	13,01
Densité à 20° C (en g/cm ³)	1,53
Concentration (%)	45
SiO ₂ /Na ₂ O	2,06
Degré Baumé (°)	50,2

3.2.4. Sables

Pour cette étude, nous avons employé deux types de sables : le sable de dune et le sable concassé (Figure 17). Le sable concassé se caractérise par des grains angulaires avec des particules fines en surface, tandis que le sable de dune présente des grains arrondis et des surfaces nettes.



Figure 17 Les apparences des sables utilisés

La distribution granulométrique des sables est représentée dans la Figure 18, et leurs propriétés physiques sont détaillées dans le Tableau 6.

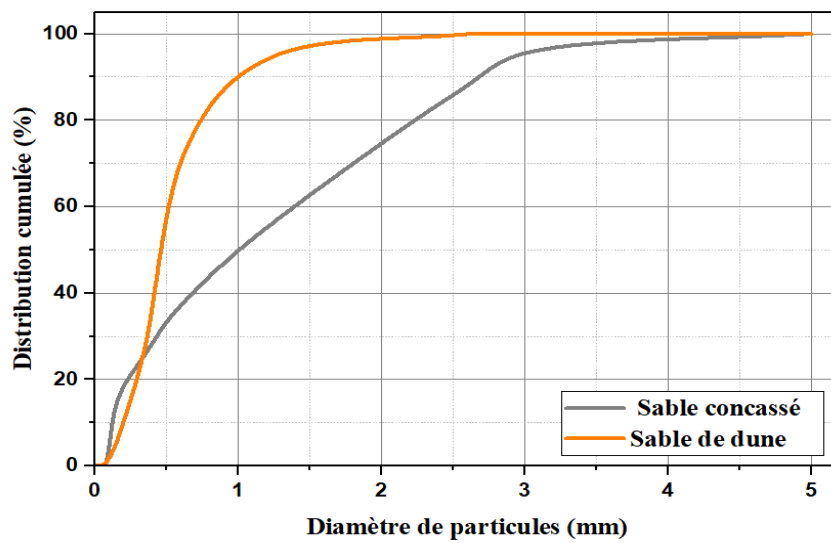


Figure 18 Granulométries des sables utilisés

Tableau 5 Propriétés physiques des sables utilisés

Type de sable	Densité	ES (%)	Quantité de poudre (<80 μ m) (%)	Module de finesse
Sable concassé	2.5	73	6	2.8
Sable de dune	2.61	90	3	2

3.3. Méthodologie

3.3.1. Préparation des mélanges

Les échantillons de géopolymère ont été préparés en suivant les compositions de mélange déterminées dans les tableaux correspondants. Trois groupes d'échantillons ont été fabriqués en fonction du type de déchet incorporé : le premier groupe utilisant la poudre de céramique (PC), le deuxième groupe utilisant la poudre de coquilles d'œufs (PCO), et le troisième groupe consistant en des mélanges ternaires combinant deux types de déchets différents.

Tableau 6 Compositions des mélanges confectionnés du premier groupe

Substitution (%)	0	5	10	15	20
LHF (kg/m ³)	587,647015	558,264664	528,882314	499,499963	470,117612
PC (kg/m ³)	0	29,3823508	58,7647015	88,1470523	117,529403
NaSiO ₃ (kg/m ³)			319,533064		
NaOH (kg/m ³)			106,511021		
Sable concassé (kg/m ³)			425,106351		
Sable de dune (kg/m ³)			825,206447		

Tableau 7 Compositions des mélanges confectionnés du deuxième groupe

Substitution (%)	0	5	10	15	20
LHF (kg/m ³)	587,647015	558,264664	528,882314	499,499963	470,117612
PCO (kg/m ³)	0	29,3823508	58,7647015	88,1470523	117,529403
NaSiO ₃ (kg/m ³)			319,533064		
NaOH (kg/m ³)			106,511021		
Sable concassé (kg/m ³)			425,106351		
Sable de dune (kg/m ³)			825,206447		

Tableau 8 Compositions des mélanges confectionnés du troisième groupe

Substitution (%)	0	5	10	15	20
LHF (kg/m ³)	587,647015	558,264664	528,882314	499,499963	470,117612
PC (kg/m ³)	0	14,6911754	29,3823508	44,0735261	58,7647015
PCO (kg/m ³)	0	14,6911754	29,3823508	44,0735261	58,7647015
NaSiO ₃ (kg/m ³)			319,533064		
NaOH (kg/m ³)			106,511021		
Sable concassé (kg/m ³)			425,106351		
Sable de dune (kg/m ³)			825,206447		

Les précurseurs et les sables ont été soigneusement pesés selon les proportions spécifiées dans les formulations précédentes. Ces composants secs ont été mélangés minutieusement pour garantir leur homogénéité. Parallèlement, une solution d'activateur alcalin

a été préparée en mélangeant de l'hydroxyde de sodium et du silicate de sodium dans un rapport de 1 pour 3.

Ensuite, le mélange sec a été combiné avec la solution d'activateur à l'aide d'un mélangeur mécanique pendant 90 secondes, donnant ainsi naissance à une pâte géopolymère homogène. Cette préparation a ensuite été versée dans un cône d'étalement pour évaluer sa maniabilité avant d'être soigneusement coulée dans des moules de dimensions 4x4x4 cm³ (voir Figure 19).



Figure 19 Remplissage des moules

Pour faciliter les réactions de géopolymérisation, les spécimens ont été démolis au bout d'un jour (Figure 20) et transférés dans un environnement contrôlé, maintenu à une température de 20 ± 2 °C et à une humidité relative ≥ 95 %, où ils sont restés jusqu'à ce qu'ils atteignent l'âge d'essai souhaité.



Figure 20 Les échantillons démoulés

3.3.3. Essais expérimentaux

Divers essais ont été menés pour évaluer les propriétés des géopolymères préparés, en examinant leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Tout d'abord, l'étalement des échantillons a été mesuré pour évaluer leur maniabilité (Figure 21) selon la norme ASTM C1437 [103].



Figure 21 Essai d'étalement

Ensuite, la masse volumique des échantillons après 28 jours de durcissement a été mesurée selon la méthode standard ASTM C138 [104] tandis que leur porosité a été évaluée en

quantifiant le volume des vides perméables accessibles à l'eau (voir Figure 22), conformément à la directive NBR 9778 [105].



Figure 22 Essai de porosité accessible à l'eau

Ces propriétés physiques sont étroitement liées aux performances mécaniques, qui ont été évaluées par des tests de résistance à la compression effectués après 7 et 28 jours de durcissement (voir Figure 23), suivant les normes ASTM C109 [106].



Figure 23 Essai de la résistance à la compression

Ces tests permettent d'évaluer le comportement des échantillons sous charge compressive, un aspect critique pour les applications de construction. De plus, la vitesse d'impulsion

ultrasonique a été déterminée à l'aide de l'appareil Ultrasonic Pulse Analyzer de CONTROLS selon la norme ASTM C 597 [107] pour évaluer la structure interne des géopolymères et son lien avec leur résistance mécanique (Figure 24).

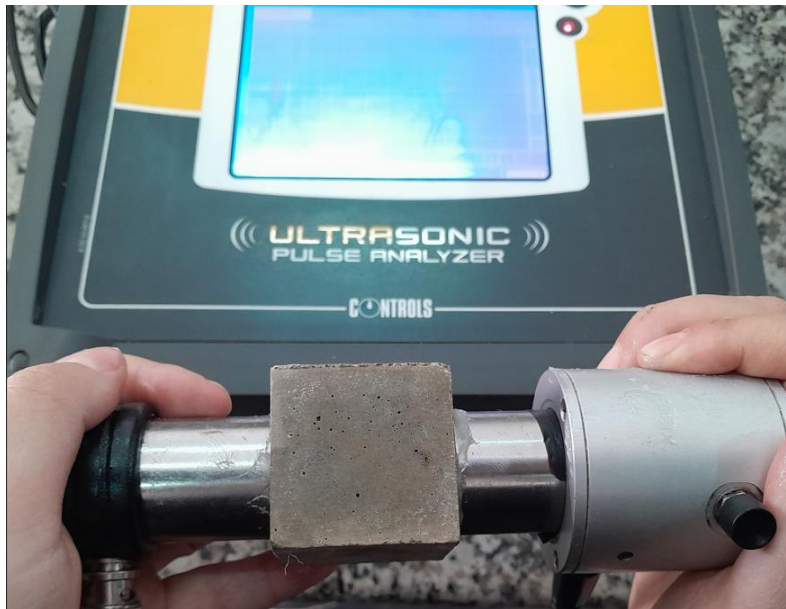


Figure 24 Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique

3.4. Conclusion

En conclusion, les résultats des essais physiques et mécaniques ont fourni des informations cruciales sur les propriétés des géopolymères étudiés. La mesure de la masse volumique et de la porosité a mis en lumière la compacité et la structure interne des échantillons, tandis que les tests de résistance à la compression ont révélé leur capacité à supporter des charges importantes. De plus, l'analyse par vitesse d'impulsion ultrasonique a fourni des indications sur la qualité et l'intégrité des géopolymères. Ces évaluations constituent une base solide pour la discussion des résultats et des applications potentielles des géopolymères dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

4.1 Introduction

Ce chapitre expose les résultats issus d'une analyse approfondie des formulations de géopolymère à base de la poudre de céramique (PC) et de la poudre des coquilles d'œufs (PCO). Les propriétés mécaniques, physiques et structurales sont étudiées en fonction des variations de contenu en PC et en PCO. Ces analyses offrent un éclairage approfondi sur les relations entre les teneurs en poudres de PC et PCO et les performances du matériau, facilitant ainsi une compréhension des compositions de géopolymère pour répondre à des critères de conception spécifiques.

4.2. Essai de maniabilité (étalement)

Les résultats de l'étalement fournissent des informations essentielles sur l'influence de la poudre de céramique (PC) et de la poudre de coquilles d'œufs (PCO) sur la maniabilité des mélanges géopolymères. L'analyse détaillée des variations d'étalement permet de comprendre comment ces matériaux substitutifs affectent la fluidité et la facilité de mise en œuvre des mélanges.

4.2.1. Effet de la poudre de céramique

En examinant l'effet de la PC sur l'étalement (Figure 25), une augmentation progressive de la maniabilité est observée à mesure que le pourcentage de PC incorporé dans les mélanges géopolymères augmente. Les valeurs d'étalement augmentent de manière linéaire, passant de 16,12 cm sans substitution à 16,35 cm avec un taux de substitution de 20 %, représentant une augmentation de 1,4 % par rapport au contrôle à 100 % de LHF (laitier de haut fourneau). Cette tendance indique que la poudre de céramique agit efficacement comme un agent de remplissage, améliorant la fluidité du mélange en réduisant la friction entre les particules et en favorisant une meilleure dispersion des composants dans la matrice géopolymère.

Cette augmentation graduelle de l'étalement avec l'incorporation de PC suggère que la PC contribue à augmenter la mobilité des particules dans le mortier géopolymère, facilitant ainsi le mouvement et la mise en forme du matériau. Cette amélioration de la maniabilité peut être attribuée aux propriétés fines et arrondies des particules de PC, qui remplissent efficacement les vides entre les grains, permettant une meilleure distribution des charges et une réduction de la viscosité du mélange [108]. Ces résultats mettent en évidence l'effet positif de la poudre de

céramique en tant que substitut partiel du LHF, favorisant une meilleure maniabilité tout en maintenant les performances du mélange géopolymère.

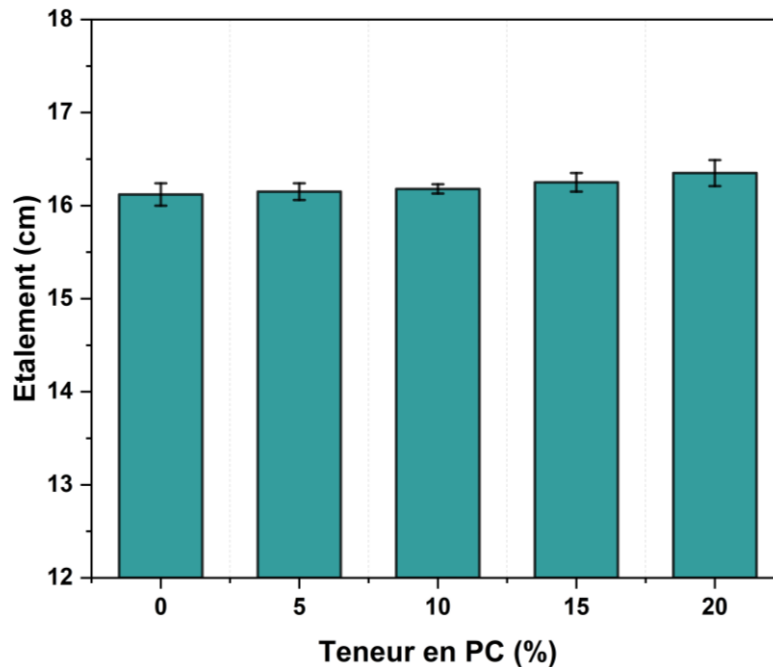


Figure 25 Effet de la PC sur l'étalement

4.2.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs

En ce qui concerne l'effet de la PCO, les résultats (Figure 26) révèlent une tendance inverse où l'étalement diminue progressivement à mesure que la proportion de PCO dans le mélange géopolymère augmente. L'étalement est réduit de manière linéaire, passant de 16,12 cm sans substitution à 14,67 cm avec un taux de substitution de 20 % en PCO. Cette diminution de l'étalement représente une réduction significative de 8,6 % par rapport au contrôle à 100 % de LHF.

Cette tendance peut être expliquée par plusieurs facteurs. Premièrement, la poudre de PCO présente une morphologie particulière avec une surface plus large par rapport au LHF, ce qui augmente sa capacité d'absorption d'eau et sa réactivité chimique. Cette absorption d'eau peut entraîner une augmentation de la viscosité du mélange, réduisant ainsi l'étalement. Deuxièmement, le carbonate de calcium présent dans la PCO réagit avec les composants alcalins de la pâte géopolymère pour former des liaisons qui entravent le mouvement des particules [109], limitant ainsi la maniabilité du matériau.

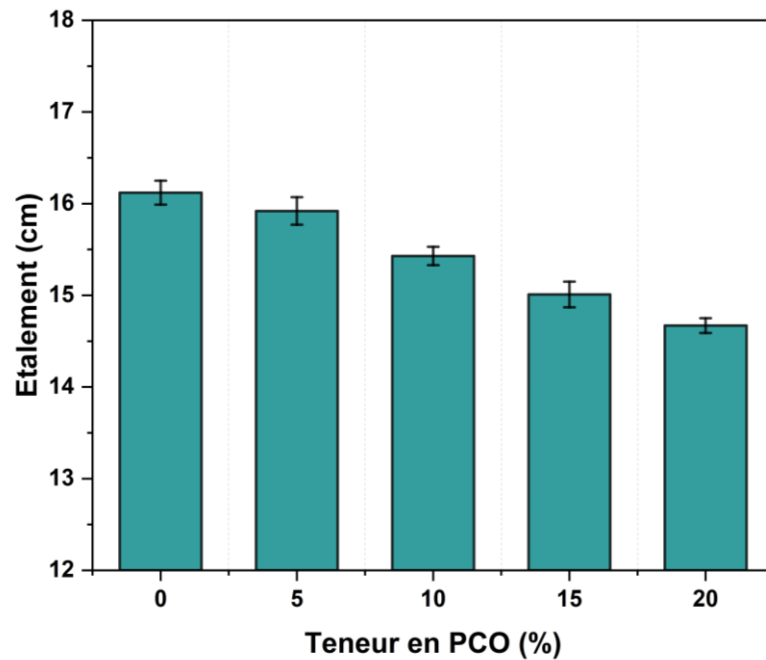


Figure 26 Effet de la PCO sur l'étalement

4.2.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs

En ce qui concerne l'effet combiné de la PC et de la PCO (Figure 27), les mélanges ternaires révèlent une interaction complexe entre ces deux matériaux substitutifs. Bien que la présence de PC contribue à maintenir un étalement légèrement supérieur par rapport aux mélanges contenant uniquement de la PCO, l'effet dominant de la PCO sur la viscosité du mélange devient plus prononcé avec des proportions plus élevées de PCO.

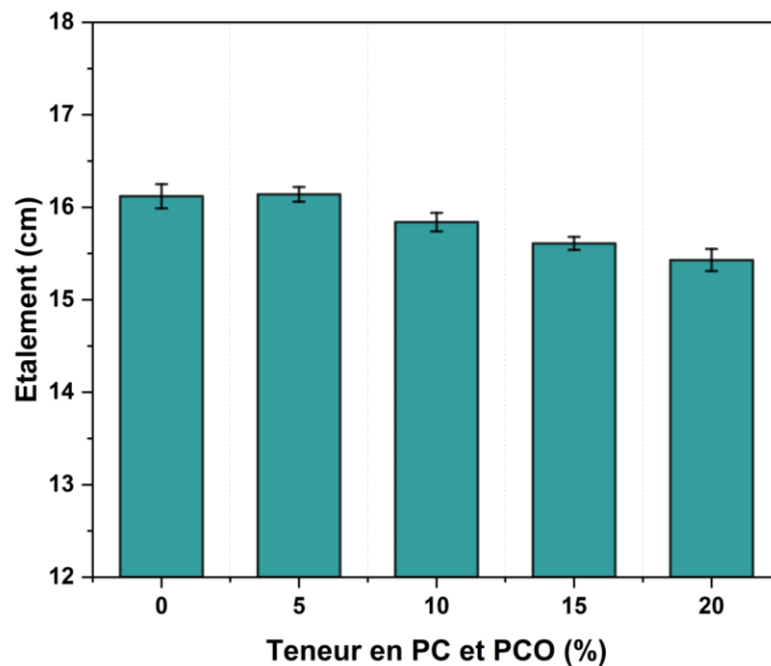


Figure 27 Effet combiné de la PC et PCO sur l'étalement

L'étalement augmente légèrement de 16,12 cm sans substitution à 16,14 cm pour un mélange contenant 5 % de PC et PCO, avant de diminuer de manière linéaire jusqu'à atteindre 15,43 cm avec un taux de substitution de 20 %. Cette diminution de l'étalement représente une réduction significative de 6 % par rapport au mélange binaire (LHF+PC) à 20 % de PC. Ces résultats mettent en évidence l'influence prédominante de la poudre de coquilles d'œufs sur la maniabilité du composite géopolymère lorsque sa proportion dans le mélange est augmentée.

L'observation d'une diminution continue de l'étalement avec l'augmentation de la proportion de PCO indique que les effets de la PCO sur la viscosité et la réactivité chimique prédominent sur les effets positifs de la PC en termes de maniabilité.

4.3. Résistance mécanique

Pour évaluer la résistance mécanique des mélanges géopolymères, nous avons réalisé des essais de compression sur des échantillons à différentes périodes de durcissement (7 et 28 jours). Les résultats obtenus fournissent des indications précieuses sur l'influence de la substitution du LHF par la PC et la PCO sur les propriétés mécaniques du matériau.

4.3.1. Effet de la poudre de céramique

Les résultats des essais de compression (Figure 28) révèlent une évolution complexe de la résistance mécanique en fonction du pourcentage de substitution de la PC dans les mélanges géopolymères. À 7 jours de durcissement, nous observons une légère diminution de la résistance à la compression à mesure que le pourcentage de PC augmente, passant de 41,19 MPa à 5 % de PC à 39,14 MPa à 20 % de PC. Cette diminution initiale peut être attribuée à la dilution du LHF et à une potentielle réduction de la teneur en calcium. Cependant, à 28 jours, les résultats montrent une tendance inverse avec une augmentation significative de la résistance. À 15 % de PC, la résistance atteint 87,03 MPa, dépassant même celle du mélange contrôle à 100 % de LHF (75,6 MPa à 28 jours).

Cette amélioration de la résistance à long terme est cohérente avec la nature chimique de la PC, riche en dioxyde de silicium (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3). La présence accrue de SiO_2 et Al_2O_3 réduit le ratio Ca/Si dans le mélange, favorisant ainsi la formation de gels C-A-S-H (calcium-alumino-silicate hydraté) responsables de la résistance du mortier géopolymère [108]. Ces gels sont des phases clés contribuant à la cohésion et à la force du matériau. Par conséquent, à mesure que le pourcentage de PC augmente, la quantité de gels C-A-S-H produite augmente également, renforçant ainsi la structure du composite géopolymère au fil du temps.

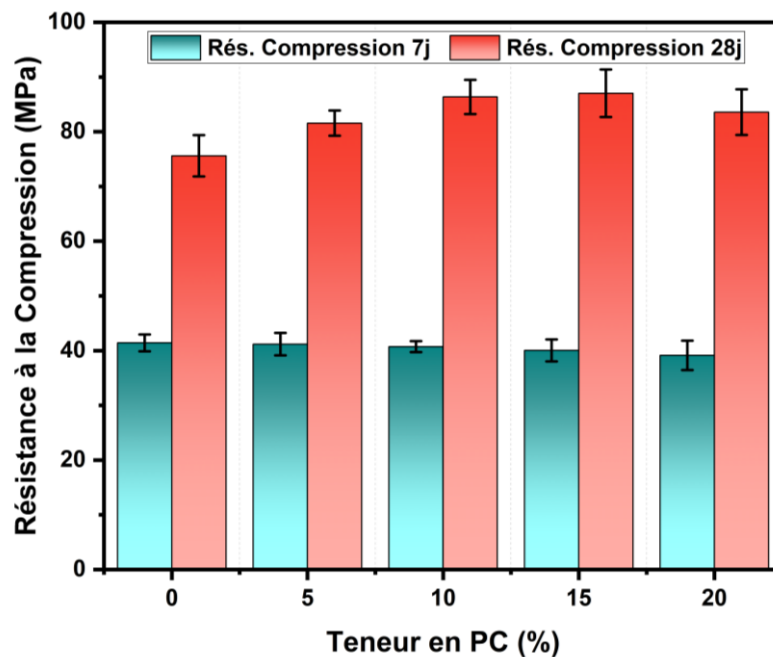


Figure 28 Effet de la PC sur la résistance à la compression

4.3.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs

L'incorporation de la PCO dans les mélanges géopolymères montre des variations significatives dans la résistance mécanique à différentes périodes de durcissement (Figure 29). À 7 jours de durcissement, les valeurs de résistance à la compression augmentent avec l'augmentation du pourcentage de PCO, passant de 40,57 MPa à 5 % de PCO à 43,83 MPa à 20 % de PCO. Cette tendance à la hausse initiale à court terme peut être attribuée à la teneur en CaO (oxyde de calcium) de la PCO, qui favorise la production de gels de silicate de calcium hydraté (C-S-H), contribuant ainsi à la résistance mécanique du mortier géopolymère dans les premiers stades de durcissement.

Cependant, à 28 jours, les résultats montrent une diminution progressive de la résistance avec l'augmentation de la PCO, passant de 78,26 MPa à 5 % de PCO à seulement 68,15 MPa à 20 % de PCO. Cette diminution de la résistance à long terme peut être expliquée par l'augmentation du ratio Ca/Si dans le mélange à mesure que la PCO réagit davantage avec les alcalis présents. Un ratio Ca/Si élevé peut limiter la formation de gels C-A-S-H qui sont essentiels pour la résistance à long terme [109] [110]. Au lieu de former ces gels bénéfiques, la réaction accrue entre le carbonate de calcium de la PCO et les alcalis peut conduire à la formation de produits secondaires moins bénéfiques pour la résistance du matériau, entraînant ainsi une diminution de la résistance finale.

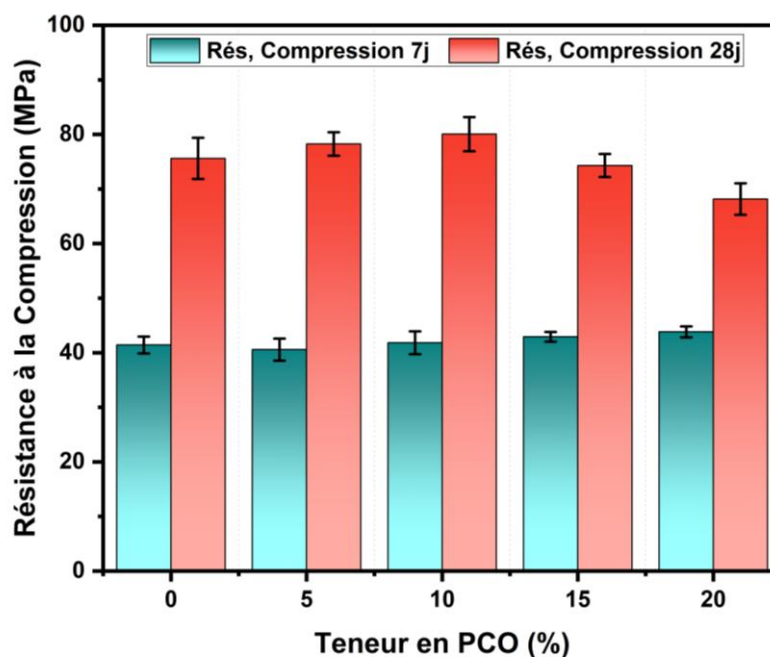


Figure 29 Effet de la PCO sur la résistance à la compression

Ces observations mettent en évidence l'importance de prendre en compte les interactions chimiques complexes entre la PCO et les autres composants du mélange géopolymère, en particulier à long terme. Bien que la PCO puisse initialement améliorer la résistance à court terme en favorisant la production de certains gels hydratés, sa réactivité à long terme peut avoir des effets néfastes sur la résistance mécanique globale du mortier géopolymère. Ainsi, l'optimisation du pourcentage de substitution de la PCO dans les mélanges géopolymères doit tenir compte des compromis entre les performances à court terme et à long terme du matériau.

4.3.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs

L'analyse approfondie des mélanges ternaires combinant la PC et la PCO révèle des tendances complexes dans l'évolution de la résistance mécanique à différentes périodes de durcissement (Figure 30). À 7 jours de durcissement, les valeurs de résistance à la compression montrent une certaine stabilité (autour de 41 MPa), mais avec des variations subtiles en fonction du pourcentage de PC et PCO. Cette période initiale est caractérisée par l'interaction synergique entre les propriétés réactives de la PCO et les effets à plus long terme de la PC sur la formation des phases hydratées et la densification du matériau.

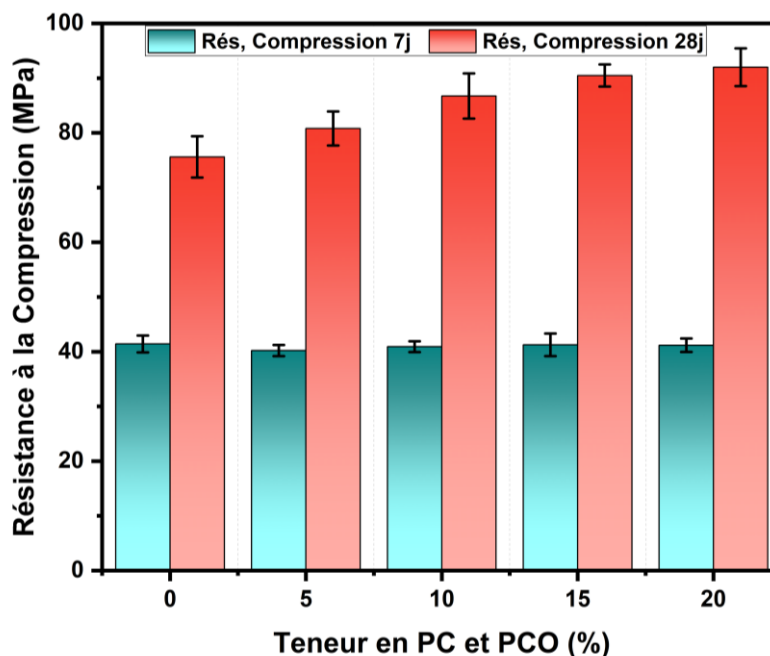


Figure 30 Effet combiné de la PC et la PCO sur la résistance à la compression

Cependant, à 28 jours, les mélanges ternaires démontrent une augmentation significative de la résistance, indiquant une évolution positive avec le temps de durcissement. Les valeurs de résistance à 28 jours sont particulièrement remarquables, allant de 80,8 MPa à 5 % de PC+PCO à 92 MPa à 20 % de PC+PCO. Cette amélioration notable de la résistance à long terme peut être attribuée à plusieurs mécanismes complémentaires.

La PC, riche en dioxyde de silicium (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3), joue un rôle crucial dans la formation de gels C-A-S-H qui contribuent à la cohésion et à la résistance mécanique du composite géopolymère à long terme. Ces gels se forment par réaction entre les composants réactifs de la PC et les alcalis présents dans la matrice géopolymère, renforçant ainsi la structure du matériau au fil du temps. La présence accrue de SiO_2 et Al_2O_3 dans la PC favorise également la densification du matériau, réduisant ainsi les vides et les défauts internes [111], ce qui contribue à améliorer la résistance mécanique. D'autre part, la PCO, grâce à sa teneur en oxyde de calcium (CaO), favorise la formation initiale de gels C-S-H qui améliorent la résistance du béton géopolymère à court terme. Le CaO réagit avec l'eau présente dans le mélange pour former des liaisons chimiques précoces, augmentant ainsi la résistance initiale du matériau. Cependant, à mesure que le temps de durcissement progresse jusqu'à 28 jours, l'optimisation du ratio Ca/Si dans le mélange ternaire peut booster la capacité de créer les gels C-A-S-H à long terme, conduisant éventuellement à l'amélioration de la résistance.

4.4. Masse volumique

L'analyse détaillée de la masse volumique des mélanges géopolymères met en lumière des tendances significatives influencées par les pourcentages de substitution de la PC et de la PCO dans les formulations. Les résultats obtenus révèlent des variations quantitatives importantes qui peuvent avoir des implications directes sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux.

4.4.1. Effet de la poudre de céramique

En examinant les mélanges contenant de la PC (Figure 31), nous constatons des variations légères mais discernables de la masse volumique par rapport au contrôle (100% LHF). Les mélanges avec une substitution allant jusqu'à 20% de PC montrent une légère diminution de la masse volumique par rapport au contrôle (2425 kg/m^3 vs 2430 kg/m^3), suggérant une influence modérée de la PC sur la densité des mélanges géopolymères. Cette

diminution peut être attribuée à la nature légèrement moins dense de la PC par rapport au laitier de haut fourneau (LHF), ainsi qu'à son effet sur la compacité et la structure des mélanges.

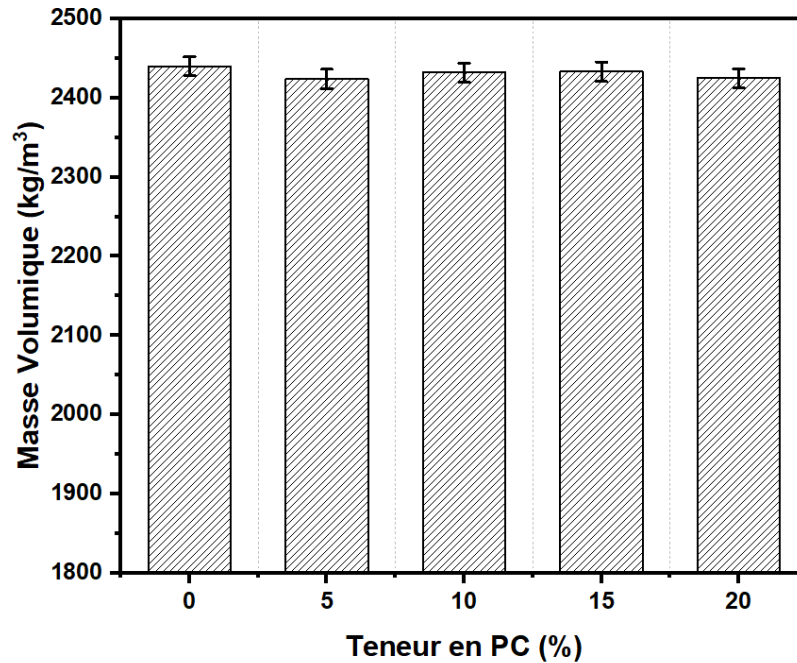


Figure 31 Effet de la PC sur la masse volumique

4.4.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs

D'autre part, l'incorporation de la PCO dans les mélanges (LHF + PCO) présente des effets plus marqués sur la masse volumique (Figure 32). Les mélanges avec des pourcentages plus élevés de PCO montrent des valeurs de masse volumique plus faibles (allant de 2430 kg/m³ à 0%PCO jusqu'à 2391 kg/m³ à 20% de substitution), indiquant une diminution densité globale plus basse des matériaux. Cette baisse de la masse volumique peut être associée à la nature plus légère de la PCO, qui contient principalement du carbonate de calcium. La présence de PCO peut également influencer la compacité du matériau en modifiant la distribution des particules et en affectant la structure poreuse des mélanges géopolymères.

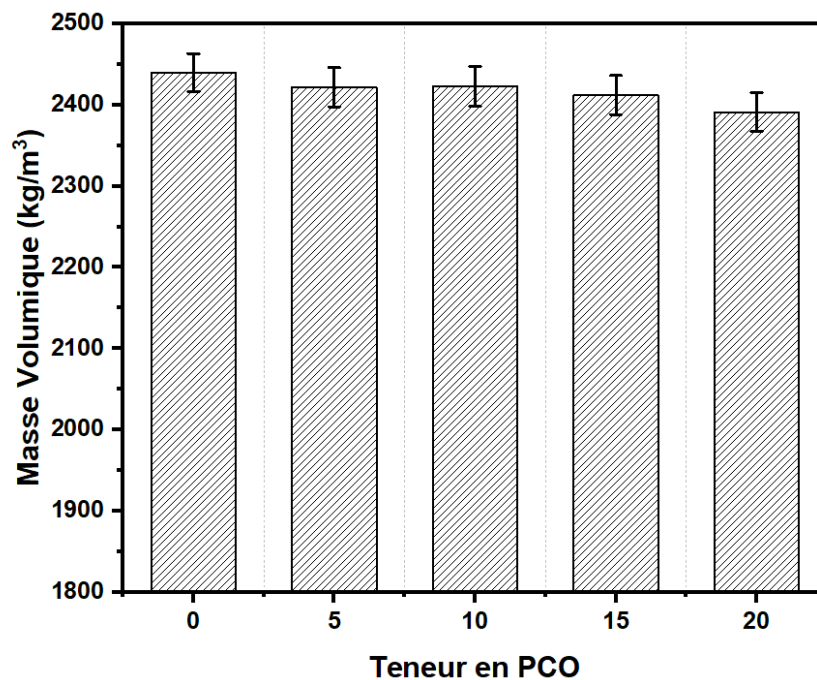


Figure 32 Effet de la PCO sur la masse volumique

4.4.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs

Enfin, les mélanges ternaires (LHF + PC + PCO) montrent des tendances intéressantes où les valeurs de masse volumique tendent à augmenter avec l'augmentation des pourcentages de substitution (Figure 33). La masse volumique atteint 2444 kg/m^3 à 20% de substitution indiquant une augmentation de la densité globale du matériau.

Cette augmentation peut être attribuée à l'effet combiné des deux matériaux de substitution (PC et PCO) sur la densité et la compacité des mélanges. La PC contribue à densifier le matériau tandis que la PCO, malgré sa masse volumique plus faible, interagit avec la matrice géopolymère pour produire des gels de C-S-H denses qui vont influencer positivement la compacité et la résistance du matériau final.

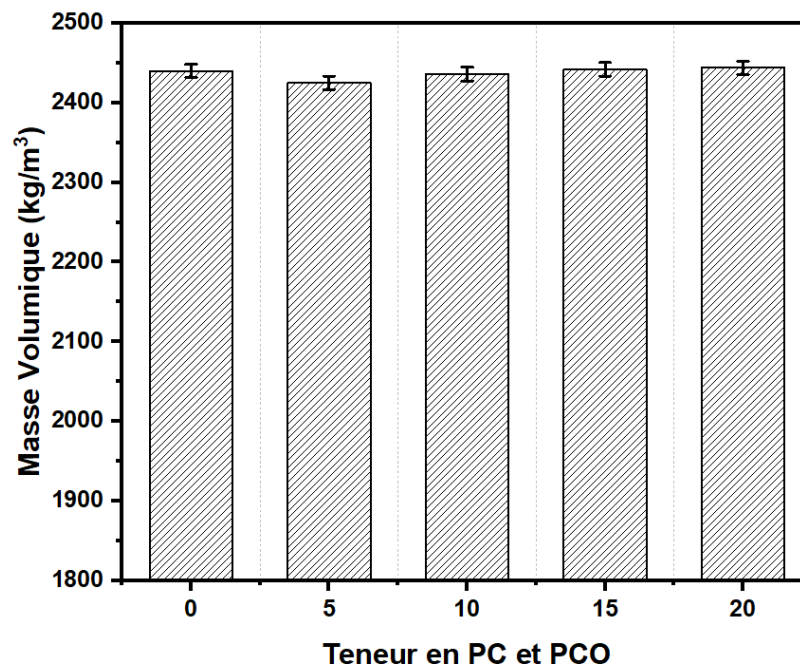


Figure 33 Effet combiné de la PC et la PCO sur la masse volumique

4.5. Porosité accessible à l'eau

L'essai de porosité accessible à l'eau fournit des données cruciales sur la perméabilité et la compacité des mélanges géopolymères incorporant de la PC, de la PCO ou une combinaison des deux. Les valeurs de porosité exprimées en pourcentage montrent des variations significatives en fonction des proportions de substitution utilisées.

4.5.1. Effet de la poudre de céramique

L'incorporation de la PC dans les mélanges géopolymères conduit à une réduction de la porosité par rapport au contrôle (Figure 34). La porosité diminue avec l'augmentation de la teneur en PC de 17.73% à 0% de substitution jusqu'à 16.35% à 20% de substitution. Cette observation s'explique par les propriétés réactives de la PC, notamment sa teneur en dioxyde de silicium et en alumine, qui favorisent la formation de gels C-A-S-H. Ces gels contribuent à densifier la matrice géopolymère en remplissant les vides et en renforçant la cohésion du matériau. De plus, la PC agit comme un liant hydraulique alternatif au LHF, ce qui réduit la porosité globale des mélanges géopolymères.

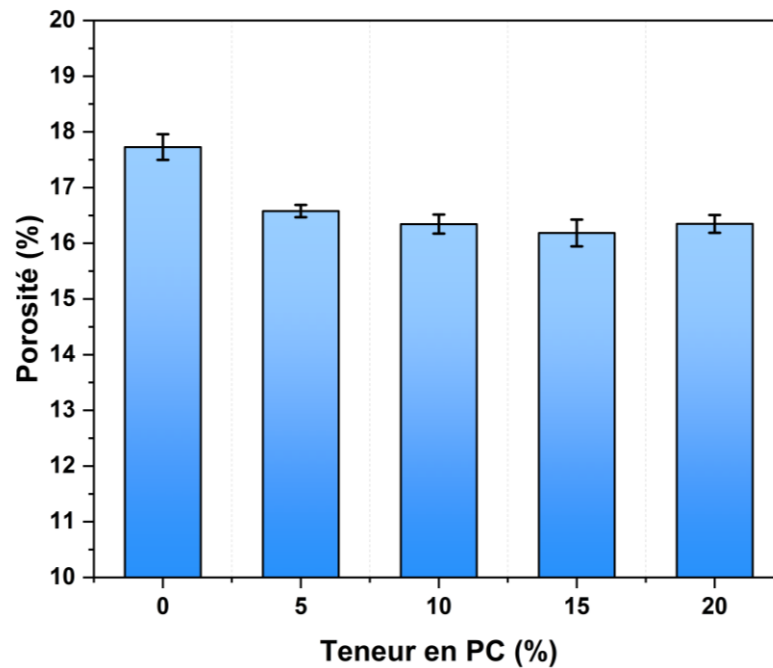


Figure 34 Effet de la PC sur la porosité

4.5.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs

Lors de l'incorporation de la PCO dans les mélanges géopolymères, on observe une légère diminution de la porosité jusqu'à un taux de substitution de 10% (de 17.73% à 17.53%). Cependant, au-delà de ce seuil, la porosité commence à augmenter de manière significative pour atteindre 19.11% à 20% de substitution (Figure 35).

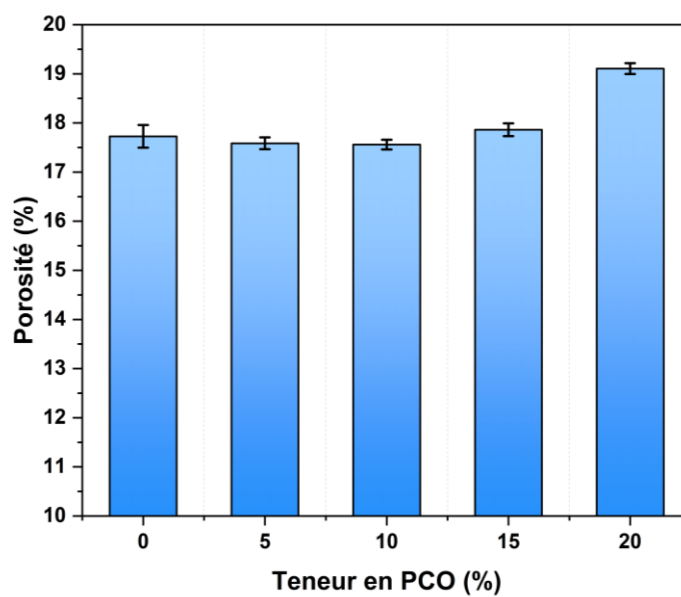


Figure 35 Effet de la PCO sur la porosité

Ces résultats démontrent que l'incorporation initiale de PCO jusqu'à 10% dans les mélanges géopolymères conduit à une légère réduction de la porosité, ce qui peut être attribué à la réactivité de la PCO avec la solution alcaline et sa capacité à contribuer à la formation de produits de réaction hydratés. Cependant, au-delà de 10% de substitution, la tendance s'inverse, probablement en raison de l'accumulation excessive de particules de PCO qui peuvent entraîner une plus grande porosité et une diminution de la compacité du matériau.

4.5.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs

L'analyse des mélanges ternaires (LHF + PC + PCO) révèle des variations intéressantes de la porosité en fonction des proportions combinées de PC et de PCO. Les résultats de la porosité, exprimés en pourcentage, montrent une tendance générale à réduire la porosité par rapport au contrôle (Figure 36).

Les mélanges ternaires présentent des valeurs de porosité relativement basses, indiquant une amélioration de la compacité et de la densité du matériau par rapport aux mélanges contenant uniquement de la PCO. Les valeurs de la porosité sont diminuées de 17.73% pour le mélange contrôle à 15.97% pour le mélange ternaire à 20% de substitution, indiquant une chute de 11%.

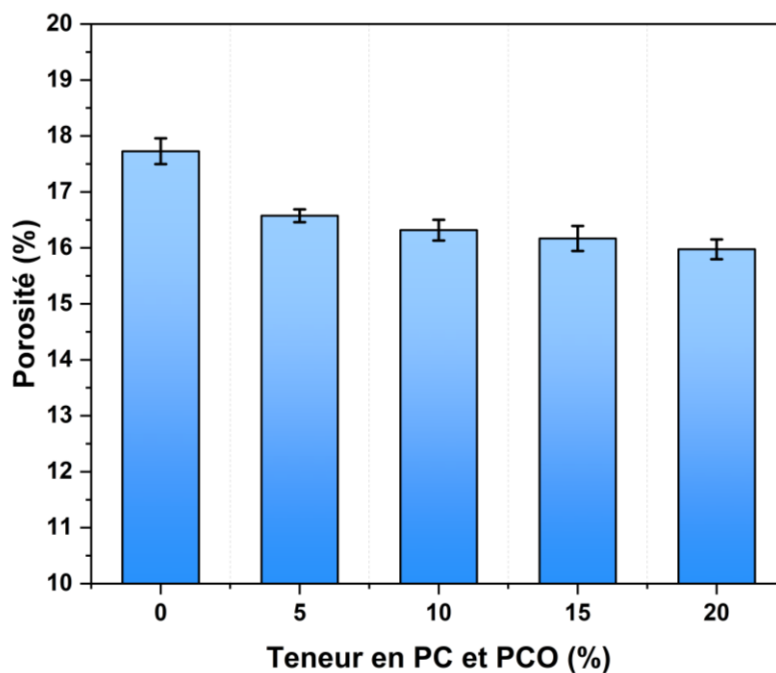


Figure 36 Effet combiné de la PC et la PCO sur la porosité

Cette réduction de la porosité peut être attribuée à l'effet synergique de la PC et de la PCO sur la structure et la cohésion des mélanges géopolymères. Plus précisément, les mélanges ternaires montrent une porosité réduite même à des niveaux élevés de substitution, ce qui suggère que la combinaison de PC et PCO contribue efficacement à densifier le matériau et à remplir les vides. La réduction de la porosité observée dans les mélanges ternaires peut être favorisée par la capacité des substituants à former des gels C-A-S-H qui renforcent la matrice géopolymère.

4.6. Analyse d'impulsion ultrasonique

L'analyse de l'impulsion ultrasonique constitue une méthode non destructive puissante pour évaluer la qualité et l'intégrité des matériaux géopolymères. Cette technique permet d'obtenir des informations détaillées sur la structure interne des échantillons, notamment la compacité, la cohésion et les propriétés acoustiques.

4.6.1. Effet de la poudre de céramique

L'analyse de l'impulsion ultrasonique révèle des résultats significatifs sur la vitesse d'impulsion dans les mélanges géopolymères lors de la substitution par la PC (Figure 37), offrant des insights précieux sur la structure interne et les propriétés acoustiques des matériaux.

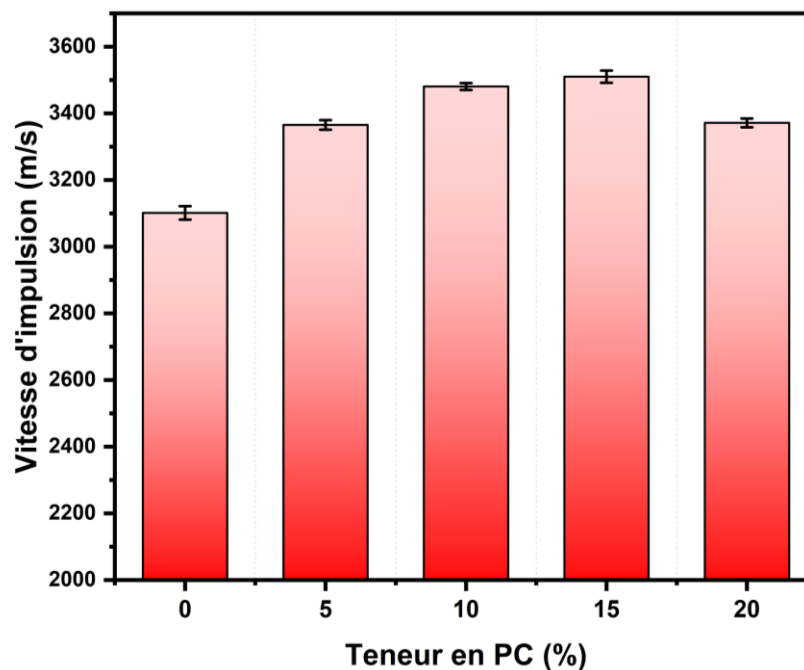


Figure 37 Effet de la PC sur la vitesse d'impulsion

Initialement, la valeur de la vitesse d'impulsion pour le mélange contrôle (100% LHF) est mesurée à 3101,27 m/s. L'incorporation progressive de la PC dans les mélanges géopolymères conduit à une augmentation régulière de la vitesse d'impulsion, atteignant un pic remarquable de 3510 m/s à 15% de substitution par la PC. Cette augmentation de la vitesse d'impulsion peut être attribuée à la formation accrue de liaisons solides entre la PC et la matrice géopolymère, renforçant ainsi la cohésion interne du matériau. La PC, riche en silice et alumine, contribue à la formation de gels C-A-S-H qui densifient la structure et augmentent la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.

Cependant, au-delà de 15% de substitution par la PC (20% de PC), la vitesse d'impulsion montre une légère diminution à 3371 m/s. Cette diminution peut être le résultat d'une sur-substitution de PC, entraînant une dispersion moins uniforme dans la matrice géopolymère. Un excès de PC peut potentiellement créer des zones moins homogènes dans le matériau [112], affectant négativement les propriétés acoustiques en réduisant la cohésion et en introduisant des interfaces non idéales pour la propagation des ondes ultrasoniques.

4.6.2. Effet de la poudre des coquilles d'œufs

L'analyse de l'impulsion ultrasonique révèle des variations significatives de la vitesse d'impulsion dans les mélanges géopolymères lors de la substitution par la PCO (Figure 38), mettant en lumière l'impact de ce matériau sur les propriétés acoustiques et la cohésion interne des matériaux.

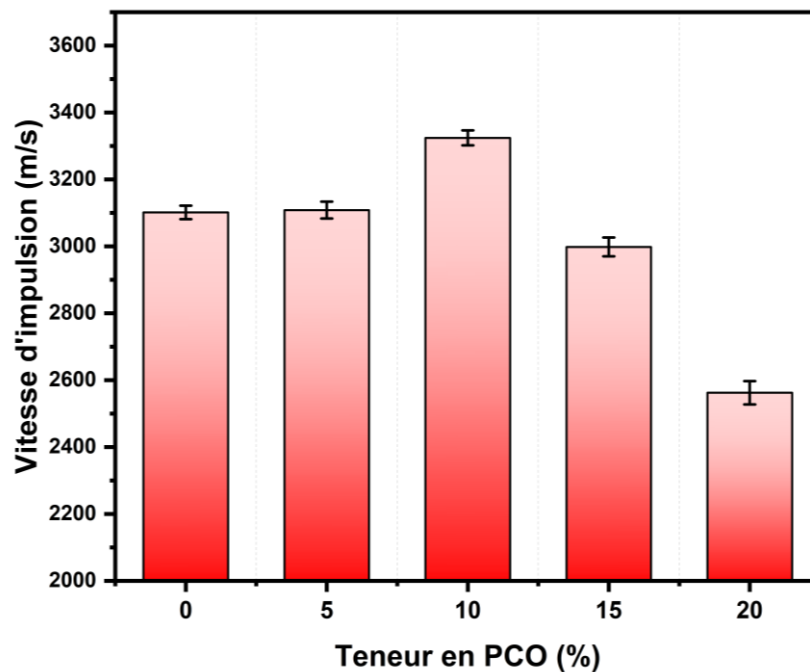


Figure 38 Effet de la PCO sur la vitesse d'impulsion

Initialement, la substitution par la PCO entraîne une augmentation de la vitesse d'impulsion, atteignant un pic à 3324 m/s avec 10% de PCO. Cette augmentation initiale peut être attribuée à la réactivité de la PCO avec la solution alcaline, favorisant la formation de liaisons et de produits de réaction qui renforcent la cohésion du matériau. Cependant, au-delà de ce seuil, la vitesse d'impulsion diminue progressivement, atteignant 2998 m/s à 15% de PCO et 2562 m/s à 20% de PCO. Cette diminution peut résulter d'une sur-substitution de PCO, entraînant une dispersion excessive de particules qui compromet la compacité et la cohésion du matériau.

La diminution de la vitesse d'impulsion avec des niveaux plus élevés de substitution par la PCO peut également être associée à la composition chimique de la PCO, principalement à base de carbonate de calcium (CaCO_3). L'excès de PCO peut introduire des vides et des espaces interstitiels dans la matrice géopolymère [109], créant ainsi des interfaces non idéales pour la propagation des ondes ultrasoniques.

4.6.3. Effet combiné de la poudre de céramique et la poudre des coquilles d'œufs

L'analyse de l'impulsion ultrasonique révèle des tendances intéressantes dans la vitesse d'impulsion des mélanges géopolymères lors de la substitution combinée par la PC) et la PCO

(Figure 39), mettant en évidence l'effet synergique de ces deux matériaux sur les propriétés acoustiques des matériaux.

Les résultats montrent une augmentation progressive de la vitesse d'impulsion avec l'augmentation du taux de substitution combiné de PC et PCO. À 20% de substitution combinée, la vitesse d'impulsion atteint un pic notable de 3582 m/s. Cette augmentation de la vitesse d'impulsion peut être attribuée à l'interaction complexe entre la PC et la PCO, où la combinaison de ces deux matériaux contribue à améliorer la cohésion et la compacité de la matrice géopolymère.

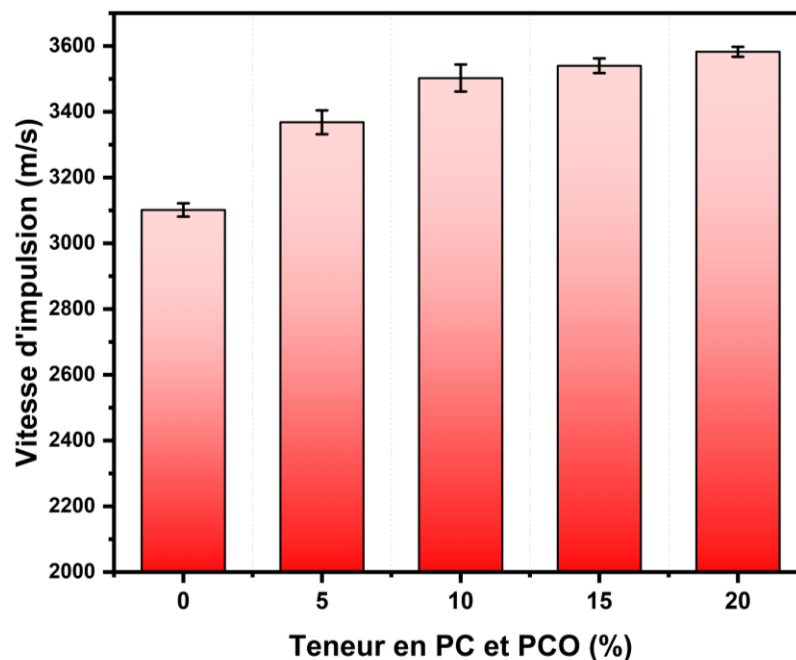


Figure 39 Effet combiné de la PC et la PCO sur la vitesse d'impulsion

La PC, grâce à sa composition riche en silice et alumine, joue un rôle crucial dans le processus de géopolymérisation. Lorsqu'elle est incorporée dans les mélanges géopolymères, la PC réagit avec la solution alcaline, issue des activateurs, pour former des gels C-A-S-H. Ces gels sont des phases amorphes et polymériques qui se forment en réaction avec les ions calcium présents dans la solution alcaline. Les gels C-A-S-H contribuent à renforcer la structure interne du matériau en remplissant les vides et en créant des liaisons chimiques solides entre les particules, ce qui améliore la cohésion et la résistance mécanique du composite géopolymère.

D'autre part, la PCO réagit également avec la solution alcaline pour former des liaisons solides dans le matériau géopolymère. La PCO est principalement composée de carbonate de calcium, qui réagit avec la silice et les ions hydroxyde (OH-) présents dans la solution alcaline pour former du carbonate de calcium hydraté (C-S-H). Cette réaction contribue à la densification du matériau en comblant les pores et en consolidant la structure géopolymère.

Ainsi, l'effet combiné de la PC et de la PCO dans les mélanges géopolymères est bénéfique car ces deux matériaux agissent de manière synergique pour renforcer la matrice géopolymère. La PC favorise la formation de gels C-A-S-H, tandis que la PCO contribue à la densification et à l'amélioration des propriétés mécaniques du matériau.

4.7. Relation entre la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression

Dans cette section, nous avons examiné la relation entre la vitesse d'impulsion ultrasonique (x) et la résistance à la compression (y) des mélanges géopolymères. Une droite de régression linéaire a été tracée à partir des données expérimentales, représentant la relation entre ces deux paramètres (Figure 40).

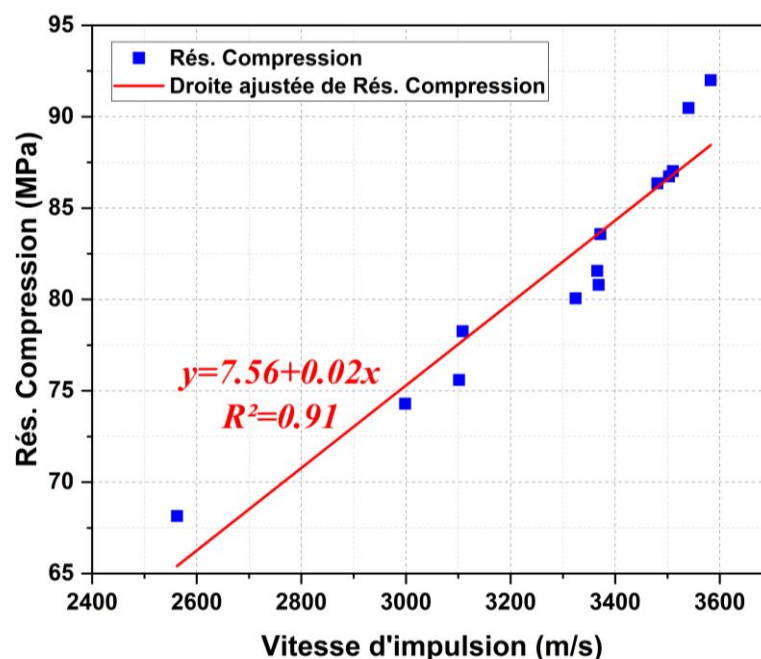


Figure 40 Relation entre la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression des mélanges confectionnés

La forme de la relation linéaire est exprimée par l'équation (Eq. 1) :

$$y = 7.56 + 0.02x \quad \text{Eq. 1}$$

Où

y : représente la résistance à la compression en MPa

x : est la vitesse d'impulsion ultrasonique en m/s.

Le coefficient de détermination R^2 associé à cette relation est de 0.91, indiquant une forte corrélation entre la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression des mélanges géopolymères.

Cette relation linéaire suggère que des valeurs plus élevées de vitesse d'impulsion ultrasonique sont associées à des résistances à la compression plus élevées. En d'autres termes, une augmentation de la vitesse d'impulsion ultrasonique est corrélée positivement avec une augmentation de la résistance à la compression des mélanges géopolymères. Cette corrélation peut être expliquée par le lien entre la compacité, la cohésion et la qualité de la matrice géopolymère, qui influencent à la fois la propagation des ondes ultrasoniques et la résistance mécanique du matériau.

Les résultats de cette analyse suggèrent que la vitesse d'impulsion ultrasonique peut être utilisée comme indicateur indirect de la résistance à la compression des mélanges géopolymères. Cette relation pourrait être exploitée dans des applications pratiques pour évaluer rapidement et d'une manière non destructive la qualité et les performances mécaniques des matériaux géopolymères dans diverses applications de génie civil et de construction.

4.8. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, les mélanges géopolymères développés à base de poudre de céramique (PC) et de poudre de coquilles d'œufs (PCO) ont démontré des performances prometteuses en termes de maniabilité, de résistance mécanique, de densité et de cohésion structurale. La substitution partielle du laitier de haut fourneau (LHF) par la PC et la PCO a permis d'améliorer diverses propriétés des mélanges géopolymères.

Les résultats montrent des variations significatives en fonction des proportions de substitution, soulignant l'importance d'optimiser les formulations pour atteindre les

performances désirées. En particulier, l'analyse de l'impulsion ultrasonique a révélé une corrélation notable entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression, offrant ainsi un potentiel d'utilisation de cette méthode comme outil de contrôle de la qualité des mélanges géopolymères.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire explore le potentiel des éco-bétons géopolymères à base de poudre de déchets de céramique et de coquilles d'œufs comme alternatives durables aux bétons traditionnels. L'objectif principal était de développer des mélanges géopolymères innovants en substituant partiellement le laitier de haut fourneau (LHF) par la poudre de céramique (PC) et la poudre de coquilles d'œufs (PCO), tout en évaluant leurs performances mécaniques, leur maniabilité et leur durabilité.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Les déchets de céramique et les coquilles d'œufs ont été caractérisés pour évaluer leur composition chimique et leurs propriétés physiques en vue de leur utilisation comme substituts dans les mélanges géopolymères. La PC s'est avérée riche en silice et alumine, tandis que la PCO contenait principalement du carbonate de calcium.
- La substitution de PC et PCO a influencé les propriétés mécaniques des mélanges géopolymères. Des taux optimaux de substitution ont été identifiés, conduisant à des améliorations significatives de la résistance à la compression tout en préservant la maniabilité des mélanges.
- Les mélanges géopolymères ont présenté des variations de masse volumique et de porosité en fonction des proportions de substitution. Des niveaux élevés de substitution de PCO ont entraîné une réduction de la masse volumique et une augmentation de la porosité, affectant la densité et la compacité des matériaux.
- L'analyse de l'impulsion ultrasonique a révélé une corrélation positive entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression des mélanges géopolymères. Cette relation pourrait être utilisée comme indicateur indirect de la qualité et des performances mécaniques des matériaux.

En résumé, les éco-bétons géopolymères à base de déchets de céramique et de coquilles d'œufs offrent des perspectives intéressantes pour le développement de matériaux de construction durables. Cependant, des ajustements précis des proportions de substitution et une optimisation des formulations sont nécessaires pour maximiser les performances des mélanges géopolymères.

Sur la base des résultats obtenus, voici quelques recommandations pour la mise en œuvre pratique des éco-bétons géopolymères à base de déchets de céramique et de coquilles d'œufs :

- Continuer à explorer différentes proportions de substitution de PC et PCO pour optimiser les performances mécaniques, la maniabilité et la durabilité des mélanges géopolymères. Des études approfondies sur l'interaction entre ces matériaux sont nécessaires pour identifier les combinaisons les plus efficaces.
- Évaluer la durabilité à long terme des éco-bétons géopolymères en analysant leur résistance aux cycles de gel-dégel, aux attaques acides et à d'autres facteurs environnementaux. Une analyse approfondie des propriétés à long terme contribuera à valider leur performance dans des conditions réelles.
- Collaborer avec l'industrie de la construction pour tester et déployer les éco-bétons géopolymères dans des projets pilotes. Promouvoir l'utilisation de ces matériaux durables dans les pratiques de construction pour réduire l'impact environnemental du secteur.
- Encourager la recherche continue sur les géopolymères et les matériaux de substitution à base de déchets pour développer des solutions innovantes et durables dans le domaine de la construction. Explorer de nouvelles applications et formulations pour répondre aux besoins spécifiques des projets de construction durable.

En mettant en œuvre ces recommandations, il sera possible de progresser vers une utilisation plus répandue des éco-bétons géopolymères, contribuant ainsi à promouvoir le développement durable et la conservation des ressources naturelles dans l'industrie de la construction.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] J. Davidovits, « Geopolymers: inorganic polymeric new materials », *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, vol. 37, n° 8, p. 1633-1656, 1991.
- [2] J. Davidovits, « Geopolymer chemistry and applications: Saint-Quentin », 2011.
- [3] J. Davidovits, « Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition », *J. Davidovits.–Saint-Quentin, France*, vol. 5, 2020.
- [4] B. V. Rangan, « Fly ash-based geopolymer concrete », 2008.
- [5] T. Glasby, J. Day, R. Genrich, et J. Aldred, « EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport », *Concrete*, vol. 2015, p. 1-9, 2015.
- [6] P. Krivenko, « Why alkaline activation—60 years of the theory and practice of alkali-activated materials », *J. Ceram. Sci. Technol*, vol. 8, n° 3, p. 323-334, 2017.
- [7] F. Škvára *et al.*, « Geopolymer concrete-an ancient material too? », *Ceramics–Silikáty*, vol. 52, n° 4, p. 296-298, 2008.
- [8] J. Davidovits, L. Huaman, et R. Davidovits, « Ancient geopolymer in south-American monument. SEM and petrographic evidence », *Materials Letters*, vol. 235, p. 120-124, 2019.
- [9] J. Davidovits et S. Cordi, « Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites », *Spe Pactec*, vol. 79, p. 151-154, 1979.
- [10] H. Kuehl, « Slag cement and process of making the same », *Brevet US A*, vol. 900939, p. 1907, 1907.
- [11] M. Lizcano, H. S. Kim, S. Basu, et M. Radovic, « Mechanical properties of sodium and potassium activated metakaolin-based geopolymers », *Journal of Materials Science*, vol. 47, p. 2607-2616, 2012.
- [12] F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad, A. Camões, M. Jamshidi, et Y. Ding, « Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue? », *Construction and Building Materials*, vol. 30, p. 400-405, 2012.
- [13] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, et J. S. van Deventer, « Geopolymer technology: the current state of the art », *Journal of materials science*, vol. 42, p. 2917-2933, 2007.
- [14] M. Zerzouri, « Faisabilité d'élaboration des poudres pré-géopolymères par mécanosynthèse: caractérisation physico-chimique et application aux pâtes, mortiers et enrobés bitumineux », 2021.
- [15] V. Glukhovskii, I. Pashkov, E. Starchevskaya, et G. Rostovskaya, « Soil-silicate concrete for hydraulic and irrigation structures », *Hydrotechnical Construction*, vol. 1, n° 2, p. 120-124, 1967.

- [16] J. L. Provis et S. A. Bernal, « Binder chemistry–blended systems and intermediate Ca content », in *Alkali activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*, Springer, 2013, p. 125-144.
- [17] J. L. Provis, G. C. Lukey, et J. S. Van Deventer, « Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results », *Chemistry of materials*, vol. 17, n° 12, p. 3075-3085, 2005.
- [18] J. Davidovits, « Environmentally driven geopolymer cement applications », présenté à Proceedings of 2002 Geopolymer Conference. Melbourne. Australia, 2002.
- [19] A. Autef, E. Prud'Homme, E. Joussein, G. Gasgnier, S. Pronier, et S. Rossignol, « Evidence of a gel in geopolymer compounds from pure metakaolin », *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 67, p. 534-544, 2013.
- [20] P. Duxson et J. L. Provis, « Designing precursors for geopolymer cements », *Journal of the american ceramic society*, vol. 91, n° 12, p. 3864-3869, 2008.
- [21] R. Siddique et M. I. Khan, *Supplementary cementing materials*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [22] K. Jafari et F. Rajabipour, « Performance of impure calcined clay as a pozzolan in concrete », *Transportation Research Record*, vol. 2675, n° 2, p. 98-107, 2021.
- [23] S. Kosmatka, B. Kerckhoff, et W. Panarese, « Fly ash, slag, silica fume, and natural pozzolans », *Design and control of concrete mixtures*, vol. 13, p. 57-72, 2002.
- [24] P. De Silva et K. Sagoe-Crenstil, « Medium-term phase stability of Na₂O–Al₂O₃–SiO₂–H₂O geopolymer systems », *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 6, p. 870-876, 2008.
- [25] Q. Wan, F. Rao, et S. Song, « Reexamining calcination of kaolinite for the synthesis of metakaolin geopolymers-roles of dehydroxylation and recrystallization », *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 460, p. 74-80, 2017.
- [26] C. Houzé, « Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganèse », 2013.
- [27] F. Jacquemot, « Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton », 2014.
- [28] A. Gharzouni, « Contrôle de l'attaque des sources aluminosilicates par la compréhension des solutions alcalines », 2016.
- [29] Jgs. van Jaarsveld et J. Van Deventer, « Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers », *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 38, n° 10, p. 3932-3941, 1999.
- [30] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, et P. Chindaprasirt, « Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste », *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, p. 9-14, 2014.

- [31] A. C. El Idrissi, « Géopolymérisation et activation alcaline des coulis d'injection: structuration, micromécanique et résistance aux sollicitations physico-chimiques », 2016.
- [32] J. Aupoil, « Etude des mécanismes de dissolution/polycondensation lors de la géopolymérisation: réactivité du métakaolin et influence de la solution d'activation », 2019.
- [33] A. Palomo, M. Grutzeck, et M. Blanco, « Alkali-activated fly ashes: A cement for the future », *Cement and concrete research*, vol. 29, n° 8, p. 1323-1329, 1999.
- [34] H. Xu et J. Van Deventer, « The geopolymerisation of alumino-silicate minerals », *International journal of mineral processing*, vol. 59, n° 3, p. 247-266, 2000.
- [35] A. Fernández-Jimenez, A. De La Torre, A. Palomo, G. López-Olmo, M. Alonso, et M. Aranda, « Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity », *Fuel*, vol. 85, n° 5-6, p. 625-634, 2006.
- [36] P. Duxson, « The structure and thermal evolution of metakaolin geopolymers », 2006.
- [37] L. Weng et Kjj. Sagoe-Crentsil, « Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I—Low Si/Al ratio systems », *Journal of materials science*, vol. 42, p. 2997-3006, 2007.
- [38] C. A. Rees, *Mechanisms and kinetics of gel formation in geopolymers*. University of Melbourne, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, 2007.
- [39] J. Davidovits, « Properties of geopolymer cements », présenté à First international conference on alkaline cements and concretes, 1994, p. 131-149.
- [40] N. B. Singh et B. Middendorf, « Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview », *Construction and Building Materials*, vol. 237, p. 117455, 2020.
- [41] A. A. Siyal, K. A. Azizli, Z. Man, et H. Ullah, « Effects of parameters on the setting time of fly ash based geopolymers using Taguchi method », *Procedia engineering*, vol. 148, p. 302-307, 2016.
- [42] A. Antoni, S. W. Wijaya, et D. Hardjito, « Factors affecting the setting time of fly ash-based geopolymer », présenté à Materials Science Forum, Trans Tech Publ, 2016, p. 90-97.
- [43] D. Hardjito, C. C. Cheak, et C. H. L. Ing, « Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar », *Modern applied science*, vol. 2, n° 4, p. 3-11, 2008.
- [44] J. Davidovits, « Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement », *Journal of Materials education*, vol. 16, p. 91-91, 1994.
- [45] O. A. Abdulkareem et M. Ramli, « Optimization of alkaline activator mixing and curing conditions for a fly ash-based geopolymer paste system », *Modern Applied Science*, vol. 9, n° 12, p. 61, 2015.
- [46] M. Rowles et B. O'connor, « Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite », *Journal of materials chemistry*, vol. 13, n° 5, p. 1161-1165, 2003.

- [47] P. Sturm, G. Gluth, S. Simon, H. Brouwers, et H.-C. Kühne, « The effect of heat treatment on the mechanical and structural properties of one-part geopolymer-zeolite composites », *Thermochimica acta*, vol. 635, p. 41-58, 2016.
- [48] P. Duan, C. Yan, W. Zhou, W. Luo, et C. Shen, « An investigation of the microstructure and durability of a fluidized bed fly ash–metakaolin geopolymer after heat and acid exposure », *Materials & Design*, vol. 74, p. 125-137, 2015.
- [49] T. Bakharev, « Resistance of geopolymer materials to acid attack », *Cement and concrete research*, vol. 35, n° 4, p. 658-670, 2005.
- [50] F. Škvára, T. Jílek, et L. Kopecký, « Geopolymer materials based on fly ash », *Ceram.-Silik*, vol. 49, n° 3, p. 195-204, 2005.
- [51] S. F. A. Zaidi *et al.*, « Synthesis & characterization of natural soil based inorganic polymer foam for thermal insulations », *Construction and Building Materials*, vol. 157, p. 994-1000, 2017.
- [52] J. Thaarrini et V. Ramasamy, « Properties of foundry sand, ground granulated blast furnace slag and bottom ash based geopolymers under ambient conditions », *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 60, n° 2, p. 159-168, 2016.
- [53] D. B. Nergis, P. Vizureanu, L. Andrusca, et D. Achitei, « Performance of local fly ash geopolymers under different types of acids », présenté à IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, p. 012026.
- [54] S. A. Rasaki, Z. Bingxue, R. Guarecuco, T. Thomas, et Y. Minghui, « Geopolymer for use in heavy metals adsorption, and advanced oxidative processes: A critical review », *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, p. 42-58, 2019.
- [55] S. M. Laskar et S. Talukdar, « Preparation and tests for workability, compressive and bond strength of ultra-fine slag based geopolymer as concrete repairing agent », *Construction and Building Materials*, vol. 154, p. 176-190, 2017.
- [56] D. Bondar, C. J. Lynsdale, N. B. Milestone, N. Hassani, et A. A. Ramezani pour, « Engineering properties of alkali-activated natural pozzolan concrete », *ACI Materials Journal*, vol. 108, n° 1, p. 64-72, 2011.
- [57] J. L. Provis et J. S. J. Van Deventer, *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier, 2009.
- [58] C. Kizhakkethottam, « Sustainable Urban Resilience for the Next Generation (SURGe) Initiative-SURGe– », 2023.
- [59] M. Bertolini et L. Guardigli, « Upcycling shipping containers as building components: an environmental impact assessment », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, p. 947-963, 2020.
- [60] P. Dräger et P. Letmathe, « Value losses and environmental impacts in the construction industry—Tradeoffs or correlates? », *Journal of Cleaner Production*, vol. 336, p. 130435, 2022.

- [61] A. Parande, B. R. Babu, K. Pandi, M. Karthikeyan, et N. Palaniswamy, « Environmental effects on concrete using Ordinary and Pozzolana Portland cement », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 1, p. 288-297, 2011.
- [62] V. W. Tam, X. Gao, et C. M. Tam, « Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach », *Cement and concrete research*, vol. 35, n° 6, p. 1195-1203, 2005.
- [63] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, et N. Roussel, « Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives », *Cement and Concrete Research*, vol. 40, n° 5, p. 820-826, 2010.
- [64] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, et X. Huang, « An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011) », *Construction and building materials*, vol. 31, p. 364-383, 2012.
- [65] M. Wahlström, J. Laine-Ylijoki, O. Wik, A. Oberender, et O. Hjelm, *Hazardous waste classification: Amendments to the European Waste Classification regulation-what do they mean and what are the consequences?* Nordic Council of Ministers, 2016.
- [66] J. O. Castaño, R. Misle Rodríguez, L. A. Lasso, A. Gómez Cabrera, et M. S. Ocampo, « Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes », *Tecnura*, vol. 17, n° 38, p. 121-129, 2013.
- [67] A. Heath, K. Paine, et M. McManus, « Minimising the global warming potential of clay based geopolymers », *Journal of Cleaner Production*, vol. 78, p. 75-83, 2014.
- [68] A. Vásquez, V. Cárdenas, R. A. Robayo, et R. M. de Gutiérrez, « Geopolymer based on concrete demolition waste », *Advanced Powder Technology*, vol. 27, n° 4, p. 1173-1179, 2016.
- [69] R. Hossain, M. T. Islam, A. Ghose, et V. Sahajwalla, « Full circle: Challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy », *Journal of Cleaner Production*, vol. 368, p. 133127, 2022.
- [70] B. Nematollahi et J. Sanjayan, « Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer », *Materials & Design*, vol. 57, p. 667-672, 2014.
- [71] J. Migunthanna, P. Rajeev, et J. Sanjayan, « Investigation of waste clay brick as partial replacement of geopolymer binders for rigid pavement application », *Construction and Building Materials*, vol. 305, p. 124787, 2021.
- [72] R. A. Robayo-Salazar, J. F. Rivera, et R. M. de Gutiérrez, « Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes », *Construction and building materials*, vol. 149, p. 130-138, 2017.
- [73] J. Migunthanna, P. Rajeev, et J. Sanjayan, « Waste clay bricks as a geopolymer binder for pavement construction », *Sustainability*, vol. 14, n° 11, p. 6456, 2022.

- [74] D. Hardjito et B. V. Rangan, « Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete », 2005.
- [75] Y. Wu *et al.*, « Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges », *Construction and Building Materials*, vol. 224, p. 930-949, 2019.
- [76] A. F. Mottese *et al.*, « A flipped classroom experience: towards the knowledge of new ecofriendly materials named "geopolymers" », *Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti-Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali*, vol. 99, n° S1, p. 35, 2021.
- [77] K. Komnitsas et D. Zaharaki, « Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry », *Minerals engineering*, vol. 20, n° 14, p. 1261-1277, 2007.
- [78] P. Zhang *et al.*, « Sustainable microwave-driven CO₂ gasification of plastic waste for high-yield H₂ and CO production », *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, vol. 345, p. 123718, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.123718>.
- [79] K. A. Komnitsas, « Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities », *Procedia Engineering*, vol. 21, p. 1023-1032, 2011.
- [80] B. Majidi, « Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review », *Materials Technology*, vol. 24, n° 2, p. 79-87, 2009.
- [81] M. A. Aleem et P. Arumairaj, « Geopolymer concrete—a review », *International journal of engineering sciences & emerging technologies*, vol. 1, n° 2, p. 118-122, 2012.
- [82] R. Xiao, B. Huang, H. Zhou, Y. Ma, et X. Jiang, « A state-of-the-art review of crushed urban waste glass used in OPC and AAMs (geopolymer): Progress and challenges », *Cleaner Materials*, vol. 4, p. 100083, 2022.
- [83] R. Si, Q. Dai, S. Guo, et J. Wang, « Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder », *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, p. 118502, 2020.
- [84] M. U. Christiansen, « An investigation of waste glass-based geopolymers supplemented with alumina », 2013.
- [85] R. Xiao *et al.*, « Evaluation of glass powder-based geopolymer stabilized road bases containing recycled waste glass aggregate », *Transportation Research Record*, vol. 2674, n° 1, p. 22-32, 2020.
- [86] S. G. Borisade, S. S. Owoeye, K. V. Ajayi, S. I. Enewo, et A. Abdullahi, « Investigation of physical, mechanical and in-vitro bioactivity of bioactive glass-ceramics fabricated from waste soda-lime-silica glass doped P₂O₅ by microwave irradiation sintering », *Hybrid Advances*, p. 100203, 2024.
- [87] C. P. Eze, R. M. Kalombe, et V. T. Ojumu, « Fly ash-based geopolymer building materials for green and sustainable development », 2020.

- [88] D. Allaoui *et al.*, « Eco-friendly geopolymer concrete based on metakaolin and ceramics sanitaryware wastes », *Ceramics International*, vol. 48, n° 23, p. 34793-34802, 2022.
- [89] M. A. Ariffin *et al.*, « Effect of ceramic aggregate on high strength multi blended ash geopolymer mortar », *Jurnal Teknologi*, vol. 77, n° 16, 2015.
- [90] M. Abd Ellatief, A. A. Abadel, K. Federowicz, et M. Abd Elrahman, « Mechanical properties, high temperature resistance and microstructure of eco-friendly ultra-high performance geopolymer concrete: role of ceramic waste addition », *Construction and Building Materials*, vol. 401, p. 132677, 2023.
- [91] D. Streets, K. Yarber, J. Woo, et G. Carmichael, « Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions », *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 17, n° 4, 2003.
- [92] J. Cuenca, J. Rodríguez, M. Martín-Morales, Z. Sánchez-Roldán, et M. Zamorano, « Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 40, p. 702-709, 2013.
- [93] D. Adesanya et A. Raheem, « Development of corn cob ash blended cement », *Construction and Building Materials*, vol. 23, n° 1, p. 347-352, 2009.
- [94] J. S. Lim, Z. A. Manan, S. R. W. Alwi, et H. Hashim, « A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy », *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, n° 5, p. 3084-3094, 2012.
- [95] I. S. Agwa, O. M. Omar, B. A. Tayeh, et B. A. Abdelsalam, « Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 235, p. 117541, 2020.
- [96] B. Gadde, S. Bonnet, C. Menke, et S. Garivait, « Air pollutant emissions from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines », *Environmental Pollution*, vol. 157, n° 5, p. 1554-1558, 2009.
- [97] M. A. El-Sayed et T. M. El-Samni, « Physical and chemical properties of rice straw ash and its effect on the cement paste produced from different cement types », *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 19, n° 1, p. 21-29, 2006.
- [98] R. C. Kanning, K. F. Portella, M. Costa, et R. F. Puppi, « Evaluation of pozzolanic activity of banana leaf ash », présenté à Proceedings of the International Conference of Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal, 2011, p. 12-15.
- [99] R. C. Kanning, K. F. Portella, M. O. Bragança, M. M. Bonato, et J. C. dos Santos, « Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement », *Construction and Building Materials*, vol. 54, p. 460-465, 2014.
- [100] D. A. Ahmad et A. Ma'aruf, « Investigation in to the Use of Plantain Peels Ash as an Admixture in Concrete », *International Journal of Engineering Science*, vol. 5377, 2016.

[101] B. Elsener, C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder, et M. Raupach, « Half-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures », *Materials and Structures*, vol. 36, n° 7, p. 461-471, 2003.

[102] R. A. Robayo-Salazar et R. M. de Gutiérrez, « Natural volcanic pozzolans as an available raw material for alkali-activated materials in the foreseeable future: A review », *Construction and Building Materials*, vol. 189, p. 109-118, 2018.

[103] A. Standard, « C1437: standard test method for flow of hydraulic cement mortar », *Annual book of ASTM standards*, 2007.

[104] C. ASTM, « 1701; Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete », *American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA*, 2017.

[105] A. B. D. N. Técnicas, « NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos—Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica », *Rio de Janeiro*, 2005.

[106] A. Standard, « ASTM C109-standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars », *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2008.

[107] C. Astm, « 597, Standard test method for pulse velocity through concrete », *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2009.

[108] C.-L. Hwang, M. D. Yehualaw, D.-H. Vo, et T.-P. Huynh, « Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders », *Construction and Building Materials*, vol. 218, p. 519-529, 2019.

[109] X. Zhao, H. Wang, X. Wang, et X. Zhao, « Sustainable application of waste eggshell as fillers in alkali-activated solid waste-based materials: Varying treated methods and particle sizes », *Construction and Building Materials*, vol. 425, p. 136040, 2024.

[110] M. Tonini de Araújo, S. T. Ferrazzo, G. J. Bruschi, G. J. B. Silva, et N. C. Consoli, « Strength, Mineralogy, Microstructure, and Statistical Analysis of Alkali-Activated Sugarcane Bagasse Ash–Eggshell Lime Pastes », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 35, n° 6, p. 04023107, 2023.

[111] A. M. Rashad, G. M. Essa, Y. A. Mosleh, et W. Morsi, « Valorization of Ceramic Waste Powder for Compressive Strength and Durability of Fly Ash Geopolymer Cement », *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, n° 4, p. 5653-5665, 2024.

[112] M. Fugazzotto, P. Mazzoleni, A. Stroschio, et G. Barone, « Creating Mortars through the Alkaline Activation of Ceramic Waste from Construction: Case Studies on Their Applicability and Versatility in Conservation », *Sustainability*, vol. 16, n° 3, p. 1085, 2024.