

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

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie civil.

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Par

➤ **Mati Salah Eddine**

Intitulé

*Contribution à l'analyse de l'impact des déchets sur le comportement et la
durabilité des matériaux géopolymère*

Soutenu le : 30 juin 2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Benahcene Mounir</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. Dridi Meriem</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Benaniba Samir</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Laoubi Hamza</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Maafi Nabil</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

*Je tiens par la présente à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements Monsieur **Belkadi Ahmed Abderraouf** et Monsieur **Benaniba Samir** et Madame **Dridi Meriem** pour votre encadrement précieux tout au long de la réalisation de mon mémoire de Master. Votre expertise, votre soutien et vos conseils avisés ont été inestimables pour mener à bien ce travail de recherche.*

*Un grand merci pour Monsieur **Berkouche Amirouche** 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 pour Monsieur **Soualhi Hamza** pour vos efforts considérables pour m'aider dans cette recherche.*

*Je souhaite également remercier chaleureusement les membres du jury, Monsieur **Benahcene Mounir** et Monsieur **Laoubi Hamza** et Monsieur **Maafi Nabil**, pour leur disponibilité et leur précieuse contribution lors de l'évaluation de mon mémoire. Leurs remarques constructives et leurs recommandations m'ont permis d'améliorer la qualité de mon travail.*

Je tiens également à exprimer ma gratitude à tout le personnel du laboratoire de matériaux en génie civil de l'Université de Bordj Bou Arreridj pour leur assistance technique et leur accueil chaleureux. Leur soutien logistique a grandement facilité la réalisation de mes expériences et de mes analyses.

*Enfin, je tiens à remercier tous **mes proches, ma famille et mes amis (Walid Ahmed Akrem Fakhri Brahim Layachi Khireddine Chaabane Abbes et Wafa)**, pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur compréhension tout au long de cette expérience académique exigeante.*



"وقل اعملوا فيسرى الله أعمالكم ورسوله والمؤمنون وستردون الى علم الغيب والشهادة فينبئكم بما كنتم تعملون"

"ما سلكتنا البدايات الا بتسييره وما بلغنا النهايات الا بفضلته فالحمد لله الذي وفقني لتثمين هذه الخطوة في مسيرتي الدراسية بعد مسيرة دامت سنوات حملت في طيتها الكثير من الصعوبات والمشقة والتعب ها أنا اليوم أقف على عتبة تخرجي أقطف ثمار تعبي وأرفع قبعتي بكل فخر فاللهم لك الحمد قبل أن ترضى ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا لأنك وفقنتني على اتمام هذا العمل وتحقيق حلمي.

الى **جدي الغالية** التي كنت أحلم أن تشهد فرحتي في هذا اليوم لتبارك لي بفرحتها ودعواتها رحلت بجسدك لكن حبك ودعوتك مازالت ترفقني رحمك الله واسكنك فسيح جناته.

الى أنيسة العمر وحببية الروح وأعظم نعم الله علي الى من جعل الجنة تحت أقدامها واحتضني قلبها قبل يدها وسهلت لي الشدائد بدعائها الى من سجدت الله تدعوه في سرها وجهرها ذات القلب الحنون والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمات سر قوتي ونجاحي ومصباح دربي الذي وهج حياتي وكانت سببا بعد الله فيما انا عليه الان
"أمي الحبيبة"

الى من رزقت بهم سندا والى من عرفت معهم معنى الحياة من ساندوني عند ضعفي وساقوني بالحب الى الدين لطلما كانوا الظل لهذا النجاح حفظكم الله **"اخوتي"** الى كل من شاركوني لحظاتي الى كل من يفرحون لنجاحي وكأنه نجاحهم أصدقائي وزملائي الاعزاء شكرا لكم على وقوفكم بجاني دائما "

وآخر دعوانا الحمد لله رب العالمين

Résumé

Ce mémoire s'est focalisé sur le développement d'un mortier géopolymère écologique à travers le remplacement partiel du laitier de haut fourneau (LHF) par de la poudre de brique rouge (PB) et des fines recyclées (PFR). L'étude a porté sur la caractérisation des matières premières, la formulation de mélanges binaires et ternaires, ainsi que sur une série d'essais physiques (étalement, masse volumique, porosité) et mécaniques (résistance à la compression, à la flexion), ainsi que des essais de retrait et de durabilité en milieu acide. Les résultats ont montré que l'incorporation de ces déchets influence significativement les propriétés du matériau, notamment une diminution de l'étalement de 175 mm (référence) à 140 mm pour les mélanges ternaires, une augmentation de la viscosité et du seuil de cisaillement, ainsi qu'une baisse modérée de la résistance mécanique. À 28 jours, la résistance à la compression passe de 50,6 MPa (référence 100 % LHF) à 40,2 MPa pour le mélange contenant 15 % PB et 15 % PFR. Le retrait mesuré après 90 jours atteint jusqu'à 0,62 mm/m pour certains mélanges ternaires, contre 0,45 mm/m pour le témoin. En conditions agressives (exposition à une solution de H₂SO₄), la perte en masse dépasse 7 % dans les formulations contenant PFR, contre 3,2 % pour le mélange de référence. Cette recherche confirme ainsi la faisabilité de valoriser ces déchets dans des formulations géopolymères performantes, tout en contribuant à la réduction de l'impact environnemental des matériaux de construction.

Mots clé : géopolymère, poudre de brique, poudre des fines recyclées, retrait, rhéologie, résistance mécanique, attaque chimique

Absract

This research focuses on the development of an eco-friendly geopolymer mortar through the partial replacement of ground granulated blast furnace slag (LHF) with red brick powder (PB) and recycled fine powder (PFR). The study included the characterization of raw materials, formulation of binary and ternary mixtures, and a series of physical tests (such as flowability, bulk density, porosity) and mechanical tests (compressive strength, flexural strength), in addition to shrinkage and durability tests under acidic conditions. The results showed that the incorporation of these waste materials significantly affects the properties of the geopolymer. The flow spread decreased from 175 mm (reference) to 140 mm in ternary mixes, while viscosity and yield stress increased, along with a moderate reduction in mechanical strength. After 28 days, compressive strength dropped from 50.6 MPa (100% LHF reference) to 40.2 MPa for the mix with 15% PB and 15% PFR. Shrinkage after 90 days reached up to 0.62 mm/m in some ternary mixes, compared to 0.45 mm/m in the control mix. Under aggressive sulfuric acid exposure (H₂SO₄), mass loss exceeded 7% in PFR-containing mixes, while it remained at 3.2% for the reference. These findings confirm the feasibility of valorizing these waste materials in efficient geopolymer formulations, contributing to reducing the environmental impact of construction materials and promoting sustainable development.

Keywords: geopolymer, brick powder, recycled fine powder, shrinkage, rheology, mechanical strength, chemical attack

الملخص :

يركز هذا البحث على تطوير خرسانة جيوبوليمرية صديقة للبيئة من خلال الاستبدال الجزئي لخبث الفرن العالي (LHF) بمسحوق الطوب الأحمر (PB) ومسحوق النفايات الدقيقة المعاد تدويرها (PFR). وقد شملت الدراسة توصيف المواد الأولية، وتحضير الخلطات الثنائية والثلاثية، إضافة إلى سلسلة من التجارب الفيزيائية (مثل اختبار الهطول، الكتلة الحجمية، المسامية) والميكانيكية (مقاومة الضغط، مقاومة الانحناء)، فضلاً عن اختبارات الانكماش والمتانة في بيئة حامضية. أظهرت النتائج أن دمج هذه النفايات يؤثر بشكل ملحوظ على خصائص المادة، إذ انخفض الهطول من 175 مم في الخلطة المرجعية إلى 140 مم في الخلطات الثلاثية، مع زيادة في اللزوجة وقيمة عتبة القص، وانخفاض معتدل في المقاومة الميكانيكية. حيث تراجمت مقاومة الضغط بعد 28 يومًا من 50.6 ميغاباسكال للخلطة المرجعية 100 (LHF) إلى 40.2 ميغاباسكال للخلطة التي تحتوي على 15% PB و15% PFR. أما الانكماش المقاس بعد 90 يومًا فقد بلغ 0.62 مم/م في بعض الخلطات الثلاثية، مقارنة بـ 0.45 مم/م في الخلطة المرجعية. وفي ظروف عدوانية) تعريض لعامل كبريتي (H_2SO_4) ، تجاوزت نسبة الفقد في الكتلة 7% في الخلطات المحتوية على PFR ، مقارنة بـ 3.2% فقط في العينة المرجعية. تؤكد هذه النتائج إمكانية تمشين هذه النفايات في إنتاج خرسانة جيوبوليمرية فعالة، بما يساهم في تقليل الأثر البيئي لمواد البناء وتعزيز مفهوم التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: جيوبوليمر، مسحوق الطوب، مسحوق الغرامات المعاد تدويرها، الانكماش، علم الريولوجيا، المقاومة الميكانيكية، الهجوم الكيميائي.

Table des matières

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères	3
I.1. Introduction	3
I.2. Historique	3
I.3. Définition des géopolymères	4
I.4. Constituants des géopolymères	5
I.4.1. Précurseurs aluminosilicates	6
I.4.2. Différents types de géopolymère	6
I.4.2.1. Géopolymère à base de laitier	6
I.4.2.2. Géopolymère à base de métakaolin	6
I.4.2.3. Ciment géopolymère à base de cendres volantes	7
I.4.3. Activateurs alcalins	7
I.4.3.1. NaOH /KOH	8
I.4.3.2. Silicates alcalins (Na ₂ SiO ₃ /K ₂ SiO ₃):	8
I.5. Microstructure du liant géopolymère à l'état durci	8
I.6. Formulation des géopolymères	9
I.7. Propriétés des géopolymères	10
I.8. Application des géopolymères	11
I.9. Avantages et inconvénients des géopolymère	12
I.9.1. Avantages des géopolymères	12
I.9.2. Inconvénients des géopolymères	13
I.10. Conclusion	13
CHAPITRE II : Les déchets dans les géopolymères	14
II.1. Introduction	14
II.2. Utilisation des déchets dans les géopolymères	14
II.2.1. Rôle des déchets dans la construction durable :	14
II.2.2. Réduction de la consommation de ressources naturelles :	15
II.2.3. Réduction des émissions de gaz à effet de serre	15
II.2.4. Réduction des déchets envoyés en décharge	15
II.2.5. Promotion de l'innovation et de l'économie circulaire	16
II.3. Classification des déchets utilisés et leurs effets sur les propriétés des géopolymères ..	16
II.3.1. Déchets industriels:	16
II.3.1.1. Déchets de démolition de béton :	16
II.3.1.2. Déchets de la brique en terre cuite	17

II.3.1.3. Déchets de céramique	18
II.3.1.4. Déchets de verre.....	19
II.3.1.4. Déchets de plastique	20
II.3.2. Déchets agricoles et biomasses	20
II.3.2.1. Cendres de balle de riz	21
II.3.2.2. Boues d'épuration.....	22
II.3.2.3. Déchets des coquilles d'œuf	23
II.4. Conclusion	24
CHAPITRE III : Généralités sur la Rhéologie et le Retrait.....	26
III.1. Généralités	26
III.2. Introduction	26
III.3. Définition de la rhéologie des géopolymères	27
III.4. Lois de comportement rhéologique	27
Modèle de Bingham	27
Modèle de Herschel-Bulkley	28
Comportement Thixotrope.....	28
III.5. Techniques de caractérisation rhéologique des géopolymères	29
III.5.1. Viscosimètres	29
III.5.1.1. Viscosimètres à cylindres coaxiaux (Couette).....	29
III.5.1.2. Viscosimètres à cône-plan.....	29
III.5.1.3. Viscosimètres capillaires.....	29
III.5.2. Rhéomètre	29
III.5.2.1. Les rhéomètres rotatifs.....	29
III.5.2.2. Les essais oscillatoires	30
III.5.3. Rhéomètres et leurs principes de fonctionnement	30
III.6. Paramètres rhéologiques mesurés.....	30
III.7. Influence des paramètres de formulation sur la rhéologie.....	31
III.8. Introduction	31
III.9. Les particularités du retrait des géopolymères	32
III.10. Les types du retrait des géopolymères	32
III.10.1. Retrait de séchage (dessiccation) :.....	32
III.10.2. Retrait plastique.....	33
III.10.3. Retrait chimique (autodessiccation)	33
III.10.4. Retrait thermique	34
III.11. Mesure du retrait des géopolymères	34
III.12. Conclusion.....	35
CHAPITRE IV : Matériaux et Méthode expérimentale	36

IV.1. Introduction.....	36
IV.2. Matériaux et caractérisation	36
IV.2.1 Sable.....	36
IV.2.2 Précurseurs.....	37
IV.2.3 Activateurs.....	39
IV.2.3.1. Soude caustique.....	39
IV.2.3.2. Silicates de sodium.....	40
IV.3. Méthode Expérimentale	42
IV.3.1. Préparation des mélanges	42
IV.3.2. Essais expérimentaux	43
IV.4. Conclusion	46
CHAPITRE V : Discussion des Résultats.....	48
V.1. Introduction.....	48
V.2. Propriétés a état frais	48
V.2.1 L'étalement.....	48
V.2.2 Seuil de cisaillement.....	49
V.2.3 Viscosité	51
V.3. Propriétés a état durcie	52
V.3.1 Résistance à la compression	52
V.3.2 Résistance à la flexion	53
V.3.3 Retrait	54
V.3.4 Durabilité.....	55
V.3.4.1 Résistance résiduelle.....	55
V.3.4.2 Perte en masse	56
V.3.4.3 Aspect visuel	57
V.4. Conclusion	58
Conclusion générale.....	59
Références Bibliographiques	

Liste des Figures

Figure 1 : Nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si/Al.....	4
Figure 2 : Photos de l'aéroport de Brisbane West Wellcamp	5
Figure 3 : Micrographies SEM.....	9
Figure 4 : Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994.....	12
Figure 5 : (a) les verres usagés tels que reçus (b) la poudre de verre recyclée	19
Figure 6 : Génération de cendres de paille de riz	21
Figure 7 : Boues d'épuration.....	23
Figure 8 : Déchets de coquilles d'œuf	24
Figure 9 : la relation entre la tension de cisaillement et le taux de cisaillement	28
Figure 10 : Comportement viscoplastique	28
Figure 11 : Mesure du retrait sur une éprouvette à l'aide d'un rétractomètre.....	35
Figure 12 : Les apparences des sables utilisés	36
Figure 13 : Granulométries des sables utilisés	37
Figure 14 : Apparences des précurseurs utilisés	38
Figure 15 : Courbes granulométriques des précurseurs	38
Figure 16 : Préparation de la solution NaOH	40
Figure 17 : Silicates de sodium	41
Figure 18 : Remplissage des moules	43
Figure 19 : Les échantillons démoulés	43
Figure 20 : Rhéomètre utilisé pour mesure la rhéologie de mortiers étudiés.....	44
Figure 21 : Essai d'étalement.....	44
Figure 22 : Essai de la résistance à la compression et la flexion	45
Figure 23 : la durabilité des géopolymères à base de laitier soumis à une attaque sulfurique. 46	
Figure 24 : Mesure de retrait a l'aide de rétractomètre	46
Figure 25 : Étalement des différents mortiers utilisés.....	48
Figure 26 : Seuil de cisaillement des différents mortiers utilisés.....	49
Figure 27 : La viscosité des différents mortiers utilisés	51
Figure 28 : La résistance à la compression des différents mortiers utilisés	52
Figure 29 : La résistance a la flexion des différents mortiers utilisés	53
Figure 30 : Retrait total des différents mortiers utilisés	54
Figure 31 : La résistance a la compression avant et après exposition a une solution de H ₂ SO ₃ pour différents mortiers utilisés.....	55
Figure 32 : La perte de masse après exposition a une solution de H ₂ SO ₃ pour différents mortiers utilisés	56
Figure 33 : Évaluation visuelle de la durabilité des géopolymères à base de laitier soumis à une attaque sulfurique	57

Liste des Tableaux

Tableau 1 Propriétés physiques des sables utilisés.	37
Tableau 2 Composition chimique des précurseurs.	38
Tableau 3 Composition chimique de la soude caustique.	39
Tableau 4 Caractéristiques des silicates de sodium utilisées	41
Tableau 5 Compositions des mélanges confectionnés.	42

Liste des Abréviations

LHF : laitier de haut fourneau

PFR : la poudre de fines recyclées

PB : la poudre de brique rouge ou brique concassé

P : brique broyer

F : fines recyclées

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au fil des années et avec le développement de la science, le problème des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air est devenu une menace pour l'environnement et le développement durable dans le domaine de la construction, ce qui a incité de nombreux chercheurs et professionnels à explorer et développer de nouvelles approches pour réduire cette menace tout en améliorant les performances des matériaux de construction. Dans ce contexte, les géopolymères nous apparaissent comme une nouvelle alternative prometteuse au béton traditionnel, car ils nous offrent de nombreux avantages tels que la durabilité, la résistance, la dureté et la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Cette mémoire et ces recherches portent sur le développement d'un mortier géopolymère innovant à base de poudre de brique rouge et de fines recyclées et sur l'exploration de son potentiel en tant que substituts du laitier de haut fourneau (LHF) dans les mélanges géopolymères.

➤ **Problématique**

La production abondante de déchets de brique rouge et de fines recyclées représente un défi environnemental important, appelant à des solutions novatrices pour leur valorisation. Les géopolymères présentent une opportunité unique de convertir ces déchets en ressources précieuses, tout en diminuant la dépendance aux matériaux conventionnels tels que le LHF. Toutefois, la formulation optimale des mélanges géopolymères intégrant ces déchets et leur influence sur les propriétés finales du matériau subsistent des axes de recherche cruciaux.

➤ **Objectifs du mémoire**

Ce mémoire se concentre sur l'étude et le développement d'un mortier géopolymère innovant. Ce nouveau matériau sera fabriqué à partir de poudre de déchets de brique rouge et de fines recyclées, en remplacement partiel du laitier de haut fourneau (LHF) utilisé dans la formulation des mélanges. Les objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants :

- Caractériser les propriétés physico-chimiques des déchets de brique rouge et de fines recyclées en vue de leur utilisation comme substituts dans les mélanges géopolymères.
- Évaluer l'impact de la substitution de la poudre de brique rouge (PB) et de la poudre de fines recyclées (PFR) sur les propriétés physiques, mécaniques, et la maniabilité des mélanges géopolymères.
- Analyser les résultats expérimentaux et formuler des recommandations pour l'utilisation pratique des mortiers géopolymères à base de déchets de brique rouge et de fines recyclées dans l'industrie de la construction.

➤ Plan du mémoire

Ce mémoire est composé de plusieurs parties pour atteindre les objectifs fixés :

- La première partie se compose de trois chapitres, elle comprendra une revue de la littérature sur les géopolymères, les déchets de brique rouge et de fines recyclées, ainsi que sur les techniques de formulation des mélanges géopolymères et une généralité sur la Rhéologie et le retrait.
- La deuxième partie portera sur la méthodologie expérimentale et les résultats obtenus, elle se compose de deux chapitres : le quatrième chapitre qui décrit les matériaux utilisés, les procédures de préparation des échantillons et les tests de caractérisation effectués. Le cinquième chapitre présentera les résultats obtenus, avec une analyse détaillée des performances des mélanges géopolymères en fonction des proportions de substitution de PB et PFR, 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 mortiers géopolymères à base de déchets de brique rouge et de fines recyclées 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

I.1. Introduction :

L'industrie de la construction connaît une révolution technologique avec l'émergence d'un nouveau liant, le géopolymère. Ce matériau, plus respectueux de l'environnement et moins énergivore que le ciment Portland traditionnel, pourrait le remplacer partiellement ou totalement.

Les géopolymères, décrits par Davidovits comme des "gels" d'aluminosilicates amorphes très denses, sont obtenus en combinant un minerai contenant de l'alumine et de la silice (comme le métakaolin et/ou le laitier) avec une solution alcaline de silicate.

Ce chapitre se concentrera sur la compréhension des mécanismes de prise d'un système géopolymère à base de laitier. Nous aborderons l'histoire du géopolymère, sa composition, ses applications et ses méthodes de caractérisation.

En résumé, ce chapitre explorera en profondeur le potentiel des géopolymères comme alternative durable et performant aux matériaux de construction traditionnels.

I.2. Historique :

Les géopolymères, bien qu'utilisés depuis l'Antiquité, n'ont été identifiés et nommés que récemment. Des chercheurs ont émis l'hypothèse que des monuments historiques tels que les pyramides d'Égypte, les Phaistos en Crète et les Ziggourats en Mésopotamie ont été construits à partir de géopolymères. Ces structures ont résisté à des conditions climatiques extrêmes et à l'érosion, ce qui suggère la durabilité exceptionnelle de ces matériaux [1].

Les premières études scientifiques sur les géopolymères ont été menées par Glukhovski dans les années 1950 [2]. Il a analysé les liants utilisés dans les anciennes constructions romaines et égyptiennes et a découvert qu'ils étaient composés d'aluminosilicates alcali-activés. Davidovits a ensuite affirmé que les pyramides d'Égypte avaient été construites à partir de blocs de géopolymères moulés sur place [3] [4].

Le terme « géopolymère » a été inventé par Davidovits en 1979 [5]. Il a été inspiré par la stabilité des géopolymères à haute température et leur nature inorganique. Davidovits a également souligné leur résistance au feu, ce qui les rend idéaux pour une variété d'applications.

Les géopolymères sont considérés comme un sous-ensemble des matériaux alcali-activés [6]. Ils sont généralement composés d'aluminosilicates, qui sont activés par des solutions alcalines. La teneur en calcium des composants réactifs doit être faible pour permettre la formation d'une structure de réseau pseudo-zéolitique [7].

Les géopolymères ont connu un essor important dans les années 1990 en raison de leurs propriétés non combustibles. Ils sont maintenant utilisés dans une variété d'applications, y compris les boucliers thermiques pour les avions et les matériaux de construction durables [8].

Les géopolymères sont considérés comme une alternative prometteuse au ciment Portland traditionnel. Ils sont fabriqués à partir de matériaux abondants et peu coûteux, et leur production est moins polluante.

I.3. Définition de la géopolymérisation :

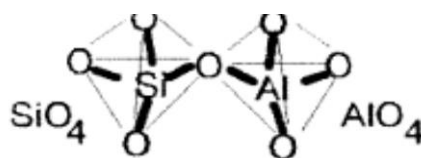
Les géopolymères sont définis comme des chaînes de monomères inorganiques, caractérisés par une structure amorphe à semi-cristalline [1] [9]. Ils sont constitués d'un enchaînement de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 liés par les atomes d'oxygène comme unités structurelles de base. Les géopolymères ont la formule générale $M_n\{(\text{SiO}_2)_z, \text{AlO}_2\}_n, w \text{H}_2\text{O}$ [1] [10].

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).

Poly(sialate)
(-Si-O-Al-O-)



Poly(sialate-siloxo)
(-Si-O-Al-O-Si-O-)



Poly(sialate-disiloxo)
(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)

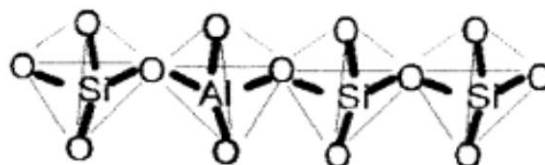


Figure 1 : Nomenclature des géopolymères en fonction du rapport Si/Al [9]

Le domaine du préfabriqué est l'une des premières applications qui a été testée pour les matériaux géopolymères [1], 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 [11].

L'aéroport de Brisbane West Wellcamp (BWWA) est le plus grand projet de béton géopolymères au monde (Figure 2) [12]. 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 [12].



Figure 2 : Photos de l'aéroport de Brisbane West Wellcamp

I.4. Constituants des géopolymères :

Les géopolymères sont créés en activant divers matériaux à base d'aluminosilicates, appelés précurseurs aluminosilicates, à l'aide d'une solution alcaline forte. Cette solution peut être de l'hydroxyde de sodium, de l'hydroxyde de potassium, du silicate de sodium ou du silicate de potassium, qui sont appelés activateurs alcalins.

I.4.1 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 [13]. 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.

I.4.2 Différents types de géopolymère :

I.4.2.1 Géopolymère à base de laitier :

Les géopolymères à base de laitier sont fabriqués en utilisant du laitier de haut fourneau, un sous-produit résultant de la production de fonte dans l'industrie sidérurgique. Ce matériau est souvent considéré comme un déchet, mais il peut être valorisé en tant que matière première pour la fabrication de géopolymères.

Ces géopolymères à base de laitier sont largement utilisés dans l'industrie de la construction en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur résistance aux produits chimiques. Lorsqu'ils sont mélangés avec des activateurs alcalins, le laitier réagit chimiquement pour former une matrice solide et liée, qui présente des performances supérieures à celles des matériaux traditionnels tels que le ciment Portland [15].

Les géopolymères à base de laitier offrent une résistance mécanique élevée, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des applications structurelles. Ils peuvent être utilisés pour la construction de fondations, de murs, de dalles et d'autres éléments de structure nécessitant une résistance et une durabilité élevées. De plus, ils présentent une excellente résistance aux produits chimiques, ce qui les rend appropriés pour des environnements agressifs où la corrosion ou la détérioration chimique peuvent être un problème, tels que les installations industrielles, les stations d'épuration ou les structures en contact avec des agents chimiques corrosifs [16],[17].

I.4.2.2 Géopolymère à base de métakaolin :

Ces géopolymères sont produits en utilisant du métakaolin, qui est obtenu en calcinant de l'argile kaolin à des températures élevées (environ 600-800°C). Le processus de calcination élimine les impuretés et active les composants réactifs de l'argile, ce qui permet de former des géopolymères lorsqu'il est mélangé à des activateurs alcalins.

Ces géopolymères à base de métakaolin sont utilisés dans diverses applications en raison de leurs propriétés uniques. L'une des utilisations courantes est la réparation des structures, où les géopolymères à base de métakaolin sont utilisés comme matériaux de réparation pour restaurer l'intégrité structurelle des éléments endommagés tels que les murs, les piliers ou les planchers. Ils peuvent être utilisés pour renforcer les zones faibles, réparer les fissures et les défauts, et améliorer la durabilité globale des structures.

Les géopolymères à base de métakaolin sont également utilisés dans les revêtements de surface pour fournir des propriétés améliorées telles que la résistance à l'usure, la résistance chimique et la protection contre la corrosion. Ils peuvent être appliqués sur divers substrats tels que le béton, le métal ou le bois, offrant une barrière protectrice durable et résistante aux conditions environnementales agressives [18],[19].

1.4.2.3.Ciment géopolymère à base de cendres volantes :

Les géopolymères à base de cendres volantes sont fabriqués en utilisant des cendres volantes, un sous-produit résultant de la combustion du charbon dans les centrales électriques. Lorsque le charbon est brûlé pour produire de l'électricité, les cendres volantes sont générées et capturées à partir des gaz de combustion. Ces cendres volantes peuvent ensuite être utilisées comme matière première dans la fabrication de géopolymères [20].

Ces géopolymères à base de cendres volantes sont largement appréciés pour leur faible impact environnemental. En utilisant les cendres volantes, qui seraient autrement considérées comme des déchets, comme matériau de base, on évite leur élimination dans les décharges et on réduit ainsi leur empreinte écologique. De plus, les géopolymères à base de cendres volantes nécessitent généralement moins d'énergie lors de leur fabrication par rapport aux matériaux traditionnels tels que le ciment Portland, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO₂ et à la préservation des ressources naturelles [21].

1.4.3 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 [22],[23].

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 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{K}_2\text{SiO}_3$) [23].

1.4.3.1 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 [24] 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 [25].

1.4.3.2 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 [26],[27]. 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 [23],[27].

1.5. Microstructure du liant géopolymère à l'état durci :

Le matériau formé par le processus de géopolymérisation diffère considérablement des hydrates de ciment Portland (OPC). Dans une étude de 1979, Davidovits [1]. a décrit le produit de la géopolymérisation comme un polymère amorphe à semi-cristallin d'aluminosilicate. Ce matériau est le résultat d'une réaction de polycondensation inorganique d'aluminosilicates en présence de solutions hautement concentrées d'hydroxyde ou de silicate de métal alcalin (Fig.3).

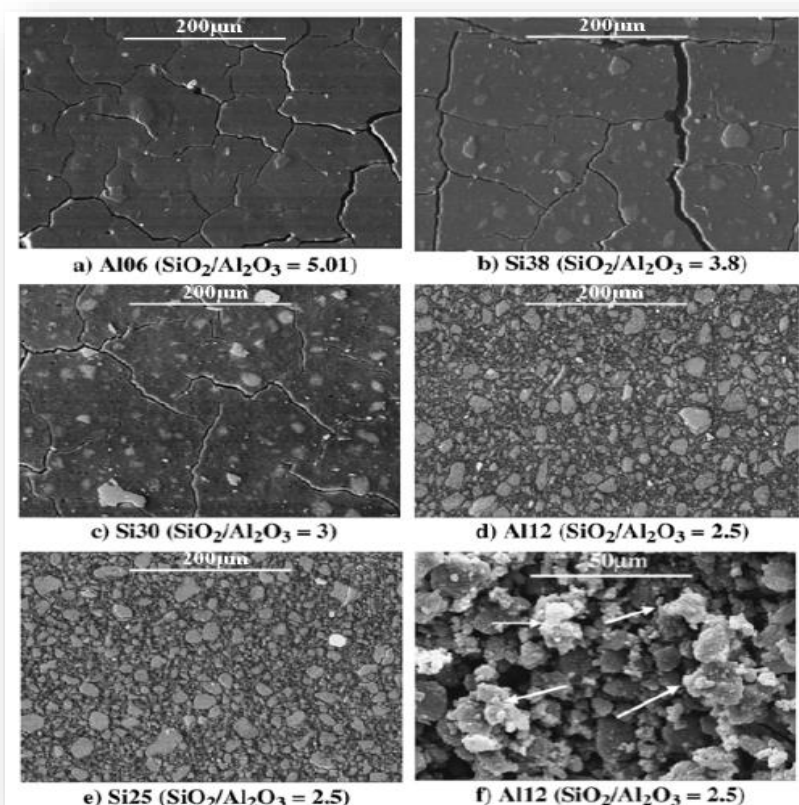


Figure 3 : Micrographies SEM [11].

I.6. Formulation des géopolymères :

La formulation des géopolymères est un processus crucial dans la fabrication de ces matériaux inorganiques. Elle consiste à sélectionner et doser judicieusement les matières premières et les activateurs nécessaires pour obtenir les propriétés souhaitées.

Les principaux composants utilisés dans la formulation des géopolymères sont les précurseurs siliceux et aluminiques, les activateurs alcalins et éventuellement d'autres ajouts pour améliorer certaines propriétés spécifiques. Les précurseurs siliceux les plus couramment utilisés sont le métakaolin [28], un produit de l'argile calcinée [29] et les cendres volantes [30]. Les précurseurs aluminiques incluent souvent le laitier de haut fourneau [30],[31], qui est un sous-produit de l'industrie sidérurgique.

Les activateurs alcalins sont essentiels pour initier la réaction de géopolymérisation. Ils peuvent être des silicates alcalins, tels que l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH), ou des solutions de silicate alcalin, généralement appelées "liquides alcalins". Ces

activateurs fournissent les ions alcalins nécessaires pour réagir avec les précurseurs et former le réseau tridimensionnel du géopolymère [32].

La formulation des géopolymères nécessite une bonne connaissance des interactions chimiques et des ratios appropriés entre les précurseurs et les activateurs. Des essais préliminaires sont souvent réalisés pour déterminer les proportions optimales de chaque composant, en tenant compte des propriétés souhaitées, telles que la résistance mécanique, la durabilité, la résistance à la chaleur et aux produits chimiques.

Outre les précurseurs et les activateurs, d'autres ajouts peuvent être incorporés dans la formulation des géopolymères pour améliorer certaines caractéristiques. Par exemple, des fibres peuvent être ajoutées pour renforcer la résistance à la traction et à la flexion du matériau. Des adjuvants peuvent également être utilisés pour modifier la rhéologie de la pâte géopolymère, facilitant ainsi sa mise en œuvre et son application.

Une fois la formulation établie, les différentes matières premières sont mélangées soigneusement pour assurer une homogénéité de la pâte géopolymère. Le mélange peut être réalisé à sec, en mélangeant les poudres des précurseurs, ou en utilisant une méthode humide, en incorporant progressivement les liquides alcalins dans les précurseurs. Des techniques de mélange spécifiques, telles que le malaxage ou le mélange à haute énergie, peuvent être utilisées pour obtenir une dispersion uniforme des composants.

La formulation des géopolymères est un processus dynamique, où différents paramètres peuvent être ajustés en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Les chercheurs et les ingénieurs travaillent constamment pour développer de nouvelles formulations et optimiser les propriétés des géopolymères, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications industrielles dans des domaines tels que la construction, l'aérospatiale, l'environnement et bien d'autres.

I.7. 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 [33] [34].

I.8. Applications des géopolymères :

Les géopolymères sont largement utilisés dans divers secteurs tels que le génie civil, l'automobile, l'aéronautique, la métallurgie, la fonderie de métaux non ferreux, la plasturgie, la gestion des déchets, la construction et la restauration de bâtiments . Dans le domaine de l'ingénierie, de nouveaux types de ciments géopolymères, comme le American Cement PYRAMENT, ont été développés et sont sur le marché depuis 1988 aux États-Unis. Ces produits sont ultra-rapides et performants, ce qui les rend idéaux pour l'entretien et la construction de plates-formes d'atterrissage en béton [35].

Dans l'industrie aérospatiale, les moules et les outils en géopolymère réfractaires sont utilisés pour fabriquer en toute sécurité des alliages aluminium/lithium liquides hautement corrosifs. Cette application est essentielle pour la fabrication de pièces aéronautiques de haute qualité, où les géopolymères offrent une résistance chimique et thermique exceptionnelle [36].

Dans le domaine de l'automobile, des composites carbone/géopolymère sont utilisés pour la protection thermique des voitures de course. Ces composites offrent une excellente résistance à la chaleur et peuvent résister aux conditions extrêmes rencontrées dans les véhicules de course [36].

Dans le domaine du génie civil, les applications pratiques des géopolymères peuvent être regroupées en trois catégories distinctes. Tout d'abord, ils sont utilisés dans la construction de bâtiments et d'éléments préfabriqués pour des ouvrages d'art, offrant des avantages tels qu'une meilleure résistance aux intempéries, une durabilité accrue et une réduction de l'empreinte carbone par rapport aux matériaux traditionnels [37].

Ensuite, les géopolymères sont utilisés dans la production d'éléments de maçonnerie tels que des blocs, des pavés, des corps creux, etc. Ces produits offrent des performances supérieures en termes de résistance mécanique, d'isolation thermique et acoustique, et de résistance aux produits chimiques, contribuant ainsi à des constructions durables et de haute qualité.

Enfin, les géopolymères sont utilisés dans la construction de routes et de canalisations dans les travaux publics. Ils offrent une excellente résistance à la fatigue, une meilleure durabilité et une résistance chimique élevée, ce qui en fait des choix attrayants pour les infrastructures routières et les systèmes de drainage.

Un exemple de réalisation notable dans l'utilisation des bétons géopolymères à base de laitier remonte à 1986-1994, lorsque la société russe Tsentrmetallurgremonta a réussi à construire une série de bâtiments en utilisant ces matériaux (Fig.4). Ces bétons géopolymères à base de laitier ont démontré leurs excellentes propriétés mécaniques et leur résistance aux produits chimiques, offrant ainsi une alternative durable et performante aux bétons traditionnels.



Figure 4 : Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994

I.9. Avantages et inconvénients des géopolymère :

Les géopolymères présentent plusieurs avantages et inconvénients, qui peuvent varier en fonction de leur formulation spécifique et de leur application. Voici quelques-uns des principaux avantages et inconvénients des géopolymères [38],[39].

I.9.1. Avantages des géopolymères :

- **Durabilité** : Les géopolymères sont connus pour leur durabilité exceptionnelle. Ils offrent une résistance élevée aux attaque chimiques, à la chaleur, à l'abrasion et aux intempéries, ce qui en fait des matériaux adaptés aux environnements difficiles.
- **Résistance mécanique** : Les géopolymères peuvent présenter une résistance mécanique élevée, ce qui les rend adaptés à des applications nécessitant une bonne stabilité structurelle, telles que la construction d'ouvrages d'art et de bâtiments.

CHAPITRE I : Généralités sur les géopolymères

- Faible empreinte carbone : Les géopolymères peuvent être fabriqués à partir de sous-produits industriels, tels que le laitier de haut fourneau ou les cendres volantes, ce qui réduit leur empreinte carbone par rapport aux matériaux traditionnels. Ils peuvent également contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre lors de leur fabrication.
- Utilisation de déchets : Les géopolymères offrent la possibilité d'utiliser des déchets industriels comme matières premières, tels que les cendres volantes, contribuant ainsi à la gestion des déchets et à la promotion de l'économie circulaire.
- Isolation thermique : Certains géopolymères présentent de bonnes propriétés d'isolation thermique, ce qui les rend utiles pour l'isolation des bâtiments et la réduction des pertes d'énergie.

1.9.2. Inconvénients des géopolymères :

- Coût initial plus élevé : Les géopolymères peuvent être plus coûteux à produire que les matériaux traditionnels tels que le ciment Portland. Cela est dû à la nécessité de matières premières spécifiques et d'un processus de fabrication plus complexe.
- Sensibilité à l'humidité : Certains géopolymères peuvent être sensibles à l'humidité pendant leur durcissement, ce qui nécessite des conditions de séchage et de durcissement contrôlées.
- Variabilité des propriétés : Les propriétés des géopolymères peuvent varier en fonction de leur formulation et de leur processus de fabrication, ce qui nécessite une expertise et un contrôle stricts pour assurer une performance cohérente.

I.10 Conclusion :

Les géopolymères sont des matériaux prometteurs pour l'avenir en raison de leurs propriétés avancées et de leur faible impact environnemental. Ils sont généralement synthétisés à température ambiante ou légèrement élevée à partir de précurseurs d'aluminosilicate et d'une solution alcaline hautement concentrée. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans divers domaines, notamment dans la construction.

CHAPITRE II
Déchets dans les géopolymères

II.1.Introduction :

La construction durable est un enjeu majeur du XXI^e siècle. L'intégration de déchets dans les géopolymères ouvre des perspectives prometteuses, combinant avantages écologiques et économiques. Ce chapitre se consacre à l'exploration approfondie de cette approche novatrice. Nous débuterons par une analyse du rôle clé des déchets en tant que ressources stratégiques pour la durabilité de la construction, en insistant sur leur potentiel de 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. Enfin, nous évaluerons de manière systématique l'impact de ces matériaux recyclés sur les propriétés mécaniques et la durabilité des géopolymères.

II.2.Utilisation des déchets dans les géopolymères :

La valorisation des déchets dans la fabrication des géopolymères offre une solution prometteuse pour la gestion durable des déchets tout 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. Cette section examinera les différents types de déchets qui peuvent être utilisés dans la formulation des géopolymères.

II.2.1. Rôle des déchets dans la construction durable :

Les géopolymères fabriqués à partir de déchets s'inscrivent dans une démarche de construction durable en offrant une solution de remplacement écologique aux matériaux traditionnels. Cette valorisation des déchets 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 protection de l'environnement et adoptant des techniques de construction qui respectent l'écosystème. [40].

- 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 [41].
- **Réduire les déchets de construction:** Jusqu'à 40 % de l'ensemble des déchets produits dans chaque pays européen proviennent du secteur de la construction [42]. 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 [43] la réduction de l'empreinte carbone est une priorité.
- **Créer un environnement de vie sain :** Assurer un cadre de vie sain est un objectif clé de la construction durable, qui englobe la protection de l'environnement intérieur. Il est primordial de veiller à la santé et au bien-être des occupants des bâtiments durables.
- **Offrir des possibilités de logement équitable :** La construction durable ne se concentre pas uniquement sur l'environnement ; elle a également une dimension sociale importante. L'un de ses objectifs est d'offrir des possibilités de logement équitable en créant des habitations abordables pour les communautés qui en ont le plus besoin.

II.2.2. Réduction de la consommation de ressources naturelles :

Intégrer les déchets en tant que matières premières dans la construction permet de limiter l'exploitation de nouvelles ressources naturelles, notamment les agrégats minéraux et les matériaux de construction traditionnels. Cette démarche est essentielle pour préserver les écosystèmes et assurer la conservation des ressources non renouvelables. En allégeant la demande sur ces ressources précieuses, nous favorisons une utilisation plus responsable des éléments vitaux pour notre environnement, assurant ainsi leur disponibilité pour les générations futures [44].

II.2.3. Réduction des émissions de gaz à effet de serre :

Intégrer des déchets dans le secteur de la construction est une stratégie efficace pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre habituellement générées par la fabrication et le transport des matériaux conventionnels. L'emploi de cendres volantes dans les géopolymères, par exemple, engendre une réduction significative des émissions de CO₂ comparativement à la production de ciment Portland. Cette pratique contribue activement à l'atténuation du changement climatique en allégeant l'empreinte carbone de l'industrie de la construction [45].

II.2.4. Réduction des déchets envoyés en décharge :

L'intégration des déchets dans les matériaux de construction offre une solution efficace pour réduire considérablement les volumes de déchets envoyés en décharge. Cette approche permet de lutter contre la saturation des sites d'enfouissement et s'inscrit dans une démarche de gestion

optimisée des déchets. Elle s'aligne sur les principes de l'économie circulaire, qui promeut la valorisation des ressources et la réduction des déchets [46].

II.2.5. Promotion de l'innovation et de l'économie circulaire :

L'intégration des déchets dans le secteur de la construction revêt une importance majeure, offrant des perspectives innovantes pour le progrès technologique et la modernisation des méthodes de construction. Cette démarche encourage en effet l'exploration de matériaux alternatifs et de techniques de production créatives. Elle s'impose également comme un élément central de l'économie circulaire, en réinventant des matériaux jugés inutiles pour en faire des ressources à haute valeur ajoutée. Ce repositionnement permet non seulement de limiter le gaspillage, mais aussi d'instaurer des cycles de production vertueux, où les déchets servent de base à 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.

II.3. Classification des déchets utilisés et leurs effets sur les propriétés des géopolymères :

II.3.1. Déchets industriels :

II.3.1.1. Déchets de démolition de béton :

Les déchets de construction et de démolition, tels que le béton concassé ou les granulats recyclés, sont des ressources précieuses qui peuvent être intégrées dans la formulation des géopolymères. Ces déchets, qui proviennent des activités de construction, de rénovation et de démolition, représentent une source abondante de matériaux qui peuvent être valorisés dans les géopolymères.

L'intégration de ces déchets dans les géopolymères présente de nombreux avantages. Tout d'abord, cela permet de réduire la quantité de déchets de construction envoyés aux sites d'enfouissement, contribuant ainsi à la gestion durable des déchets et à la préservation des ressources naturelles. En utilisant les déchets de construction et de démolition comme matières premières, on évite l'extraction de nouvelles ressources naturelles, ce qui réduit l'impact environnemental associé à leur exploitation [47].

De plus, l'utilisation de ces déchets dans les géopolymères contribue à promouvoir le principe de l'économie circulaire. Plutôt que de considérer les déchets de construction et de démolition comme une simple nuisance à éliminer, ils sont transformés en ressources valorisables. Cette approche favorise la réutilisation des matériaux existants, réduisant ainsi la demande de nouvelles matières premières et les émissions de gaz à effet de serre associées à leur production [48].

Les déchets de construction et de démolition peuvent être utilisés de différentes manières dans les géopolymères. Par exemple, le béton concassé peut être utilisé comme granulats dans la formulation des géopolymères, remplaçant ainsi partiellement les granulats traditionnels. Les granulats recyclés, obtenus à partir du concassage et du tri des débris de béton, peuvent être intégrés dans les mélanges de géopolymères, offrant une solution durable pour la production de matériaux de construction [47].

En intégrant ces déchets dans les géopolymères, on améliore également les performances des matériaux finaux. Les déchets de construction et de démolition, tels que le béton concassé, peuvent contenir des particules fines et des matériaux réactifs qui contribuent à renforcer les propriétés mécaniques des géopolymères. De plus, l'utilisation de ces déchets peut permettre d'obtenir des géopolymères présentant des caractéristiques spécifiques, telles qu'une meilleure résistance à l'abrasion ou une plus grande durabilité [47].

II.3.1.2. Déchets de la brique en terre cuite :

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 [49]. 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 [50]. Certaines études ont également utilisé ces activateurs individuellement [51] [52]. Des recherches antérieures utilisaient 7 à 44 % d'activateur alcalin en masse du précurseur solide total [53]. 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 [54].

II.3.1.3. 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 μm , car ces petites particules pourraient réagir avec une solution alcaline, agissant comme précurseur ou matériau de remplissage pour les particules non réactives [55],[56].

Une substitution importante de granulats de déchets céramiques (GDC) a également été étudiée, entraînant une augmentation progressive parallèlement à l'augmentation du remplacement [57]. 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 granulat issu 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 [58].

II.3.1.4. 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 taux de recyclage (20 à 28 %) aux États-Unis [59]. Cependant, des études récentes sur un géopolymère à base de poudre de verre (GP) sans ciment semble confirmer l'idée que les déchets de verre sont une ressource pour le béton géopolymère [60],[61]. 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 ($\sim 70\% \text{ SiO}_2$). De plus, la composition chimique des déchets de verre est généralement stable puisque la majorité des produits verriers sont en verre sodocalcique [62]. La figure 5 (a) et (b) montre respectivement l'image tel que reçu et du verre recyclé sous forme de poudre [63].



Figure 5 : (a) les verres usagés tels que reçus (b) la poudre de verre recyclée

II.3.1.5. Déchets de plastique :

Les déchets plastiques, responsables de dommages graves aux écosystèmes, à la biodiversité marine et à la santé publique, constituent aujourd'hui une urgence écologique mondiale. Les méthodes classiques de gestion des déchets, comme l'enfouissement ou l'incinération, s'avèrent contre-productives, amplifiant la pollution et accélérant l'épuisement des ressources naturelles. Face à ces enjeux, l'adoption de solutions innovantes pour valoriser ces déchets s'impose comme une nécessité [64]. Parallèlement, le secteur du bâtiment, grand émetteur de gaz à effet de serre, contribue significativement à cette crise, notamment via la production de ciment Portland, composant clé du béton traditionnel [65].

Dans ce contexte, les alternatives écologiques au béton classique, comme le béton géopolymère, gagnent en pertinence. Ce matériau substitue le ciment Portland par des résidus industriels (cendres volantes, scories, etc.), réduisant ainsi l'empreinte carbone liée à la fabrication des liants [66][67]. Son potentiel pour limiter les émissions et optimiser la consommation énergétique en fait un pilier prometteur de la construction durable [68]. L'intégration de plastique recyclé dans ce béton offre même une double opportunité : d'une part, recycler efficacement des déchets plastiques en les intégrant à un cycle productif ; d'autre part, améliorer les propriétés mécaniques et fonctionnelles du matériau [69]. Des études plus approfondies sont nécessaires pour découvrir tout le potentiel du béton géopolymère lorsque du plastique recyclé y est ajouté [70] [71].

II.3.2. Déchets agricoles et biomasses :

La combustion de biomasse dans le secteur agricole soulève d'importantes inquiétudes environnementales, notamment en raison de ses effets néfastes sur la qualité de l'air et les risques sanitaires associés, particulièrement dans les régions agricoles. Selon la Réf [72], près de 750 téragrammes (Tg) de biomasse sont brûlés annuellement en Asie, dont environ 250 Tg (33,3 %) proviennent de brûlages à l'air libre. L'Inde et la Chine contribuent à eux seuls à des volumes significatifs, avec respectivement 84 Tg et 10 Tg de biomasse incinérée en plein champ. Face à l'augmentation mondiale des volumes de cendres et aux coûts croissants de leur élimination, la recherche de solutions durables pour valoriser ces résidus devient urgente [73].

Les cendres issues de résidus agricoles émergent ainsi comme une ressource prometteuse pour l'industrie cimentière, grâce à leur disponibilité, leur faible coût et leur réactivité chimique dans

les mélanges de béton. Parallèlement, d'autres sous-produits industriels (cendres de charbon, métakaolin, fumée de silice, scories) et agro-industriels (cendres de balle de riz ou de déchets d'huile de palme) sont de plus en plus intégrés dans la fabrication du béton. Cette pratique permet d'éviter leur combustion non maîtrisée ou leur stockage en décharge, sources de pollution des sols, de l'eau et de l'atmosphère [74].

Cette valorisation renforce à la fois la rentabilité et l'empreinte écologique de l'industrie du béton. En effet, les cendres de biomasse, riches en silice, possèdent des propriétés pouzzolaniques lorsqu'elles sont calcinées dans des conditions contrôlées, ce qui en fait des substituts partiels au ciment traditionnel. De plus, leur finesse après broyage améliore la compacité du béton, optimisant ses performances mécaniques. Ainsi, cette approche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, combinant réduction des déchets, utilisation de ressources renouvelables et promotion d'un développement industriel durable.

II.3.2.1. Cendres de balle de riz :

Chaque année, la production mondiale de paille de riz atteint des volumes colossaux, oscillant entre 685 et 731 millions de tonnes [75]. Malheureusement, une grande partie de ces résidus est incinérée en plein champ (Figure 5) [76].



Figure 6 : Génération de cendres de paille de riz.

Une pratique qui libère un cocktail de polluants toxiques : monoxyde de carbone, méthane, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, et autres particules cancérigènes comme les dioxines [77]. Cette combustion, responsable de 5 à 10 % des émissions mondiales de méthane – un gaz au pouvoir réchauffant bien supérieur au CO₂ –, aggrave à la fois la crise climatique et les risques sanitaires, notamment dans les régions rizicoles.

Pourtant, ces déchets agricoles recèlent une valeur insoupçonnée. La combustion de la paille génère des cendres de paille de riz (CPR), un matériau aux propriétés pouzzolaniques

prometteuses pour l'industrie cimentaire. brûler 1 000 kg de paille produit environ 150 kg de cendres, dont 15 % se présentent sous forme de cendres grises riches en silice (82 %), dotées d'une surface spécifique impressionnante (18 460 cm²/g) et d'une densité de 2,25. Des études explorent ainsi leur incorporation dans des bétons et mortiers, avec des taux de remplacement du ciment Portland allant jusqu'à 5 % et 10 %, respectivement.

Cependant, cette substitution n'est pas sans défis. Les CPR, par leur morphologie irrégulière et leur surface poreuse, altèrent la maniabilité des mélanges. Par exemple, un béton enrichi en CPR affiche un affaissement moyen de 70 mm, nécessitant un ajout d'eau supplémentaire pour atteindre une consistance pratique. Les tests de fluidité (T50 : 3 à 7 s ; entonnoir en V : 7,3 à 14,4 s) et les mesures d'affaissement dynamique (600 à 750 mm) confirment cette tendance. De plus, les temps de prise – initiale et finale – s'allongent proportionnellement au taux de CPR, tout comme la demande en eau pour stabiliser le mélange [76].

Malgré ces contraintes techniques, les CPR incarnent une opportunité duale : réduire l'impact environnemental du brûlage à ciel ouvert tout en offrant une alternative à faible coût aux matériaux traditionnels. Leur haute teneur en silice et leur réactivité chimique en font des candidates idéales pour des composites cimentaires durables, alignés sur les principes d'économie circulaire. Reste à optimiser leur intégration pour concilier performance structurelle, viabilité écologique et coûts maîtrisés – un défi clé pour l'avenir de la construction durable.

II.3.2.2. Boues d'épuration :

Ces dernières années, les cendres de boues d'épuration, issues de la calcination de résidus déshydratés, émergent comme une alternative prometteuse pour la synthèse de géopolymères. Cette innovation suscite un intérêt croissant face à une problématique majeure : en Chine, la production annuelle de boues d'épuration (Figure 6) [79] dépasse désormais 70 millions de tonnes, une conséquence directe de l'explosion de la consommation d'eau urbaine et industrielle. Ces boues, chargées en matières organiques, métaux lourds, pathogènes et autres contaminants, posent un défi environnemental critique. Les méthodes classiques d'élimination – épandage agricole, enfouissement ou pyrolyse – s'avèrent non seulement énergivores et destructrices pour les sols, mais aussi génératrices de pollutions secondaires [80].

Pourtant, ces déchets recèlent un potentiel insoupçonné. Leur composition riche en SiO₂, Al₂O₃ et CaO – des oxydes clés pour la formation de géopolymères – en fait des précurseurs aluminosilicatés compétitifs. Toutefois, leur structure cristalline (silice et alumine) limite

CHAPITRE II : Déchets dans les géopolymères

partiellement la dépolymérisation des tétraèdres de silicium et d'aluminium, essentielle à la réaction de géopolymérisation [81]. En revanche, dans les cendres de boues d'épuration traitées (SSA), le silicium et l'aluminium adoptent une forme amorphe, bien plus réactive. Cette configuration améliore significativement la cinétique de réaction, tout en optimisant les propriétés mécaniques et chimiques des géopolymères produits [82]. Ainsi, ces cendres transforment un déchet encombrant en ressource stratégique.



Figure 7 : boues d'épuration

II.3.2.3. Déchets des coquilles d'œuf:

Les coquilles d'œufs, souvent perçues comme des déchets banals, révèlent un potentiel insoupçonné dans la fabrication de géopolymères et de matériaux de construction. Transformées en poudre fine (PCO), elles peuvent se substituer partiellement au calcaire grâce à leur composition chimique unique : 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 [83]. Cette similitude avec le calcaire – traditionnellement utilisé comme charge dans le ciment, le béton et les briques [84] – ouvre la voie à des applications innovantes.

Intégrer la PCO dans les matrices cimentaires active l'hydratation du mélange, accélérant le durcissement et améliorant les performances mécaniques : résistance à la traction, à la compression et à la flexion s'en trouvent renforcées [85]. Une étude récente explore ainsi son utilisation dans le béton, offrant une alternative écologique à l'enfouissement en décharge [86]. Bien que la PCO soit employée depuis 1999 comme source de calcium pour synthétiser des

CHAPITRE II : Déchets dans les géopolymères

phosphates, son impact sur les propriétés du béton reste peu documenté, soulignant la nécessité de recherches approfondies.

Chaque année, le gaspillage de coquilles d'œufs génère un manque à gagner économique estimé à 10 milliards de dollars [87]. Leur valorisation dans le secteur de la construction répondrait donc à un double impératif. Sur le plan environnemental, elle réduit l'extraction de ressources naturelles (comme le calcaire) et limite l'accumulation de déchets organiques. Sur le plan technologique, elle favorise le développement de matériaux durables et performants, alignés sur les principes de l'économie circulaire.

Cette approche illustre comment des résidus quotidiens peuvent se muer en ressources stratégiques, transformant un problème de gestion des déchets en opportunité pour l'industrie de la construction. Reste à optimiser les procédés de substitution (dosages, compatibilité avec d'additifs) et à quantifier précisément les gains à long terme – autant de défis qui appellent à une collaboration entre scientifiques, ingénieurs et acteurs industriels.



Figure 8 : Déchets de coquilles d'œuf

II.4. Conclusion :

L'utilisation des déchets dans la fabrication des géopolymères revêt une importance significative à plusieurs niveaux. Tout d'abord, elle permet de résoudre le problème croissant de la gestion des déchets, en transformant des matériaux qui seraient autrement destinés à la décharge en ressources précieuses. Cela contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction de l'empreinte écologique de l'industrie de la construction.

CHAPITRE II : Déchets dans les géopolymères

Ensuite, l'utilisation des déchets dans les géopolymères favorise la transition vers une économie circulaire, où les déchets deviennent des matières premières pour de nouveaux produits. Cela stimule l'innovation et encourage l'adoption de pratiques plus durables dans l'industrie.

En fin, l'utilisation des déchets dans la fabrication des géopolymères est une approche prometteuse qui combine à la fois des avantages environnementaux, économiques et techniques. Elle offre des solutions durables pour l'industrie de la construction, en réduisant les déchets, en préservant les ressources et en contribuant à la construction d'un avenir plus durable.

CHAPITRE III
Généralités sur la Rhéologie et le Retrait

III.1. Généralité :

La rhéologie est un mot créé aux états unis en 1928 par Eugène Cook Bingham (1878-1945), elle englobe de nombreuses disciplines fondamentales telles que la physique, la résistance des matériaux, la mécanique des fluides et la mécanique des solides (ex : la plasticité).

La rhéologie étudie les rapports entre **la viscosité, la plasticité et l'élasticité** de la matière, ainsi que le comportement de celle-ci sous l'influence des pressions. Elle est la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière. Elle a pour objet d'analyser les comportements mécaniques des substances et d'établir leurs lois de comportement.

La rhéologie traite tous les aspects de la matière, liquides soient-ils ou solides, elle présente un intérêt particulier par son habilité à l'analyse des problèmes liées aux substances, dont l'aspect présente un état intermédiaire entre un solide parfaitement élastique et un liquide tout à fait visqueux. La rhéologie en tant que discipline, s'intéresse à un éventail très important de corps : pâte cimentaire ou béton, les boues de forage et les sédiments cohésifs, métaux, plastique, produits pétroliers, verres, bois, liquides biologiques, produits alimentaires et pharmaceutiques...etc.

III.2. Introduction :

Les géopolymères, matériaux inorganiques formés par activation alcaline de précurseurs aluminosilicatés (comme les cendres volantes, les métakaolins ou les laitiers de haut fourneau) et de solutions alcalines, suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés mécaniques, de leur durabilité et de leur faible empreinte carbone comparativement au ciment Portland. La rhéologie des géopolymères constitue un domaine clé pour appréhender le comportement de ces matériaux innovants sous diverses sollicitations. Leur rhéologie qui étudie la déformation et l'écoulement, est essentielle pour optimiser leur mise en œuvre dans des secteurs tels que la construction. Par exemple, la compréhension de la viscosité et du temps de prise permet d'adapter les formulations pour allier maniabilité et performances mécaniques [89]. Les interactions entre composition chimique, teneur en liquide et conditions de durcissement modulent leurs propriétés rhéologiques, notamment les effets viscoélastiques critiques lors du façonnage [90].

III.3. Définition de la rhéologie des géopolymères :

La rhéologie des géopolymères se concentre sur l'analyse des propriétés d'écoulement et de déformation de la pâte géopolymère avant sa prise. Contrairement aux pâtes de ciment traditionnelles, les géopolymères présentent une microstructure et une cinétique de réaction distinctes, liées à la polycondensation des précurseurs aluminosilicatés en présence d'activateurs alcalins (ex. NaOH, silicate de sodium). Leur comportement rhéologique est donc fortement influencé par des paramètres chimiques, physiques et structuraux.

III.4. Lois de comportement rhéologique :

Les lois du comportement rhéologique jouent un rôle fondamental dans la compréhension de la réponse des géopolymères lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques ou lors de leur mise en œuvre [91]. Ces lois établissent une relation mathématique entre la contrainte (σ) et la déformation (ϵ), ou son taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$), permettant de décrire la réponse viscoélastique, plastique ou thixotrope de ces matériaux. Leur modélisation est indispensable pour concevoir des géopolymères adaptés à des applications structurelles ou environnementales exigeantes [92]. Le comportement rhéologique des géopolymères à l'état frais est généralement non-newtonien, ce qui signifie que leur viscosité varie en fonction du taux de cisaillement. Plusieurs modèles peuvent décrire ce comportement :

- ✚ **Modèle de Bingham:** Ce modèle décrit un fluide viscoplastique qui ne commence à s'écouler qu'au-dessus d'un seuil de contrainte (seuil de cisaillement). Au-delà de ce seuil, la relation entre la contrainte et le taux de cisaillement est linéaire. L'équation du modèle de Bingham est donnée par :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \text{ où}$$

τ : est la contrainte de cisaillement

τ_0 : est le seuil de cisaillement

η_p : est la viscosité plastique

$\dot{\gamma}$: est le taux de cisaillement.

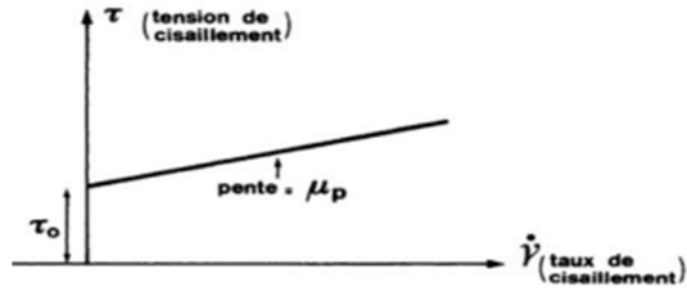


Figure 9 : la relation entre la tension de cisaillement et le taux de cisaillement.

- ✚ **Modèle de Herschel-Bulkley:** Ce modèle est une généralisation du modèle de Bingham qui permet une relation non-linéaire entre la contrainte et le taux de cisaillement au-delà du seuil de cisaillement. L'équation est :

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \text{ où}$$

K : est le coefficient de consistance

n : est l'indice de comportement à l'écoulement. Si $n < 1$, le fluide est rhéofluidifiant (pseudo plastique), et si $n > 1$, il est rhéoépaississant (dilatant).

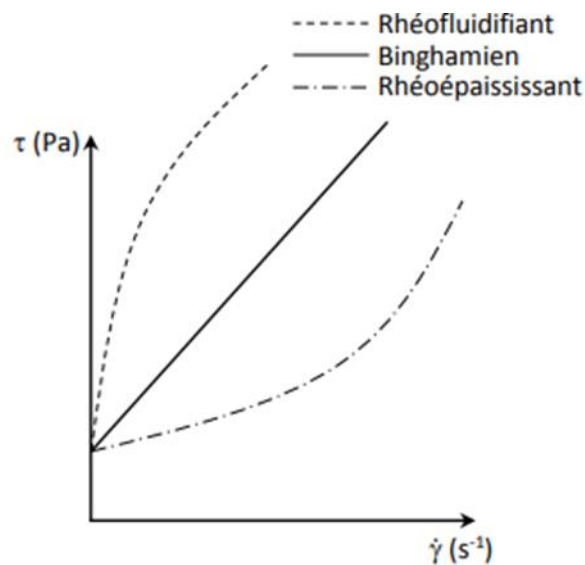


Figure 10 : Comportement viscoplastique

- ✚ **Comportement Thixotrope:** De nombreuses pâtes géopolymériques présentent une thixotropie, caractérisée par une diminution de la viscosité au cours du temps sous un taux de cisaillement constant, suivie d'une récupération de la viscosité

lorsque le cisaillement est supprimé. Ce comportement est important pour des applications telles que l'impression 3D ou le pompage [93].

L'étude des **rhéogrammes** (courbes de contrainte en fonction du taux de cisaillement) permet de visualiser le comportement rhéologique d'un géopolymère et de déterminer les paramètres des modèles rhéologiques appropriés.

III.5. Techniques de caractérisation rhéologique des géopolymères :

Diverses techniques expérimentales sont utilisées pour étudier la rhéologie des géopolymères:

III.5.1. Viscosimètres : Ces instruments mesurent la résistance d'un fluide à l'écoulement. Il existe Différents types de viscosimètres sont utilisés en fonction de la plage de viscosité et des conditions de cisaillement souhaitées tels que :

III.5.1.1 Viscosimètres à cylindres coaxiaux (Couette) : L'échantillon est placé entre deux cylindres coaxiaux. L'un des cylindres est mis en rotation à une vitesse connue, et le couple exercé sur l'autre cylindre est mesuré, permettant de déterminer la viscosité.

III.5.1.2 Viscosimètres à cône-plan : L'échantillon est placé entre un cône et un plateau. La rotation du cône à une vitesse contrôlée permet de mesurer la contrainte de cisaillement et de déterminer la viscosité en fonction du taux de cisaillement.

III.5.1.3 Viscosimètres capillaires : Le temps d'écoulement d'un volume connu de l'échantillon à travers un tube capillaire de dimensions précises est mesuré sous l'effet d'une pression. La viscosité peut ensuite être calculée à partir de ces paramètres.

III.5.2. Rhéomètre : est un instrument de laboratoire conçu pour mesurer les propriétés rhéologiques d'un fluide ou d'un matériau semi-solide. Son principe de fonctionnement général consiste à appliquer une contrainte contrôlée à l'échantillon et à mesurer la déformation ou le taux de déformation résultant, ou inversement, à imposer une déformation ou un taux de déformation et à mesurer la contrainte nécessaire pour maintenir cet état.

III.5.2.1 Les rhéomètres rotatifs : sont couramment utilisés pour étudier le comportement des géopolymères. Ils peuvent être configurés avec différentes géométries de mesure (cône-plan, plateau-plateau, cylindres coaxiaux) en fonction des caractéristiques de l'échantillon et du type d'essai souhaité.

III.5.2.2 Les essais oscillatoires : réalisés avec un rhéomètre permettent d'étudier le comportement viscoélastique des géopolymères en mesurant les modules de conservation (G') et de perte (G''), qui représentent respectivement la composante élastique et visqueuse du matériau.

III.5.3. Rhéomètres et leurs principes de fonctionnement :

Un rhéomètre est un instrument sophistiqué conçu pour mesurer les propriétés rhéologiques des liquides et des matériaux semi-solides. Les rhéomètres rotatifs sont couramment utilisés pour les géopolymères. Leur principe de fonctionnement repose sur l'application d'une contrainte de cisaillement contrôlée à l'échantillon placé entre deux surfaces (par exemple, un cône et un plateau, ou deux cylindres coaxiaux).

- ❖ Un moteur contrôle la rotation de l'une des surfaces à une vitesse angulaire précise, ce qui impose un taux de cisaillement à l'échantillon.
- ❖ Un capteur de couple mesure la résistance de l'échantillon à cette rotation, permettant de déterminer la contrainte de cisaillement.
- ❖ En variant le taux de cisaillement et en mesurant la contrainte correspondante, on peut obtenir la rhéogramme du matériau (contrainte en fonction du taux de cisaillement) et déterminer les paramètres des modèles rhéologiques.
- ❖ Les rhéomètres peuvent également fonctionner en mode oscillatoire, où une déformation sinusoïdale est appliquée à l'échantillon. La réponse en contrainte permet de déterminer les modules de conservation (G') et de perte (G''), qui caractérisent respectivement le comportement élastique et visqueux du matériau [94].

III.6. Paramètres rhéologiques mesurés :

Les mesures rhéologiques permettent de déterminer plusieurs paramètres clés pour caractériser le comportement des géopolymères à l'état frais :

- **Viscosité (η)** : La résistance à l'écoulement, qui peut être apparente (pour les fluides non-newtoniens) ou plastique (dans le modèle de Bingham).
- **Seuil de cisaillement (τ_0)** : La contrainte minimale requise pour initier l'écoulement.
- **Coefficient de consistance (K) et indice de comportement à l'écoulement (n)** : Décrit le comportement non-newtonien selon le modèle de Herschel-Bulkley.

- **Module de conservation (G')** et **module de perte (G'')** : Quantifient le comportement viscoélastique en mode oscillatoire.
- **Limite d'élasticité dynamique** : Contrainte au-delà de laquelle le comportement viscoélastique linéaire n'est plus observé en mode oscillatoire [95].

III.7. Influence des paramètres de formulation sur la rhéologie :

La rhéologie des géopolymères est fortement dépendante de plusieurs paramètres de formulation :

- **Nature et quantité du précurseur** : La taille des particules, leur morphologie et leur réactivité influencent la viscosité et le seuil de cisaillement. Par exemple, une plus grande finesse des particules tend à augmenter la viscosité.
- **Solution activatrice** : La concentration et le type d'alcali (NaOH, KOH, silicate de sodium, etc.) affectent la vitesse de dissolution du précurseur et la formation du gel géopolymérique, modifiant ainsi la rhéologie. Une concentration plus élevée en alcali peut entraîner une prise plus rapide et une augmentation de la viscosité.
- **Rapport liquide/solide (L/S)** : Un rapport L/S plus élevé diminue la viscosité et améliore la fluidité du mélange.
- **Adjuvants** : L'ajout de superplastifiants peut réduire considérablement la viscosité, améliorant la maniabilité sans augmenter la teneur en eau. Des retardateurs de prise peuvent également être utilisés pour modifier l'évolution de la rhéologie dans le temps.
- **Température** : La température peut influencer la vitesse de la réaction de géopolymérisation et donc la rhéologie. Des températures plus élevées peuvent accélérer la prise et augmenter la viscosité.
- **Temps de mélange** : La durée et l'intensité du mélange peuvent affecter la dispersion des particules et l'homogénéité de la pâte, ce qui a un impact sur les propriétés rhéologiques [9].

III.8. Introduction :

Le retrait des géopolymères désigne la réduction dimensionnelle subie par ces matériaux lors de leur synthèse et de leur durcissement. Contrairement au béton traditionnel, dont le durcissement repose sur l'hydratation du ciment Portland, les géopolymères se forment via une

réaction de polymérisation alcaline entre des précurseurs aluminosilicatés (cendres volantes, métakaolin, laitier) et une solution alcaline (hydroxyde de sodium ou silicate de sodium) [9]. Ce processus génère une matrice tridimensionnelle rigide, mais s'accompagne de contractions dues à des phénomènes physico-chimiques complexes. Le retrait, s'il n'est pas maîtrisé, peut entraîner des fissures compromettant la durabilité et les performances mécaniques des structures [96].

III.9. Les particularités du retrait des géopolymères :

Les géopolymères présentent des comportements de retrait distincts du béton traditionnel, influencés par leur composition chimique, leur microstructure et les conditions de synthèse. Leur retrait résulte de :

- **L'évaporation de l'eau libre** : ou du solvant alcalin.
- **La réorganisation structurale** : lors de la polymérisation.
- **Les gradients thermiques** : liés à l'exothermie de la réaction.
- **La contraction chimique** : due à la consommation de phases liquides.

Contrairement au béton, où le retrait endogène domine, les géopolymères sont particulièrement sensibles au **retrait plastique** et **chimique**, en raison de leur cinétique de durcissement rapide et de leur faible teneur en eau résiduelle [97].

III.10. Les types du retrait des géopolymères :

Les géopolymères, matériaux inorganiques à base d'aluminosilicates, présentent quatre types principaux de retrait, chacun associé à des mécanismes physico-chimiques distincts, des facteurs d'influence spécifiques et des conséquences structurelles variées :

III.10.1. Retrait de séchage (dessiccation) :

Lié à l'évaporation de l'eau libre contenue dans les pores superficiels après la phase de durcissement. Bien que les géopolymères affichent une microstructure généralement moins poreuse que le béton ordinaire (grâce à leur matrice dense), leur retrait de séchage reste mesurable, avec des valeurs typiques de **200 à 400 $\mu\text{m}/\text{m}$** [98].

Facteurs d'influence :

CHAPITRE III : Généralités sur la Rhéologie et le Retrait

- **Environnement** : Une humidité relative (HR) inférieure à 60 % accélère l'évaporation, exacerbant le retrait.
- **Composition** : Les formulations à base de cendres volantes, dotées d'un réseau poreux fermé, limitent la perte d'eau [99].

Conséquences :

Apparition de **fissures superficielles en réseau** (faïençage), particulièrement en l'absence de cure humide prolongée (>7 jours).

III.10.2. Retrait plastique :

Contraction intervenant durant la phase **pré-durcissement** (avant polymérisation complète), déclenchée par une évaporation rapide de l'eau ou de l'activateur alcalin. Ce phénomène, critique dans les **24 premières heures**, peut générer des déformations allant jusqu'à **1–3 mm/m**[100].

Facteurs aggravants :

- **Conditions extrêmes** : Vent (>15 km/h), températures >30°C, ou HR <40 %.
- **Formulation** : Un excès d'activateur alcalin (rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} > 1,5$) augmente la réactivité et la sensibilité au retrait [101].

Conséquences :

Développement de **fissures aléatoires ou parallèles**, compromettant l'étanchéité et l'aspect esthétique des surfaces.

III.10.3. Retrait chimique (autodessication) :

Réduction de volume induite par la **consommation d'eau** lors des réactions de polycondensation alcaline. La formation de liaisons Si-O-Al remplace progressivement l'eau interstitielle, entraînant une contraction interne estimée entre **300 et 700 $\mu\text{m/m}$** [102].

Facteurs d'influence :

- **Réactivité des précurseurs** : Le métakaolin, plus réactif que les cendres volantes, génère un retrait accru.
- **Concentration de l'activateur** : Des solutions alcalines concentrées (NaOH .10M) accélèrent la réaction, amplifiant la contraction [103].

Conséquences :

Risque de **fissuration en masse**, pouvant affecter la résistance mécanique et la durabilité à long terme.

III.10.4. Retrait thermique :

Contraction associée au **refroidissement** postérieur à la phase exothermique de polymérisation. Bien que l'élévation de température soit modérée ($\Delta T \approx 20-40^\circ\text{C}$ contre $50-70^\circ\text{C}$ pour le béton traditionnel), ce retrait impacte principalement les éléments massifs (>50 cm), avec des déformations de **100–300 $\mu\text{m}/\text{m}$** [104].

Facteurs d'influence :

- **Épaisseur** : Les gradients thermiques sont prononcés dans les sections épaisses, favorisant les contraintes internes.
- **Type de précurseur** : Les géopolymères à base de laitier libèrent davantage de chaleur que ceux à base de cendres volantes [105].

Conséquences :

Apparition de **fissures profondes**, souvent synergiques avec le retrait chimique, nécessitant des joints de dilatation ou un contrôle actif de la température.

III.11. Mesure du retrait des géopolymères :

Le retrait est mesuré conformément aux normes **NF P 18-427** [106] et **ASTM C157/C157M** [104]. L'essai consiste à mesurer la variation de la longueur entre deux faces opposées d'éprouvettes prismatiques durcies équipées de plots. Les éprouvettes prismatiques sont de dimensions $7 \times 7 \times 28$ cm ou $4 \times 4 \times 16$ cm.

La mesure se fait à l'aide d'un appareil spécifique muni d'un comparateur (rétractomètre) [107]. Pendant toute la durée de l'essai, les éprouvettes sont conservées en laboratoire en conditions régulées (généralement à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$).

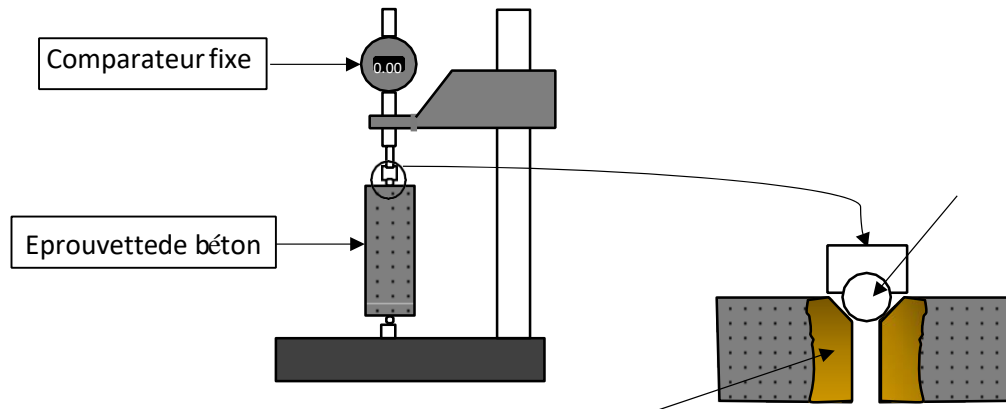


Figure 11: Mesure du retrait sur une éprouvette à l'aide d'un rétractomètre.

III.12. Conclusion :

La compréhension des modèles rhéologiques et des lois de comportement des géopolymères est fondamentale pour leur développement et leur utilisation dans divers domaines de l'ingénierie civile et des sciences des matériaux. Les modèles de Bingham et d'Herschel-Bulkley sont particulièrement pertinents pour décrire leur comportement viscoplastique et la présence d'un seuil de contrainte. La recherche continue dans ce domaine est essentielle pour perfectionner ces modèles et développer des formulations de géopolymères avec des propriétés rhéologiques optimisées pour des applications spécifiques.

Le retrait des géopolymères, un mécanisme complexe découlant de leur polymérisation alcaline, se manifeste sous quatre formes distinctes. Ces déformations, souvent cumulatives, génèrent des fissures pouvant compromettre la durabilité, l'étanchéité et les propriétés mécaniques des structures. En contrôlant ces mécanismes et en adoptant des protocoles de mesure standardisés, il est possible de valoriser les avantages des géopolymères, tels que leur faible empreinte écologique et leur excellente résistance aux agressions. Cette approche favorise le développement d'applications innovantes et durables dans le secteur de la construction.

CHAPITRE IV
Matériaux et Méthode expérimentale

IV.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 l'étalement, ainsi que des tests mécaniques tels que la résistance à la compression et la flexion, 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.

IV.2. Matériaux et caractérisation :

IV.2.1. Sable :

Dans cette étude ont été utilisés deux types de sable : le sable de dune et le sable concassé (Figure 17), qui se distinguent par leurs caractéristiques granulaires. Le sable concassé possède des grains anguleux avec des particules fines en surface, contrairement au sable de dune dont les grains sont arrondis et la surface nette.



Figure 12 : Les apparences des sables utilisés

La distribution granulométrique des sables est représentée dans la Figure 13, et leurs propriétés physiques sont détaillées dans le Tableau 1.

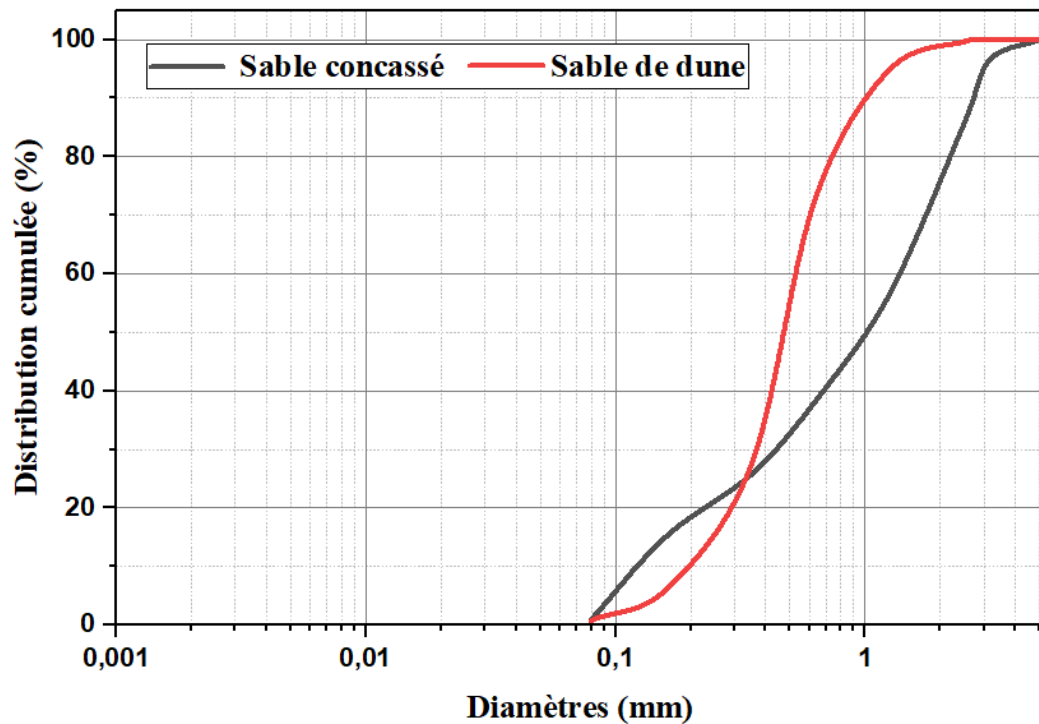


Figure 13 : Granulométries des sables utilisés

Tableau 1 : Propriétés physiques des sables utilisés

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

IV.2.2. Précurseurs :

Cette section présente les trois principaux précurseurs utilisés dans notre étude pour la formulation de composites géopolymères : le laitier de haut fourneau (LHF), la poudre de brique (PB) et la poudre de fines recyclées (PFR). Chacun apportant des contributions uniques aux propriétés finales du matériau (Figure 14). Chaque précurseur a fait l'objet d'une caractérisation approfondie pour évaluer sa composition chimique et d'autres caractéristiques pertinentes.

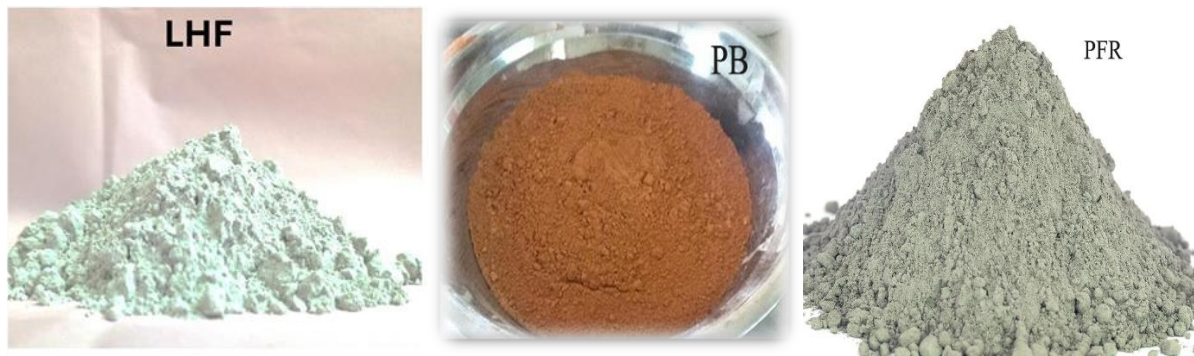


Figure 14 : Apparences des précurseurs utilisés

Le tableau 2 présente les compositions chimiques des précurseurs. Le LHF est principalement composé de calcium, de silice et d'alumine, tandis que la PFR affiche une teneur élevée en calcium et en silice. La PB présente une proportion notable de l'alumine, contribuant ainsi à sa réactivité dans les mélanges géopolymères.

Tableau 2 : Composition chimique des précurseurs.

%	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃
Laitier	43.2	41.1	7	2.8	0.32	0.6	4.7	-	-	0.25
Brique	3.5	55.2	17.6	7.4	3.6	1.82	1.76	0.19	0.962	0.60
Fines Recyclées	39.2	47.6	3.25	3.43	0.62	0.605	2.29	0.34	0.206	1.56

La Figure 15 montre les courbes de distribution de la taille des particules des précurseurs, mesurées à l'aide d'un analyseur de taille des particules.

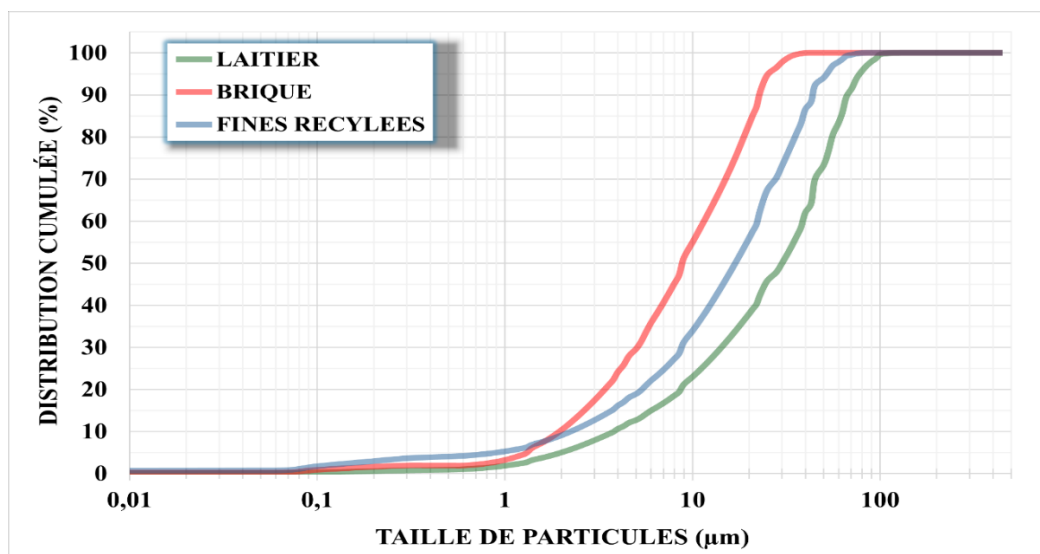


Figure 15 : Courbes granulométriques des précurseurs

IV.2.3. Activateurs :

IV.2.3.1. 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 le laboratoire SPECILAB Ce produit est distribué par la société PROCHIMA SIGMA, qui est basée à Tlemcen 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 ₂ O 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 (400,00 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 16).



Figure 16 : 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.

IV.2.3.2. Silicates de sodium :

Les silicates de sodium utilisés dans cette étude sont Sild2.0/45 ont été fournis par SARL GINIE CHIMIE à SIDI AISSA M'SILA. Comme indiqué dans la Figure 17. Les caractéristiques physico-chimiques de ce silicate de sodium sont résumées de manière synthétique dans le Tableau 4.



Figure 17 : 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

IV.3. Méthode Expérimentale :

IV.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 brique (PB), le deuxième groupe utilisant la poudre de fines recyclées (PFR), et le troisième groupe consistant en des mélanges ternaires combinant deux types de déchets différents.

Tableau 5 : Compositions des mélanges confectionnés.

	0B-0F	0B-7,5F	15B-15F	0B-15F	7,5B-7,5F	15B-7,5F	7,5B-0F	15B-0F	7,5B-15F
Laitier	767,83	710,24	537,48	652,65	652,65	595,07	710,24	652,65	595,07
Fine Recyclée	0,00	57,59	115,17	115,17	57,59	57,59	0,00	0,00	115,17
Brique	0,00	0,00	115,17	0,00	57,59	115,17	57,59	115,17	57,59
Sable silice	767,83	767,83	767,83	767,83	767,83	767,83	767,83	767,83	767,83
Sable Calcaire	628,22	628,22	628,22	628,22	628,22	628,22	628,22	628,22	628,22
NaOH	143,97	143,97	143,97	143,97	143,97	143,97	143,97	143,97	143,97
NaSiO₃	431,90	431,90	431,90	431,90	431,90	431,90	431,90	431,90	431,90
NaSiO₃/NaOH	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

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 et de 4x4x16 cm³ (voir Figure 18).



Figure 18 : Remplissage des moules

Pour faciliter les réactions de géopolymérisation, les spécimens ont été démolis au bout d'un jour (Figure 19) 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 19 : Les échantillons démoulés

IV.3.2. Essais expérimentaux :

Le rhéomètre utilisé était un rhéomètre coaxial développé par Soualhi et al. Il se compose de trois éléments : un agitateur à vitesse contrôlée muni d'un capteur de couple, une pale en forme de croix, et un récipient cylindrique (voir Fig. 20). Le profil de vitesse imposé est illustré dans la figure. Les paramètres rhéologiques ont été calculés en considérant le mortier comme un fluide de Bingham, selon l'équation suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

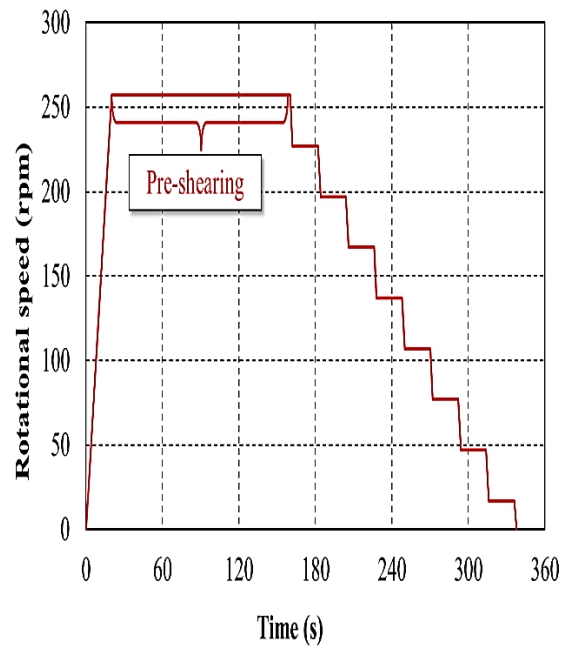
τ (Pa) est la contrainte de cisaillement,

τ_0 (Pa) la contrainte seuil,

μ (Pa·s) la viscosité plastique,
 γ' (1/s) le taux de cisaillement



(a) Rhéomètre utilisé



(b) Profil de vitesse de rotation imposé

Figure 20 : Rhéomètre utilisé pour mesure la rhéologie de mortiers étudiés

L'étalement des échantillons a été mesuré pour évaluer leur maniabilité (Figure 21) selon la norme ASTM C1437 [108].



Figure 21 : Essai d'étalement

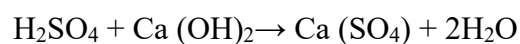
Ces propriétés physiques sont étroitement liées aux performances mécaniques, qui ont été évaluées par des tests de résistance à la compression et flexion effectués après 7,28 et 90 jours de durcissement (voir Figure 22), suivant les normes ASTM C109 [109].



Figure 22 : Essai de la résistance à la compression et la flexion

➤ Attaque chimique : Perte en masse

Selon la norme ASTM C1898, les éprouvettes ont été soumises à une série d'essais afin d'évaluer leur résistance à une attaque chimique. Après un processus initial de moulage pendant 24 heures, les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant une période de 28 jours, puis placés dans une chambre climatisée à une température de 25°C et une humidité de 55 % jusqu'à atteindre une masse constante. Ensuite, les échantillons ont été exposés à une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) à 3,5 %, afin de les soumettre à une agression chimique. Après un durcissement de 30, 60 jours, la perte de poids a été mesurée pour évaluer la durabilité des échantillons face à cette attaque chimique.



Acide sulfurique + hydroxyde de calcium = sulfate de calcium + eau



Figure 23 : la durabilité des géopolymères à base de laitier soumis à une attaque sulfurique

➤ Retrait

Le retrait a été mesuré sur des prismes ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) scellés immédiatement après le coulage. Les échantillons ont été démoulés après 24 heures, puis conservés pendant 100 jours dans un environnement contrôlé (30 % d'humidité relative, 23 °C). Les mesures de déformation ont été effectuées à l'aide d'un rétractomètre, conformément à la norme NF P18-427

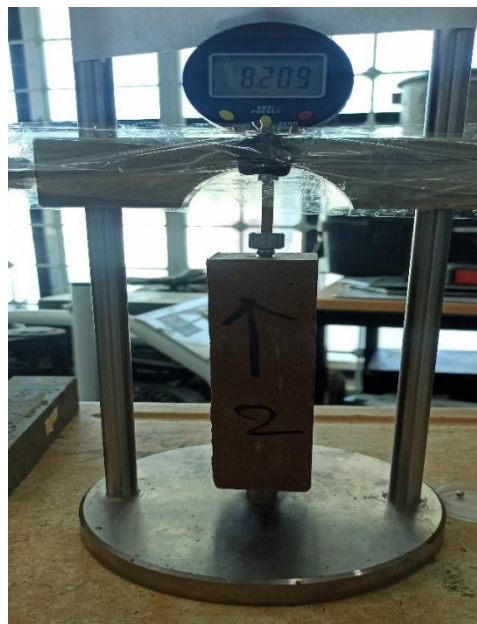


Figure 24 : Mesure de retrait à l'aide de rétractomètre

IV.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 l'étalement 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 V
Résultats et Discussions

V.1. Introduction :

Ce chapitre présente et analyse les résultats expérimentaux obtenus lors de l'évaluation des propriétés des géopolymères formulés à partir de laitier activé, avec des substitutions partielles par des matériaux recyclés, notamment des briques concassées et des fines recyclées. L'étude s'articule autour de deux axes principaux : les propriétés à l'état frais (étalement, seuil de cisaillement, viscosité) et les propriétés à l'état durci (résistances mécaniques, retrait, durabilité chimique). L'objectif est de déterminer l'impact de ces substitutions sur les performances des géopolymères, afin d'identifier des formulations optimisées conciliant performance technique et valorisation de déchets, dans une optique de construction durable.

V.2. Propriétés à l'état frais :

V.2.1. L'étalement :

Figure 23 présente les résultats de l'étalement de différents mélanges.

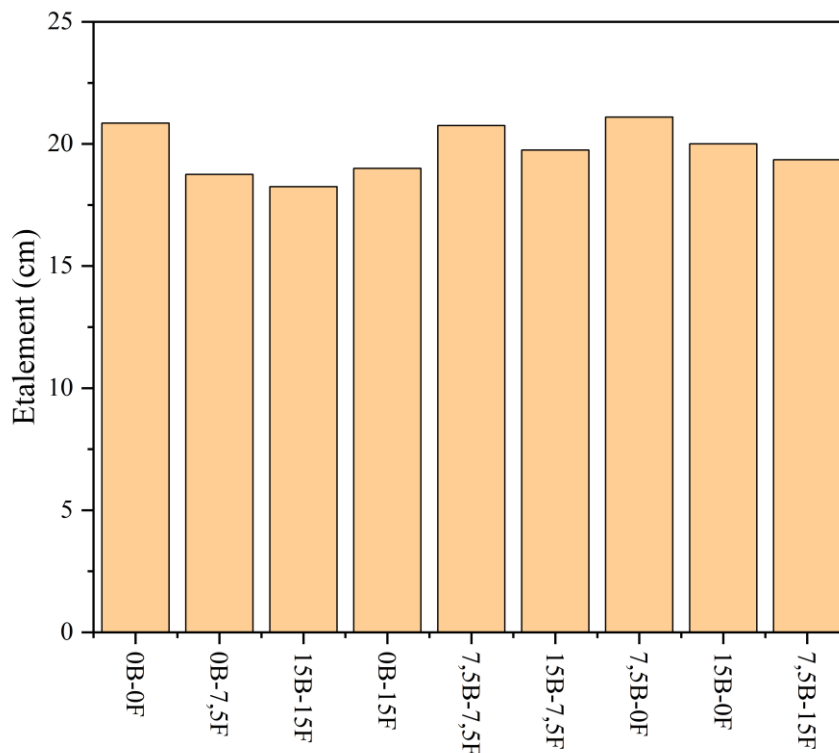


Figure 25: Étalement des différents mortiers utilisés

L'analyse de l'étalement des géopolymères présentée sur l'histogramme montre l'effet des différentes substitutions de matières premières sur la maniabilité des mélanges. Le témoin 0B-

0F présente un étalement initial élevé, aux environs de 21 cm, indiquant une bonne ouvrabilité du mélange sans incorporation de matériaux recyclés. L'introduction progressive des substitutions — notamment le remplacement partiel du laitier par des briques concassées et des fines recyclées — a un impact variable sur l'étalement. Par exemple, les formulations contenant 7,5% de brique et 7,5% de fines recyclées (7.5B-7.5F) présentent une légère diminution de l'étalement par rapport au témoin, traduisant une réduction modérée de la fluidité, probablement liée à l'absorption d'eau plus élevée des matériaux recyclés et à la modification de la granulométrie. Les mélanges avec 15% de fines ou de briques seuls (0B-15F, 15B-0F) montrent également des étalements inférieurs à celui du témoin, suggérant que l'augmentation de la quantité de substituts recyclés affecte davantage la rhéologie du système, possiblement en raison d'une demande en eau accrue et d'une moindre réactivité de ces matériaux vis-à-vis de l'activation alcaline. Toutefois, certains mélanges (notamment 15B-7.5F et 7.5B-0F) maintiennent un étalement relativement élevé, indiquant que des substitutions modérées et équilibrées entre briques et fines recyclées permettent de conserver des propriétés de mise en œuvre satisfaisantes. Globalement, ces résultats soulignent l'importance d'optimiser les pourcentages de substitution afin de préserver un bon compromis entre durabilité environnementale et propriétés d'application des géopolymères.

V.2.2. Seuil de cisaillement :

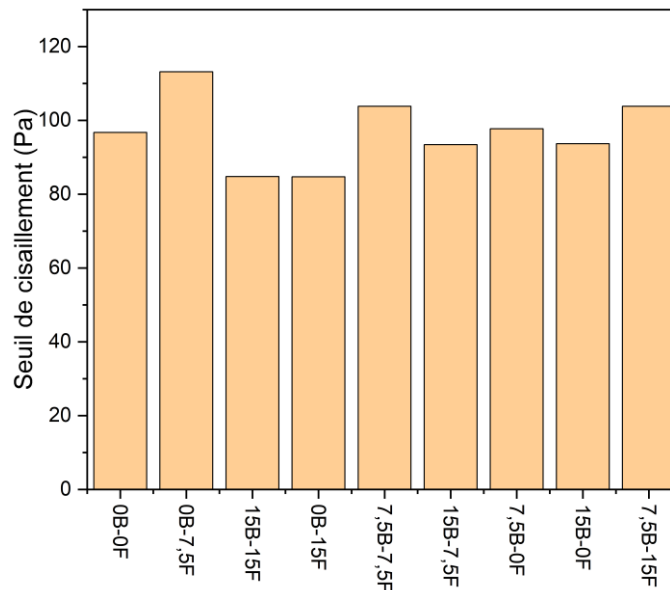


Figure 26: Seuil de cisaillement des différents mortiers utilisés

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

L'analyse du seuil de cisaillement des géopolymères met en évidence l'influence des substitutions de briques concassées et de fines recyclées sur la rhéologie des pâtes activées. Le mélange témoin 0B-0F présente un seuil de cisaillement de l'ordre de 95 Pa, indiquant une consistance initiale relativement fluide. L'introduction de 7,5% de briques et de 7,5% de fines (7.5B-7.5F) entraîne une légère diminution du seuil de cisaillement, traduisant une amélioration modérée de la maniabilité, possiblement en raison de la modification de la structure granulaire qui favorise un meilleur glissement des particules. Cependant, certaines substitutions spécifiques comme 0B-7.5F induisent une augmentation significative du seuil de cisaillement (environ 112 Pa), probablement en raison de l'absorption d'une partie de l'eau d'activation par les fines recyclées, réduisant ainsi la phase liquide libre et augmentant la résistance à l'écoulement. En revanche, les formulations contenant 15% de substituts (15B-15F et 0B-15F) affichent les seuils de cisaillement les plus faibles (aux alentours de 85 Pa), suggérant que des taux élevés de matériaux recyclés peuvent créer des structures internes moins cohésives et donc plus faciles à cisailier sous contrainte. Globalement, les variations observées reflètent la double influence des propriétés d'absorption des matériaux recyclés et de l'arrangement granulométrique sur la microstructure des géopolymères frais, où un équilibre optimal entre briques et fines permet de contrôler la rhéologie sans compromettre l'ouvrabilité. L'analyse croisée des résultats d'étalement et de seuil de cisaillement met en évidence des relations cohérentes mais complexes entre la maniabilité et le comportement rhéologique des géopolymères en fonction des taux de substitution. Globalement, une bonne ouvrabilité (grand étalement) est généralement associée à un faible seuil de cisaillement, traduisant une faible résistance interne au mouvement des particules sous contrainte. Les formulations 0B-15F et 15B-15F illustrent bien ce comportement : elles présentent les plus faibles seuils de cisaillement (≈ 85 Pa) et des étalements relativement faibles (≈ 18 cm), suggérant que l'introduction de quantités importantes de fines recyclées réduit la cohésion interne mais affecte aussi la fluidité par absorption de l'eau libre. A l'inverse, la formulation 0B-7.5F présente un comportement particulier avec un seuil de cisaillement élevé (≈ 112 Pa) et un étalement plus faible (≈ 19 cm), indiquant une consistance plus ferme probablement liée à l'absorption rapide de l'activateur alcalin par les fines à cette proportion spécifique. Le mélange témoin 0B-0F et les formulations équilibrées comme 7.5B-7.5F ou 15B-7.5F montrent quant à elles des compromis intéressants : des étalements élevés (>20 cm) associés à des seuils de cisaillement modérés, traduisant une bonne aptitude à l'écoulement sans perte de cohésion excessive. Ainsi, l'introduction équilibrée des briques et fines recyclées permet de moduler favorablement la rhéologie des géopolymères.

Le comportement observé résulte de plusieurs mécanismes simultanés : l'effet granulaire des briques (favorisant l'écoulement), l'absorption d'eau des fines (augmentant la viscosité), et la réactivité chimique potentiellement différente de ces matériaux vis-à-vis de la solution alcaline. Cette synergie complexe souligne l'importance de bien doser les matériaux recyclés pour garantir à la fois une bonne ouvrabilité et des propriétés mécaniques futures optimales.

V.2.3. Viscosité:

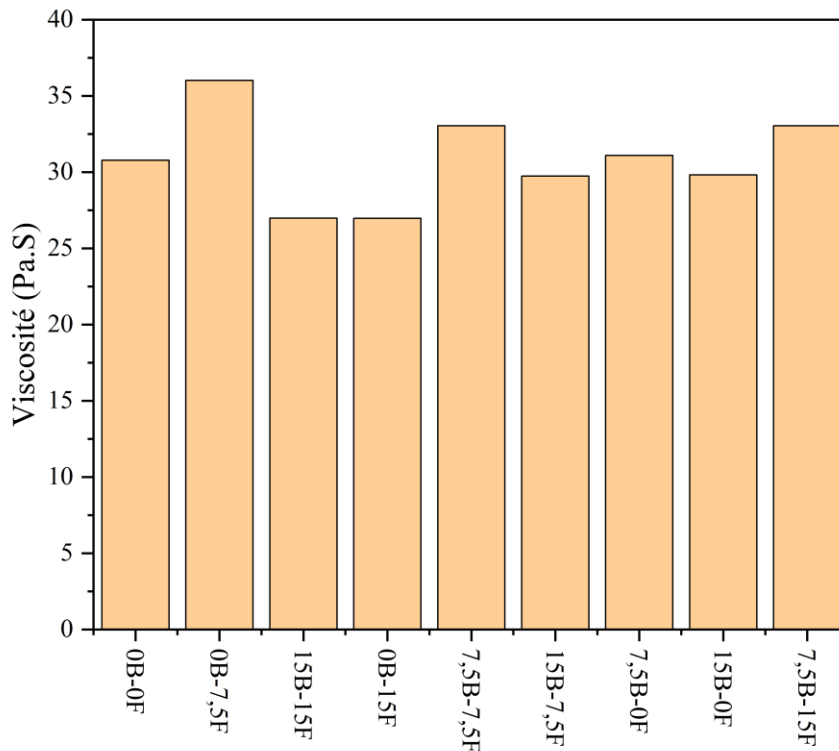


Figure 27: La viscosité des différents mortiers utilisés

L'analyse de la viscosité des mélanges géopolymères en fonction des taux de substitution du laitier par les briques et les fines révèle des comportements distincts. L'introduction de briques à faible teneur (7,5%) augmente la viscosité en raison de la structuration mécanique induite par leurs particules grossières limitant la mobilité des grains fins. À des pourcentages plus élevés (15%), les briques tendent à réduire la viscosité en favorisant une meilleure dispersion et en diminuant les frottements internes. En parallèle, l'incorporation des fines, riches en surface spécifique, augmente progressivement la viscosité en absorbant l'eau libre et en densifiant la matrice granulaire. Les substitutions combinées briques-fines génèrent des effets équilibrés : à

faible teneur en fines, l'effet lubrifiant des briques prédomine, tandis qu'à haute teneur en fines (15%), la viscosité s'élève sous l'effet de la compacité accrue. Ainsi, la rhéologie des géopolymères peut être optimisée par un dosage judicieux des briques et des fines afin de répondre aux exigences de fluidité et de mise en œuvre.

V.3. Propriétés a état durcie :

V.3.1. Résistance à la compression :

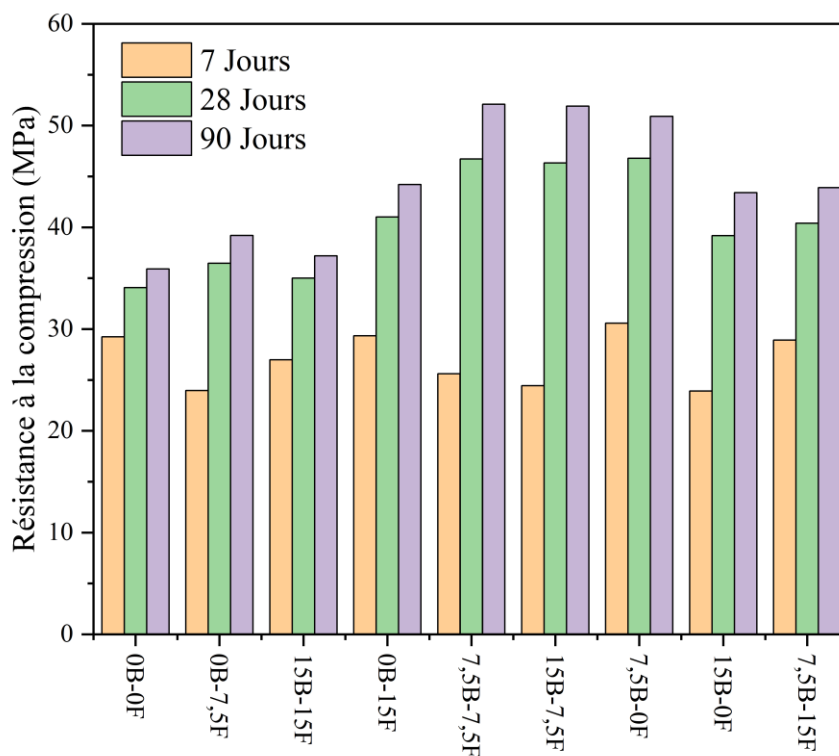


Figure 28: La résistance a la compression des différents mortiers utilisés

La figure 26 montre que la résistance à la compression des géopolymères à base de laitier est influencée par l'ajout de brique broyée (B) et de fine recyclée (F), avec des effets variables selon le temps de cure. À 7 jours, les formulations contenant uniquement de la fine recyclée (0B-15F) ou une combinaison équilibrée de brique et de fine (7.5B-7.5F) montrent des résistances légèrement supérieures à la formulation de référence (0B-0F), suggérant une réactivité précoce favorable de la fine recyclée. En revanche, l'ajout de brique seule (15B-0F) réduit la résistance initiale, indiquant une cinétique de réaction plus lente. Aux âges plus avancés (28 et 90 jours), la résistance augmente nettement dans toutes les formulations, avec

des valeurs maximales dépassant 50 MPa pour 0B-15F, 7.5B-7.5F et 15B-7.5F. Ces résultats confirment que la fine recyclée joue un rôle actif dès les premiers jours, tandis que la brique contribue davantage à long terme, et que leur combinaison permet d'optimiser les performances mécaniques des géopolymères.

V.3.2. Résistance à la flexion :

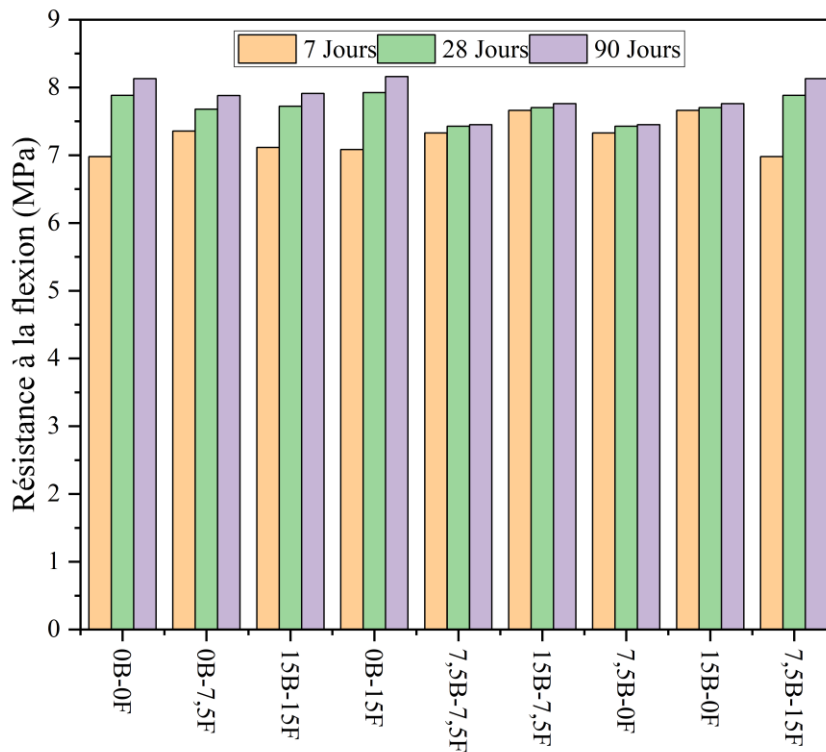


Figure 29: La résistance a la flexion des différents mortiers utilisés

Figure 27 montre que la résistance à la flexion des géopolymères à base de laitier varie légèrement selon les formulations et le temps de cure. À 7 jours, les valeurs se situent généralement entre 7.0 et 7.6 MPa, ce qui indique une bonne résistance initiale, en particulier pour les mélanges contenant de la fine recyclée, comme 7.5B-7.5F et 7.5B-15F, qui affichent les meilleures performances précoces. Cela suggère que la fine recyclée favorise un développement rapide des liaisons mécaniques. À 28 jours, on observe une légère augmentation pour la plupart des formulations, signe d'une évolution continue des propriétés mécaniques. À 90 jours, les résistances atteignent entre 7.5 et 8.2 MPa, avec des pics pour les mélanges 0B-15F, 7.5B-7.5F et 7.5B-15F, confirmant le rôle bénéfique à long terme des matériaux recyclés. Dans l'ensemble, la résistance à la flexion évolue plus modérément que la résistance à la

compression, mais montre que l'ajout combiné de brique et de fine recyclée permet d'atteindre des performances durables et équilibrées dès les premiers jours et jusqu'à 90 jours.

V.3.3. Retrait :

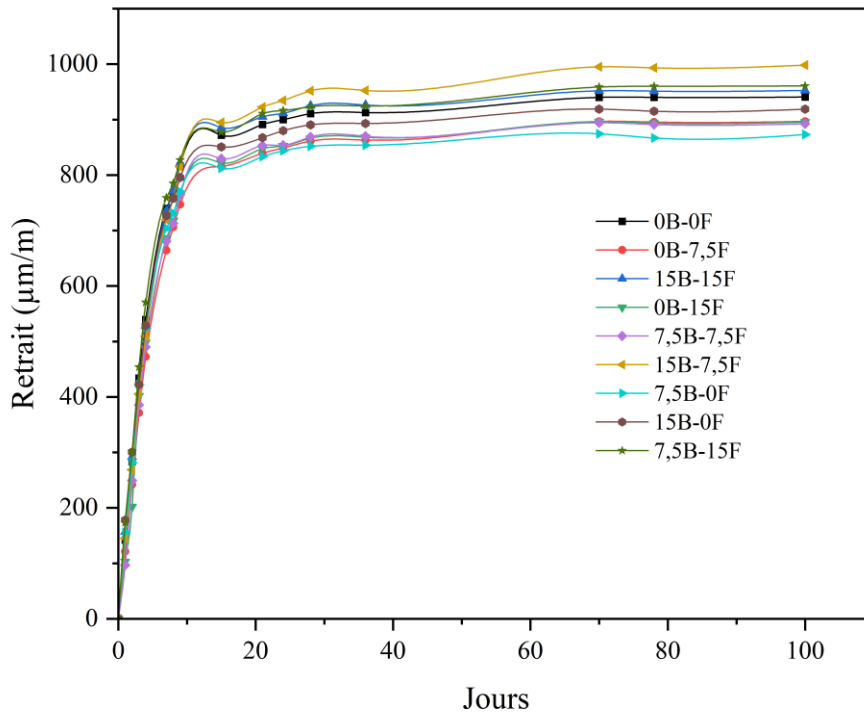


Figure 30: Retrait total des différents mortiers utilisés

Le graphique illustre l'évolution du retrait total (en $\mu\text{m/m}$) des géopolymères au cours de 100 jours pour différentes formulations, dont la référence 0B-0F (100 % laitier + sable + solution d'activation) et plusieurs mélanges modifiés par l'incorporation de briques concassées (B) et de fines recyclées (F) à différents pourcentages. La courbe 0B-0F montre un retrait relativement élevé, atteignant environ 950 $\mu\text{m/m}$, ce qui sert de référence pour évaluer les autres formulations. Le mélange 7,5B-7,5F, dans lequel 7,5 % du laitier est remplacé par de la brique broyée et 7,5 % par des fines recyclées, présente une réduction notable du retrait par rapport à la formulation de référence, atteignant environ 890 $\mu\text{m/m}$. Cette diminution suggère un effet bénéfique des matériaux recyclés sur la limitation du retrait. Toutefois, le mélange 15B-7,5F (remplacement de 15 % du laitier par de la brique et 7,5 % par des fines) affiche le retrait le plus élevé, dépassant légèrement les 1000 $\mu\text{m/m}$, ce qui indique que des pourcentages élevés

de brique peuvent accentuer le retrait, probablement en raison d'une porosité accrue ou d'une faible compacité de la matrice. À l'inverse, les mélanges contenant uniquement des briques (comme 15B-0F) ou uniquement des fines (comme 0B-15F) montrent des comportements intermédiaires. Globalement, l'analyse démontre que l'incorporation raisonnée de matériaux recyclés peut atténuer le retrait des géopolymères, mais qu'un excès, notamment de briques, peut entraîner l'effet inverse.

V.3.4. Durabilité :

V.3.4.1. Résistance résiduelle :

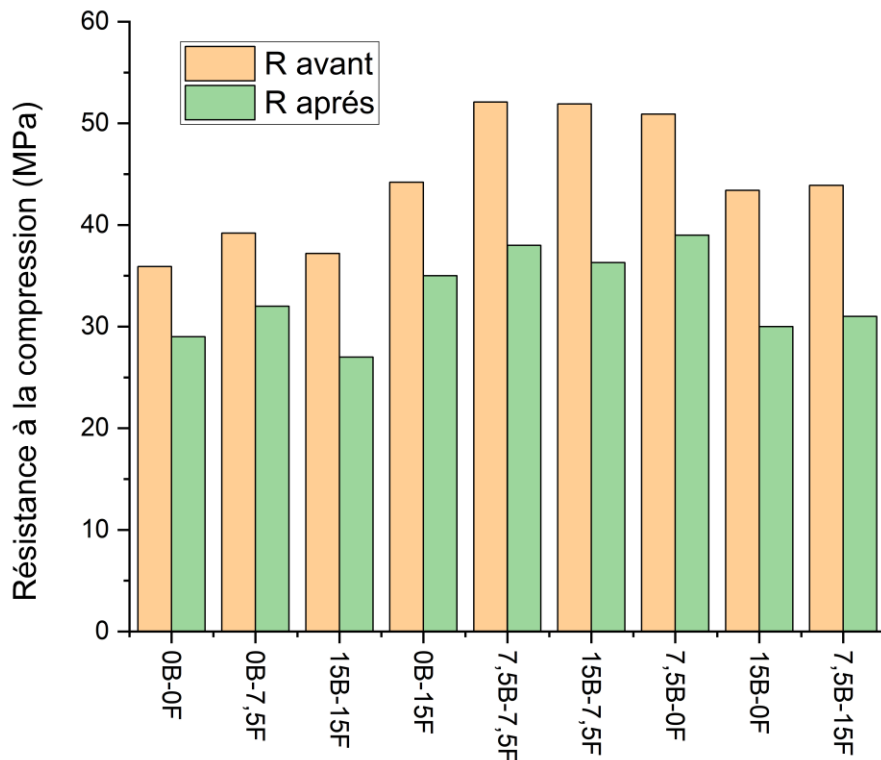


Figure 31 : La résistance à la compression avant et après exposition à une solution de H_2SO_3 pour différents mortiers utilisés

Le graphique montre la résistance à la compression des géopolymères avant et après exposition à une solution de H_2SO_3 à 3,5 % pendant 45 jours, pour différentes formulations. Le mélange de référence (0B-0F) présente une résistance initiale modérée d'environ 36 MPa, qui chute à environ 29 MPa après attaque acide, indiquant une dégradation significative mais limitée. Les formulations modifiées montrent des comportements variés. Les mélanges 15B-7,5F, 15B-15F

et 15B-0F, qui contiennent un pourcentage élevé de briques, subissent les pertes de résistance les plus importantes, avec des résistances finales autour de 30 MPa, traduisant une plus grande vulnérabilité à l'environnement acide, probablement liée à leur porosité accrue et à une matrice moins dense. En revanche, les formulations 15B-15F, 7,5B-7,5F et 7,5B-0F affichent les résistances initiales les plus élevées (au-delà de 50 MPa), et bien qu'elles subissent une baisse après l'attaque acide, elles conservent une résistance supérieure à celle du témoin, ce qui suggère une meilleure durabilité. Le mélange 7,5B-7,5F, qui combine 7,5 % de brique et 7,5 % de fines recyclées, offre un bon compromis entre performance mécanique et résistance chimique, avec une perte modérée et une résistance finale d'environ 38 MPa. Globalement, l'incorporation raisonnée de matériaux recyclés, notamment en proportions équilibrées, peut non seulement améliorer les propriétés mécaniques initiales, mais aussi renforcer la durabilité des géopolymères face à une attaque acide, à condition d'éviter un excès de briques qui semble fragiliser la matrice.

V.3.4.2. Perte en masse :

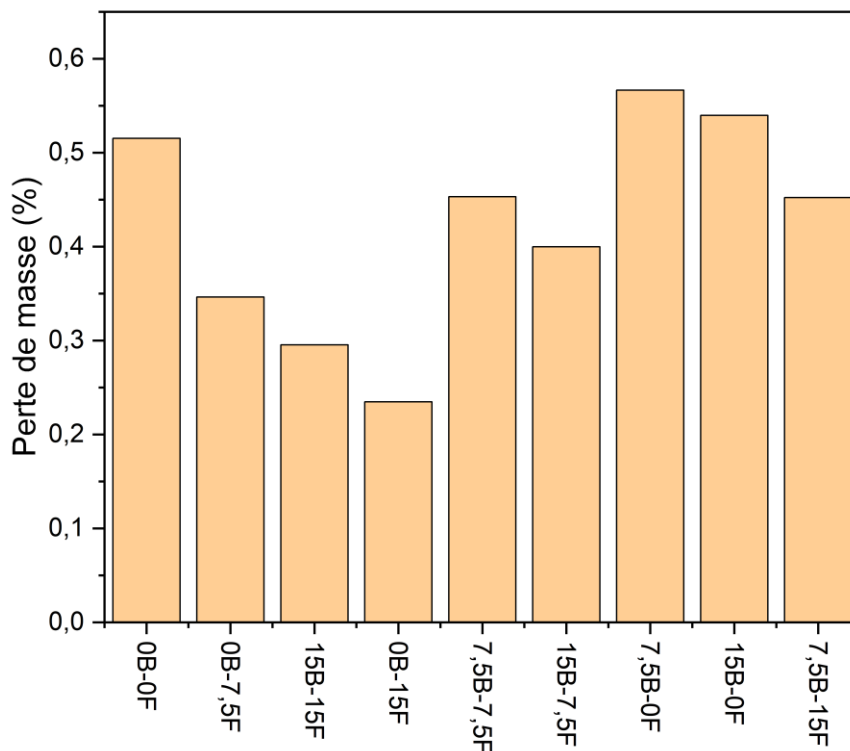


Figure 32 : La perte de masse après exposition a une solution de H_2SO_3 pour différents mortiers utilisés.

Le graphique présente la perte de masse (en %) des différentes formulations de géopolymères après exposition à une solution acide de H_2SO_3 à 3,5 % pendant 45 jours. La formulation de référence (0B-0F) enregistre une perte de masse de plus de 0,5 %, indiquant une dégradation relativement importante de la matrice sous environnement acide. Les formulations incorporant des matériaux recyclés présentent des comportements contrastés. Les mélanges 0B-15F, 15B-15F et 0B-7,5F montrent les pertes de masse les plus faibles (entre 0,23 % et 0,35 %), ce qui témoigne d'une bonne résistance chimique, probablement liée à une matrice plus compacte ou à une meilleure stabilité des produits de géopolymérisation. En revanche, les mélanges contenant 7,5B-0F, 15B-0F et 15B-7,5F affichent les pertes les plus élevées (jusqu'à 0,56 %), traduisant une moindre résistance à l'environnement acide, possiblement à cause d'une porosité accrue ou d'une structure interne plus vulnérable. Le mélange 7,5B-7,5F, qui combine 7,5 % de brique et 7,5 % de fines recyclées, présente une perte intermédiaire (environ 0,45 %), mais reste inférieure à celle du témoin, ce qui confirme son bon équilibre entre durabilité et performance. Dans l'ensemble, ces résultats soulignent que l'ajout modéré de fines recyclées peut améliorer la stabilité chimique des géopolymères, tandis qu'un apport excessif de briques tend à aggraver la dégradation par lixiviation.

V.3.4.3. Aspect visuel

Figure 31 montre l'évaluation visuelle de la durabilité des géopolymères à base de laitier soumis à une attaque sulfurique

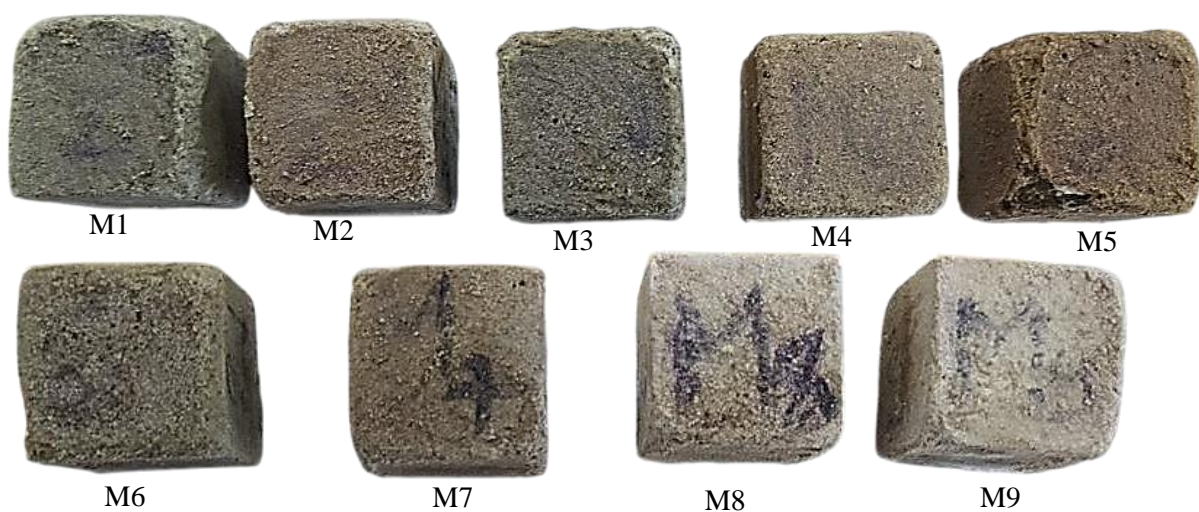


Figure 33 : Évaluation visuelle de la durabilité des géopolymères à base de laitier soumis à une attaque sulfurique

Les éprouvettes géopolymères soumises à une attaque à l'acide sulfurique pendant 40 jours présentent des degrés de dégradation visuelle variables selon les pourcentages de substitution en brique (B) et fines recyclées (F). Les formulations avec peu ou pas de substitutions (comme M5 : 0B–0F et M1 : 0B–7.5F) montrent une bonne résistance chimique, avec des surfaces homogènes et peu altérées. Les échantillons M4 (7.5B–7.5F) présentent également un bon équilibre, témoignant d'une synergie positive entre les deux substitutions modérées. En revanche, les formulations à forte teneur en matériaux substitués, notamment M2 (15B–15F), M3 (0B–15F) et M8 (15B–0F), révèlent des signes de dégradation plus marqués, tels que l'effritement, la porosité ou la décoloration, traduisant une moindre stabilité chimique. L'excès de brique ou de fines semble fragiliser la matrice, réduisant ainsi la durabilité des géopolymères face aux environnements acides.

V.4. Conclusion :

L'analyse des résultats met en évidence que l'incorporation raisonnée de briques concassées et de fines recyclées peut améliorer ou maintenir les propriétés des géopolymères tout en réduisant leur impact environnemental. À l'état frais, les substitutions modérées permettent de conserver une bonne ouvrabilité et une rhéologie adaptée, tandis qu'à l'état durci, certaines formulations présentent des résistances mécaniques élevées et une bonne durabilité face aux attaques acides. Néanmoins, un excès de briques peut engendrer une porosité accrue et une dégradation des performances. Ces observations soulignent l'importance de doser avec précision les matériaux recyclés afin d'optimiser les propriétés globales du matériau. En conclusion, l'étude valide la faisabilité de formulations écoresponsables de géopolymères, performantes et durables, à condition de maîtriser les proportions de substitution.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce mémoire a entrepris une investigation approfondie de l'impact de l'incorporation de deux types de déchets, à savoir les briques concassées et les fines recyclées, sur les propriétés et la durabilité des géopolymères.

L'objectif était d'évaluer la faisabilité technique et environnementale de ces matériaux recyclés en tant que substituts partiels dans la formulation de géopolymères, dans une perspective de réduction de l'empreinte écologique de l'industrie de la construction.

Les résultats obtenus, analysés à la fois à l'état frais et à l'état durci des géopolymères, ont permis de dégager plusieurs constats majeurs :

- **À l'état frais (ouvrabilité et rhéologie) :** L'étude a démontré que des taux de substitution modérés de briques concassées et de fines recyclées peuvent être intégrés aux formulations de géopolymères sans compromettre significativement leur ouvrabilité ni leur rhéologie. Cela est crucial pour assurer une mise en œuvre aisée et efficace sur les chantiers. Des dosages excessifs, en revanche, pourraient potentiellement altérer ces propriétés, rendant le matériau plus difficile à manipuler.
- **À l'état durci (résistances mécaniques) :** Il a été mis en évidence que certaines formulations intégrant ces matériaux recyclés sont capables d'atteindre des résistances mécaniques élevées, comparables voire supérieures à celles des géopolymères de référence. Cela souligne le potentiel de ces déchets pour contribuer aux performances structurelles du matériau final, ouvrant la voie à leur utilisation dans des applications nécessitant une bonne tenue mécanique.
- **Durabilité (comportement face aux attaques acides et lixiviation) :** L'aspect de la durabilité a été particulièrement scruté, notamment la résistance à l'environnement acide. Les résultats ont révélé que l'ajout modéré de fines recyclées peut améliorer la stabilité chimique des géopolymères. Cela suggère que les fines recyclées pourraient renforcer la matrice géopolymère, la rendant plus résistante aux attaques chimiques externes, comme le processus de lixiviation. Cependant, il a été constaté qu'un apport excessif de briques concassées tendait à aggraver la dégradation par lixiviation, possiblement en raison d'une porosité accrue ou d'une structure interne plus vulnérable induite par ces agrégats. Par exemple, le mélange 7,5B-7,5F (7,5% brique et 7,5% fines) a montré un bon équilibre entre durabilité et performance, avec une perte intermédiaire et inférieure au témoin.

En synthèse, cette recherche valide la faisabilité de concevoir des formulations de géopolymères non seulement écoresponsables, grâce à l'intégration de déchets, mais également performantes et durables. Le succès de cette approche repose toutefois sur une maîtrise rigoureuse et un dosage précis des matériaux recyclés incorporés. Les observations de cette étude soulignent l'importance d'optimiser les proportions des briques concassées et des fines recyclées afin de maximiser les propriétés globales du matériau, tout en minimisant les compromis potentiels. Cette voie prometteuse contribue de manière significative à la réduction de l'impact environnemental des matériaux de construction, en offrant une alternative viable et durable aux ciments traditionnels et en promouvant les principes de l'économie circulaire dans le secteur du bâtiment.

Perspective du mémoire :

1-Optimisation des formulations ternaires :

Approfondir l'étude des proportions optimales de poudre de brique (PB) et de fines recyclées (PFR) afin de maximiser la performance mécanique et la durabilité tout en maintenant une bonne ouvrabilité.

2-Études microstructurales avancées :

Utiliser des techniques comme la microscopie électronique à balayage (SEM), la diffraction des rayons X (DRX) ou la spectroscopie infrarouge (FTIR) pour mieux comprendre les mécanismes de géopolymérisation et l'effet des déchets sur la microstructure du liant.

3-Comportement à long terme :

Évaluer les performances mécaniques, la stabilité dimensionnelle et la durabilité des mortiers géopolymères sur des périodes prolongées (6 mois, 1 an) en conditions naturelles ou accélérées.

4-Applications à l'échelle industrielle :

Étendre l'étude aux bétons géopolymères (non seulement mortiers) et tester leur applicabilité dans des structures réelles (pavés, blocs, éléments préfabriqués).

5-Évaluation de la performance environnementale :

Réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) pour quantifier les bénéfices environnementaux de l'utilisation de déchets dans les géopolymères comparés au ciment Portland classique.

6-Ajout de fibres ou adjuvants :

Étudier l'effet de l'incorporation de fibres naturelles ou synthétiques, ou encore d'adjuvants

Conclusion générale

chimiques, pour améliorer la ténacité, la maniabilité et les propriétés spécifiques (autonettoyage, auto-cicatrisation, etc.).

7-Compatibilité avec d'autres déchets locaux :

Explorer la valorisation d'autres types de déchets disponibles localement (déchets de verre, boues d'épuration, etc.) en substitution partielle ou totale du laitier.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] J. Davidovits, « Geopolymer chemistry and applications: Saint-Quentin », 2011.
- [2] 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.
- [3] F. Škvára *et al.*, « Geopolymer concrete-an ancient material too? », *Ceramics– Silikáty*, vol. 52, n° 4, p. 296-298, 2008.
- [4] 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.
- [5] J. Davidovits et S. Cordi, « Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites », *Spe Pactec*, vol. 79, p. 151-154, 1979.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] J. Davidovits, « Environmentally driven geopolymer cement applications », présenté à Proceedings of 2002 Geopolymer Conference. Melbourne. Australia, 2002.
- [9] J. Davidovits, « Geopolymers: inorganic polymeric new materials », *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, vol. 37, n° 8, p. 1633-1656, 1991.
- [10] J. Davidovits, « Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition », *J. Davidovits.–Saint-Quentin, France*, vol. 5, 2020.
- [11] B. V. Rangan, « Fly ash-based geopolymer concrete », 2008.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] E. H. Alakara, Ö. Sevim, İ. Demir, and G. Günel, “Effect of waste concrete powder on slag-based sustainable geopolymer composite mortars,” *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, vol. 13, no. 3, 2022.
- [16] X. Liang and Y. Ji, “Mechanical properties and permeability of red mud-blast furnace slag-based geopolymer concrete,” *SN Appl Sci*, vol. 3, no. 1, Jan. 2021.

Références Bibliographiques

- [17] Ş. Bingöl, C. Bilim, C. D. Atiş, and U. Durak, “Durability Properties of Geopolymer Mortars Containing Slag,” *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 44, pp. 561–569, Oct. 2020.
- [18] M. Liu, R. Hu, Y. Zhang, C. Wang, and Z. Ma, “Effect of ground concrete waste as green binder on the micro-macro properties of eco-friendly metakaolin-based geopolymer mortar,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, Jun. 2023.
- [19] N. H. Jamil, Mohd. M. A. B. Abdullah, F. Che Pa, H. Mohamad, W. M. A. W. Ibrahim, and J. Chairapa, “Influences of SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO in phase transformation of sintered kaolin-ground granulated blast furnace slag geopolymer,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 14922–14932, 2020.
- [20] R. M. Kalombe, V. T. Ojumu, C. P. Eze, S. M. Nyale, J. Kevern, and L. F. Petrik, “Fly ash-based geopolymer building materials for green and sustainable development,” *Materials*, vol. 13, no. 24, pp. 1–17, Dec. 2020.
- [21] S. Puligilla and P. Mondal, “Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer,” *Cem Concr Res*, vol. 43, pp. 70–80, 2013.
- [22] M. Zerzouri, « Faisabilité d’élaboration des poudres pré-géopolymères par mécanosynthèse: caractérisation physico-chimique et application aux pâtes, mortiers et enrobés bitumineux », 2021.
- [23] A. Gharzouni, « Contrôle de l’attaque des sources aluminosilicates par la compréhension des solutions alcalines », 2016.
- [24] 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.
- [25] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, et P. Chindapasirt, « 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.
- [26] A. C. El Idrissi, « Géopolymérisation et activation alcaline des coulis d’injection: structuration, micromécanique et résistance aux sollicitations physico-chimiques », 2016.
- [27] J. Aupoil, « Etude des mécanismes de dissolution/polycondensation lors de la géopolymérisation: réactivité du métakaolin et influence de la solution d’activation », 2019.
- [28] M. Liu, R. Hu, Y. Zhang, C. Wang, and Z. Ma, “Effect of ground concrete waste as green binder on the micro-macro properties of eco-friendly metakaolin-based geopolymer mortar,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, Jun. 2023.
- [29] B. Lavanya, P. D. Kuriya, S. Suganesh, R. Indrajith, and R. B. Chokkalingam, “Properties of geopolymer bricks made with flyash and GGBS,” *IOP Conf Ser Mater Sci*

Références Bibliographiques

Eng, vol. 872, no. 1, p. 012141, Jun. 2020.

[30] R. M. Kalombe, V. T. Ojumu, C. P. Eze, S. M. Nyale, J. Kevern, and L. F. Petrik, "Fly ash-based geopolymer building materials for green and sustainable development," *Materials*, vol. 13, no. 24, pp. 1–17, Dec. 2020.

[31] Ş. Bingöl, C. Bilim, C. D. Atiş, and U. Durak, "Durability Properties of Geopolymer Mortars Containing Slag," *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 44, pp. 561–569, Oct. 2020.

[32] Z. Prošek, V. Nežerka, R. Hlůžek, J. Trejbal, P. Tesárek, and G. Karra'a, "Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines," *Constr Build Mater*, vol. 201, pp. 702–714, Mar. 2019.

[33] E. M. Foley, J. J. Kim, and M. M. Reda Taha, "Synthesis and nano-mechanical characterization of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) made with 1.5 CaO/SiO₂ mixture," *Cem Concr Res*, vol. 42, no. 9, pp. 1225–1232, 2012.

[34] J. Davidovits, « Properties of geopolymer cements », présenté à First international conference on alkaline cements and concretes, 1994, p. 131-149.

[35] N. B. Singh et B. Middendorf, « Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview », *Construction and Building Materials*, vol. 237, p. 117455, 2020.

[36] K. Almutairi, J. Nossent, D. Preen, H. Keen, and C. Inderjeeth, "The global prevalence of rheumatoid arthritis: a meta-analysis based on a systematic review," *Rheumatol Int*, vol. 41, no. 5, pp. 863–877, 2021.

[37] V. Sata and P. Chindapasirt, "19 - Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer concrete," in *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*, F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R. Tuladhar, and A. Koutamanis, Eds., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, 2020, pp. 385–403.

[38] C. P. Ginga, J. M. C. Ongpeng, and M. K. M. Daly, "Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production," *Materials*, vol. 13, no. 13. MDPI AG, pp. 1–18, Jul. 01, 2020.

[39] Saloni, Parveen, Y. Y. Lim, T. M. Pham, Jatin, and J. Kumar, "Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies," *Constr Build Mater*, vol. 283, May 2021.

[40] A. Heath, K. Paine, and M. McManus, "Minimising the global warming potential of clay based geopolymers," *J Clean Prod*, vol. 78, pp. 75–83, Sep. 2014.

[41] J. L. Provis et J. S. J. Van Deventer, *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier, 2009.

[42] C. Kizhakkethottam, « Sustainable Urban Resilience for the Next

Références Bibliographiques

Generation (SURGe) Initiative-SURGe– », 2023.

[43] 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.

[44] 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.

[45] 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.

[46] 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.

[47] 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.

[48] M. Alhawat, A. Ashour, G. Yildirim, A. Aldemir, and M. Sahmaran, “Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 50. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2022.

[49] A. Mohajerani *et al.*, “Recycling waste materials in geopolymer concrete,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, no. 3. Springer Verlag, pp. 493–515, Apr. 15, 2019.

[50] 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.

[51] 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.

[52] 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.

[53] 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.

[54] 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.

[55] D. Hardjito et B. V. Rangan, « Development and properties of low-calcium fly ash- based geopolymer concrete », 2005.

Références Bibliographiques

- [56] C. P. Eze, R. M. Kalombe, et V. T. Ojumu, « Fly ash-based geopolymer building materials for green and sustainable development », 2020.
- [57] 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.
- [58] M. A. Ariffin *et al.*, « Effect of ceramic aggregate on high strength multi blended ash geopolymer mortar », *Jurnal Teknologi*, vol. 77, n° 16, 2015.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] M. U. Christiansen, « An investigation of waste glass-based geopolymers supplemented with alumina », 2013.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] Y. Wu *et al.*, « Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges », *Construction and Building Materials*, vol. 224, p. 930-949, 2019.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] K. Komnitsas et D. Zaharaki, « Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry », *Minerals engineering*, vol. 20, n° 14, p. 1261-1277, 2007.

Références Bibliographiques

- [69] 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.
- [70] K. A. Komnitsas, « Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities », *Procedia Engineering*, vol. 21, p. 1023-1032, 2011.
- [71] B. Majidi, « Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review », *Materials Technology*, vol. 24, n° 2, p. 79-87, 2009.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] D. Adesanya et A. Raheem, « Development of corn cob ash blended cement », *Construction and Building Materials*, vol. 23, n° 1, p. 347-352, 2009.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] A. Standard, « C1437: standard test method for flow of hydraulic cement mortar », *Annual book of ASTM standards*, 2007.
- [81] 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.
- [82] 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*,

Références Bibliographiques

2005.

- [83] A. Standard, « ASTM C109-standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars », *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2008.
- [84] C. Astm, « 597, Standard test method for pulse velocity through concrete », *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2009.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] Provis, J.L., & van Deventer, J.S.J. (2009). *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing.
- [90] Duxson, P., et al. (2007). *J. Mater. Sci.*, 42(9), 2917–2933.
- [91] "Rheology and Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Mortars with Ground Granulated Blast Furnace Slag Addition." MDPI, 21 May 2020.
- [92] Rangan, B.V. (2008). *Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Curtin University.
- [93] Y. Zhang, J. L. Provis, P. J. Wardhaugh, and J. S. J. Van Deventer, "Viscosity and workability of concentrated suspensions of fly ash," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 11, pp. 1286–1295, 2008
- [94] N. Dhandapani and P. Nagarajan, "Rheological behaviour of metakaolin based geopolymers," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 86, no. 6, pp. 803–809, 2011.
- [95] R. Lemaitre, C. Barbeyron, A. Lesage, F. Gaudichet-Maupin, and T. Chauviré, "Influence of formulation parameters on the rheological behaviour of fresh geopolymer mortars based on metakaolin," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 432, pp. 103–110, 2016.
- [96] P. Duxson et al., "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids Surf. A*, vol. 269, pp.

Références Bibliographiques

47–58, 2005.

[97] A. M. Rashad, "Alkali-activated metakaolin: A short guide for Civil Engineer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 751–765, 2013.

[98] Z. Zhang et al., "Drying shrinkage of fly ash-based geopolymers," *J. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 14, pp. 3999–4007, 2010.

[99] C. K. Yip et al., "Effect of calcium content on fly ash geopolymer properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 587–594, 2005.

[100] N. A. Lloyd et al., "Plastic shrinkage cracking in alkali-activated binders," *Mater. Struct.*, vol. 46, pp. 1355–1366, 2013.

[101] K. Komnitsas et al., "Effect of synthesis parameters on geopolymer shrinkage," *Miner. Eng.*, vol. 22, pp. 538–543, 2009.

[102] J. L. Provis et al., "Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 62, pp. 2318–2329, 2007.

[103] T. Bakharev, "Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash," *J. Mater. Sci.*, vol. 41, pp. 4289–4297, 2006.

[104] D. Hardjito et al., "Fly ash-based geopolymer concrete: A review," *Aust. J. Civ. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, 2004.

[105] ASTM C157/C157M, "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete," ASTM International, 2017.

[106] Norme Française P 18-427, "Essais pour béton durci – Mesurage du retrait sur éprouvettes prismatiques," AFNOR, 2020.

[107] EN 12617-4, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of shrinkage and expansion," CEN, 2002.

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

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

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