



*Développement d'un béton géopolymère à base de résidu de bauxite et de cendre
volante pour des éléments architecturaux*

Par Dena Shalaby

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention
du grade de Maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.) en ingénierie**

Québec, Canada

© Dena Shalaby, 2023

Résumé

Avec plus de 1 m³ produit par année et par habitant sur la terre (~ 7.5 Gm³/an), le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Cependant, sa production est responsable d'approximativement 4 à 8 % des émissions de gaz à effet de serre, principalement en raison de la production du ciment Portland utilisé comme liant. Parallèlement, l'industrie de l'aluminium génère une grande quantité de résidu de bauxite. L'accumulation de ce sous-produit cause est un enjeu de taille à la fois sur le plan environnemental et économique. L'utilisation des ajouts cimentaires comme la cendre volante, les laitiers et la fumée de silice présente une avenue intéressante comme remplacement au ciment Portland. Toutefois, leur disponibilité limitée au Québec entraîne des coûts de transports non négligeables. Ainsi, le développement de nouveaux liants à base de résidu de bauxite aiderait à réduire l'empreinte environnementale du béton de même que les retombées économiques, tout en valorisant un matériau actuellement considéré comme un résidu industriel. Ce projet de recherche a pour objectif de développer et mieux comprendre l'effet des paramètres de confection de mélange de béton géopolymère à base de résidu de bauxite et de cendre volante de classe F sur ses principales propriétés à l'état frais et durci, pour la fabrication d'un élément en béton géopolymère architectural. Le mélange développé devra maximiser la valorisation du résidu de bauxite tout en respectant les normes de qualités de génie civil et les normes industrielles. Tout au long du projet, des recettes de béton géopolymère sont développées et optimisées dans le but de caractériser les principales propriétés des mélanges à l'état frais (maniabilité) et à l'état durci (résistance à la compression). L'effet d'une série de paramètres (le rapport eau/liant, le rapport résidu de bauxite/cendre volante, les conditions d'activation (température et durée de cure) et l'ajout de superplastifiants) est étudié sur les propriétés mécaniques des pâtes de géopolymère. Des mélanges de validation sont utilisés pour évaluer la faisabilité d'utilisation à grande échelle du béton géopolymère à base de résidu de bauxite et pour valider la méthode de fabrication d'une pièce architecturale au moyen de la construction d'un prototype d'un banc de parc à grandeur réelle. Selon les résultats obtenus, l'ajout progressif de résidu de bauxite à l'état sec conduit à une réduction progressive de la résistance à la compression et de la maniabilité. De plus, la résistance à la compression est fortement influencée par la température de cure du béton géopolymère à base de résidu de bauxite. Une cure à température plus élevée favorise une résistance à la compression plus importante. Cette constatation suggère également que la réaction de géopolymérisation dont dépendent les performances mécaniques est plus rapide et plus efficace à température élevée. En fin de compte, l'utilisation de résidu de bauxite dans le béton représente une avenue prometteuse pour produire des éléments architecturaux à l'aide des bétons durables et verts.

Abstract

With over 1 m³ produced per year per inhabitant on Earth (~7.5 Gm³/year), concrete is the most widely used construction material in the world. However, its production is responsible for approximately 4 to 8% of greenhouse gas emissions, mainly due to the production of Portland cement used as a binder. On the other hand, aluminum production generates a lot of bauxite residue. The accumulation of this industrial by-product is a major issue, with both environmental and economic impacts. The use of cementitious additives such as fly ash, slag, and silica fume present a promising avenue as a replacement for Portland cement. However, these materials are not commonly available in Quebec, which implies significant transportation costs. The development of new binders based on bauxite residue would help to reduce the environmental footprint of concrete as well as the economic impacts. This would also valorize a material currently considered an industrial residue. This research project aims to develop and better understand the effect of mix design parameters of geopolymer concrete based on bauxite residue and class F fly ash on its main properties in the fresh and hardened states, for the production of an architectural geopolymer concrete element. The developed mixture must maximize the valorization of bauxite residue while respecting civil engineering quality standards and industrial norms. Throughout the project, geopolymer concrete recipes are developed and optimized to characterize the main properties of the mixtures in the fresh state (workability) and in the hardened state (compressive strength). The effect of a series of parameters (water/binder ratio, bauxite residue/fly ash ratio, activation conditions (temperature and curing time), and the addition of admixtures) on the mechanical properties of the geopolymer pastes is studied. Validation mixtures are used to assess the feasibility of large-scale use of bauxite residue-based geopolymer concrete and to validate the method of manufacturing an architectural piece by constructing a full-scale park bench prototype. According to the obtained results, the progressive addition of dry bauxite residue leads to a progressive reduction in compressive strength and workability. In addition, compressive strength is strongly influenced by the curing temperature of bauxite residue-based geopolymer concrete. A higher curing temperature favours greater compressive strength. This finding also suggests that the geopolymerization reaction on which mechanical performance depends is faster and more effective at higher temperatures. The use of bauxite residues in concrete represents a potential avenue for producing architectural elements using durable and green concrete.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Liste des tableaux	vii
Remerciements	xiii
1 Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique	1
1.2 Définitions et objectifs du projet	2
1.3 Plan du document	4
2 Revue de littérature	5
2.1 Géopolymères	5
2.1.1 Composition	5
2.1.2 Réaction de géopolymérisation	7
2.1.3 Paramètres influençant les propriétés mécaniques.....	9
2.1.4 Liant géopolymère à base de résidu de bauxite.....	11
2.2 Matériaux précurseurs solides	12
2.2.1 Cendre volante.....	12
2.2.2 Résidu de bauxite	13
2.3 Activation alcaline	14
2.3.1 Hydroxyde de sodium (NaOH)	15
2.3.2 Silicate de sodium (Na ₂ SiO ₃)	16
3 Matériaux et méthodologie	17
3.1 Plan expérimental	17
3.2 Matières premières et caractérisation	19
3.2.1 Cendre volante.....	19
3.2.2 Résidu de bauxite	19

3.2.3	Hydroxyde de sodium (NaOH)	20
3.2.4	Silicate de sodium (Na ₂ SiO ₃)	20
3.2.5	Granulat fin.....	20
3.2.6	Granulat grossier	22
3.2.7	Superplastifiant.....	23
3.3	Phase 1 : Fabrication du mélange de base	23
3.4	Phase 2 : Optimisation de la recette de mortier géopolymère	28
3.4.1	Proportion de résidu de bauxite : cendre volante	29
3.4.2	Rapport eau / liant	30
3.4.3	Superplastifiant.....	32
3.4.4	Durée et méthode de cure	33
3.4.5	Température de cure constante.....	35
3.4.6	Température de cure croissante	35
3.5	Phase 3 : Optimisation de la recette de béton géopolymère	36
3.6	Phase 4 : Caractérisation détaillée du béton géopolymère	37
3.6.1	Propriétés physiques.....	39
3.6.2	Propriétés mécaniques	42
3.6.3	Durabilité.....	46
3.7	Phase 5 : Fabrication d'un prototype et validation	49
4	Présentation des résultats	53
4.1	Mortier géopolymère	53
4.1.1	Proportion de résidu de bauxite : cendre volante	54
4.1.2	Rapport eau / liant	56
4.1.3	Superplastifiants	59
4.1.4	Durée et méthode de cure	66

4.1.5	Cure au four à température constante.....	68
4.1.6	Cure au four à température croissante.....	73
4.2	Béton géopolymère.....	75
4.2.1	Propriétés physiques.....	77
4.2.2	Propriétés mécaniques.....	81
4.2.3	Résistance à la traction.....	85
4.2.4	Durabilité.....	89
4.3	Prototype à échelle réelle et validation.....	96
5	Discussion.....	101
5.1	Effet du résidu de bauxite.....	101
5.2	Effet du ratio eau/liant.....	103
5.3	Effet des conditions d'activation (température et durée de cure).....	104
5.4	Effet des conditions de mûrissement.....	105
5.5	Effet des superplastifiants.....	108
5.6	Fabrication d'un prototype de banc de parc.....	109
6	Conclusion.....	111
6.1	Synthèse des résultats.....	111
6.2	Contributions originales.....	114
6.3	Perspectives de recherche.....	115
	Bibliographie.....	117
	Annexe A : Fiche technique de la cendre volante de classe F.....	123
	Annexe B : Fiche technique du résidu de bauxite.....	126
	Annexe C : Propriétés physiques des matériaux (granulat fin).....	128
	Annexe D : Propriétés physiques des matériaux (granulat grossier).....	130
	Annexe E : Fiches techniques des superplastifiants.....	132
	Annexe F : Plan du prototype de banc de parc.....	140

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Composition de la cendre volante provenant de la compagnie Shand Power Station située à Calgary (AB, Canada) et du résidu de bauxite provenant des installations Rio Tinto situées au Saguenay (QC, Canada).....	13
Tableau 3.1 : Composition chimique de la cendre volante de classe F.....	19
Tableau 3.2 : Composition chimique (CC) du résidu de bauxite.....	20
Tableau 3.3 : Distribution granulométrique du granulat fin.....	21
Tableau 3.4 : Distribution granulométrique du granulat grossier.....	22
Tableau 3.5 : Densité à 25 °C des superplastifiants utilisés.....	23
Tableau 3.6 : Mélange de mortier géopolymère 60-40 de El-Gass (2020), en kg pour 1 m ³ de mortier.....	24
Tableau 3.7 : Mélange de mortier de référence R0-100 et mélange de mortier de comparaison R60-40 testé dans ce projet, en kg pour 1 m ³ de mortier.....	25
Tableau 3.8 : Paramètres à l'étude pour la phase 2.....	29
Tableau 3.9 : Différentes proportions de liants à l'étude.....	29
Tableau 3.10 : Mélanges de mortier géopolymère composés de différentes proportions de liants, en kg pour 1 m ³ de mortier.....	30
Tableau 3.11 : Mélanges de mortier géopolymère composés de différentes proportions d'eau et de liant, en kg pour 1 m ³ de mortier.....	31
Tableau 3.12 : Différents superplastifiants à l'étude.....	32
Tableau 3.13 : Mélanges de mortier géopolymère avec superplastifiant, en kg pour 1 m ³ de mortier.....	33
Tableau 3.14 : Différents temps de précure et de cure à l'étude.....	34
Tableau 3.15 : Différentes durées de cure à température élevée (50 °C à 90 °C).....	34
Tableau 3.16 : Différentes températures de cure au four.....	35
Tableau 3.17 : Différentes proportions sable : gravier à l'étude.....	37
Tableau 3.18 : Mélanges de béton géopolymère composés de différentes proportions de sable et de gravier, en kg pour 1 m ³ de béton.....	37
Tableau 3.19 : Essais réalisés à la phase 4 et normes associées.....	38

Tableau 3.20 : Mélanges de béton géopolymère testés à la phase 4, en kg pour 1 m ³ de béton	39
Tableau 3.21 : Dimensions des cônes, en mm	40
Tableau 3.22 : Mélange de béton géopolymère (B60-40SP) utilisé pour le banc de parc, en kg pour 1 m ³ de béton	50
Tableau 4.1: Résistance à la compression des mélanges de mortier géopolymère (R60-40) en fonction de la durée et du type de cure, à 60 °C.....	67
Tableau 4.2 : Résultats des essais de la résistance à l'écaillage des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30), après 7 et 21 cycles	91
Tableau 4.3 : Concentration en métaux et matière dangereuse du lixiviat de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) et de béton de ciment Portland.....	94
Tableau 4.4 : pH du lixiviat du béton géopolymère (B60-40 et B70-30) et de ciment Portland	95

Liste des figures

Figure 2.1 : Production de géopolymère (Tiré de Hassan et al., 2019).....	6
Figure 2.2 : Effet du rapport eau / géopolymère sur la résistance à la compression du béton géopolymère mesurée après 7 jours à différentes températures (Tiré de Hardjito, 2005).....	8
Figure 2.3 : Effet de la température de cure sur la résistance à la compression du béton géopolymère mesurée après 7 jours (Tiré de Hardjito, 2005).....	9
Figure 2.4 : Effet du ratio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sur la résistance à la compression à différentes conditions de cure (Tiré de Hassan et al., 2020).....	10
Figure 3.1 : Méthodologie générale du projet.....	18
Figure 3.2 : Courbe granulométrique du granulat fin.....	21
Figure 3.3 : Courbe granulométrique du granulat grossier.....	23
Figure 3.4 : Bétonnière électrique - Modèle 060-4050-2 (Tiré de : Canadian Tire)...	25
Figure 3.5 : Fabrication des mortiers géopolymères (a) Confection des cylindres avant la cure (b) Cylindre avant l'essai de compression.....	27
Figure 3.6 : Variation de la température en fonction du temps de cure au four.....	36
Figure 3.7 : Moule conventionnel pour l'essai d'affaissement (Tiré de : TMI).....	40
Figure 3.8 : Pressiomètre CA-0500 (Tiré de : TMI).....	41
Figure 3.9 : Pénétrromètre H-4133 (Tiré de : Humboldt).....	42
Figure 3.10 : Presse à béton automatique PILOT 1500 kN (Tiré de : Controls).....	43
Figure 3.11 : Schéma du montage servant à l'essai de flexion du béton par la méthode du chargement au tiers (Tiré de : Canadian Standards Association, 2019).....	44
Figure 3.12 : Le montage type pour la réalisation de cet essai.....	45
Figure 3.13 : Presse à béton automatique C64.106 (Tiré de : MTS Criterion).....	46
Figure 3.14 : Montage type pour l'essai de résistance à l'écaillage (Tiré de : BNQ 2621-905, article B.4.4 et B.5.1).....	47
Figure 3.15 : Prototype de banc de parc (Tiré de Vandal. P, 2023).....	49
Figure 3.16 : Bétonnière électrique Syntesi 350 EL (Tiré de : Imer).....	50
Figure 3.17 : Cure du prototype du banc de parc avec les couvertures chauffantes ...	52

Figure 4.1 : Résistance à la compression du mortier géopolymère en fonction de la proportion de résidu de bauxite dans le liant, après une cure de 24 heures à 60 °C ...	55
Figure 4.2 : Résistance à la compression du mortier géopolymère en fonction du rapport eau/liant, après une cure de 24 heures à 60 °C	56
Figure 4.3 : Résistance à la compression en fonction de la durée de mûrissement des mélanges de mortier géopolymère (R60-40, ES-25, ES-50 et ES-100), après 24 heures de cure au four (a) à 60°C (b) à 80 °C	58
Figure 4.4 : Allure des affaissements des mélanges de mortier géopolymère composés de superplastifiants (a) V6max (b) V2max (c) E3max (d) N3max	60
Figure 4.5 : Résultats d'affaissement des mélanges de mortier géopolymère en fonction du type de superplastifiant.....	61
Figure 4.6 : Résistance à la compression des mélanges de géopolymère en fonction des quantités minimales et maximales de chaque type de superplastifiant, après 24 heures de cure au four à 60°C	62
Figure 4.7 : Allure des affaissements des mélanges de mortier géopolymère composés du superplastifiant E3 (a) E3-25 (b) E3-50	63
Figure 4.8 : Résultats d'affaissement des mélanges de mortier géopolymère avec le superplastifiant E3 en fonction de la quantité de superplastifiant, après 24 heures de cure au four à 60°C.....	64
Figure 4.9 : Résistance à la compression en fonction de la durée de mûrissement des mélanges de mortier géopolymère avec du superplastifiant E3, après 24 heures de cure au four à 60°C.....	65
Figure 4.10 : Résistance à la compression des mélanges de mortier géopolymère (a) R60-40 et (b) R70-30 déterminée après une cure à température élevée constante (50 à 90°C) d'une durée 6 h, 24 h et 48 h.....	69
Figure 4.11 : Résistance à la compression des mélanges de mortier (a) R60-40 et (b) R70-30 en fonction de la durée de maturation à certaines conditions de cure (60 à 90°C et une durée de 6 h, 24 h et 48 h)	72
Figure 4.12 : (a) Séquence de cure pour chaque groupe d'éprouvettes (b) Résistance à la compression (f_c') du mélange de mortier géopolymère R60-40 en fonction de chaque groupe d'éprouvettes, à la fin de la cure (1 à 4 jours) et 28 jours après.....	74

Figure 4.13 : Résistance à la compression des mélanges de mortier/béton géopolymère en fonction de la quantité de gravier dans le mélange, après 24 heures de cure au four à 60°C	76
Figure 4.14 : Résistance à la pénétration des mélanges de béton géopolymère (B60-40SP et B60-40) en fonction du temps, pour différentes températures de béton géopolymère frais	79
Figure 4.15 : Temps de prise des mélanges de béton géopolymère (B60-40SP et B60-40) en fonction de la température.....	80
Figure 4.16 : Relation contrainte-déformation du béton géopolymère B60-40 et B70-30 sous effort de compression uniaxial	81
Figure 4.17 : Résistance à la compression fonction de la durée de mûrissement des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30), après 24 heures de cure au four à 80°C.....	82
Figure 4.18 : Module d'élasticité en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) selon les valeurs théoriques et expérimentales, à 28 jours	83
Figure 4.19 : Résistance à la traction par la flexion en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) selon les valeurs théoriques et expérimentales, à 28 jours	86
Figure 4.20 : Poutrelle après la rupture de l'échantillon B60-40A	87
Figure 4.21 : Résistance à la traction par fendage du béton en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) selon les valeurs théoriques et expérimentales, à 28 jours	88
Figure 4.22 : Photos représentatives de la surface de béton géopolymère (a) B60-40 et (b) B70-30 après l'essai d'écaillage et prises à différentes périodes	90
Figure 4.23 : Perte de masse (kg/m ²) des plaques lors de l'essai de résistance à l'écaillage en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30), après 7 et 21 cycles	92
Figure 4.24 : Béton géopolymère B60-40SP lors du malaxage	96
Figure 4.25 : Surface arasée du béton géopolymère du banc de parc	97
Figure 4.26 : Allure de l'affaissement du béton B60-40SP utilisé pour le banc de parc (affaissement mesuré de 210 mm).....	98

Figure 4.27 : Section de banc de parc	99
Figure 4.28 : Résistance à la compression du mélange de béton géopolymère (B60-40SP) en fonction de la durée de mûrissement (1 à 28 jours), après une cure de 24 heures à 60 °C.....	100
Figure 5.1 : Variation de la résistance à la compression du mortier géopolymère en fonction de la proportion de résidu de bauxite pour différentes références, après une cure de 24 heures à 60 °C	102
Figure 5.2 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée de mûrissement des mélanges de mortier géopolymère (R60-40 et R70-30), après 24 ou 48 heures de cure au four à 80 °C	106
Figure 5.3 : Comparaison des proportions massiques entre le banc de parc en béton de ciment et le banc de parc en béton géopolymère.....	109

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier infiniment mon directeur de recherche, M. Mathieu Fiset, ing. PhD., pour sa grande disponibilité et ses nombreux encouragements tout au long de ce projet. Tes judicieux conseils m'ont permis de me construire au plan personnel et professionnel, et j'en suis reconnaissante. Je désire également adresser mes remerciements à mon co-directeur de recherche, M. Ahmed Rahem, ing. PhD., pour sa bonne humeur et ses nombreux conseils.

Un remerciement tout particulier pour Catherine Riverin, technicienne en génie civil. Je ne te remercierai jamais assez pour toute l'aide que tu m'as apportée au laboratoire, mais surtout merci pour l'incalculable soutien moral. Je tiens également à remercier David Noël, technicien en génie civil pour son support, son aide et son expertise qui m'ont permis de mener le projet à terme.

De plus, je tiens à exprimer ma gratitude envers le Centre universitaire de recherche sur l'aluminium (CURAL) pour le cadre de recherche accueillant. Merci à Guy Simard, coordonnateur du partenariat RT-UQAC, de m'avoir fait confiance pour ce projet et d'avoir cru en mon plein potentiel. Je voudrais ajouter un remerciement à Pascal Vandal, ing., pour son support moral et ses encouragements.

Merci à l'entreprise Rio Tinto (RT) pour le support financier, le temps et l'expertise des chargés de projets. Je tiens à remercier également les chargés de projets de la société Béton Préfabriqué Du Lac (BPDFL) pour leur temps, leur expertise technique sur le béton et leurs nombreux conseils qui ont mené à l'aboutissement de ce projet. De plus, je désire souligner l'important soutien financier des bourses universitaires MITACS, sans lesquelles ce projet n'aurait pas été possible, ainsi que le support de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), du centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) et le groupe de recherche risque, ressources eau (R2Eau) de l'UQAC.

Un énorme merci à Joao Augusto, CPI., étudiant au doctorat en génie civil pour son aide précieuse et son immense gentillesse. Je voudrais également remercier Myriam Lapointe, CPI., pour son aide à la réalisation de ce projet, lors de son stage.

Je remercie de tout mon cœur, ma plus grande source de soutien, ma famille. C'est grâce à leur immense appui moral et financier si j'ai pu terminer ma maîtrise. Il va sans dire que sans eux, je n'aurais pas pu me rendre où je suis maintenant. Je vous en serais toujours très reconnaissante. Mes remerciements ne seraient complets sans une mention spéciale à mon conjoint pour ses innombrables encouragements.

Enfin, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont directement ou indirectement contribué à la réalisation de ce projet. Malgré les hauts et les bas, les obstacles et les découragements, je retire du positif de cette expérience enrichissante. Ce fut un réel plaisir de côtoyer des gens aussi compétents et passionnés.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte et problématique

Le domaine de la construction est en constante expansion. Le béton est le matériau le plus utilisé sur Terre et les émissions de gaz à effet de serre découlant de la production du ciment Portland, liant typiquement utilisé dans la fabrication du béton, ont un impact significatif sur l'environnement. En effet, le béton est responsable de 4 à 8 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone (Watts, 2019). Sur une échelle d'importance de gaz à effet de serre, le béton se situe en troisième position suivant le charbon et le pétrole (Watts, 2019). Afin de réduire l'empreinte écologique du béton, le développement de nouveaux liants pouvant remplacer complètement le ciment Portland, tout en conservant les avantages de l'utilisation du béton, représente une alternative écoresponsable et prometteuse.

En parallèle, la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean est confrontée à un enjeu de taille en ce qui a trait à la production et l'accumulation de résidu de bauxite. En effet, une fois l'alumine extraite de la bauxite pour la production de l'aluminium, le résidu de bauxite concentré en fer et silicium n'est actuellement ni recyclé ni réutilisé et doit être entreposé dans l'environnement (Rio Tinto, 2014). Cet entreposage coûteux engendre également son lot d'impact sur les écosystèmes, la qualité de l'eau et le paysage. L'usine Vaudreuil de Rio Tinto, située dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, est une usine d'alumine au Canada. Cette usine alimente les cinq alumineries de la région et la production de résidu de bauxite est estimée à 1,5 Mt / an (Rio Tinto, 2021).

L'utilisation de résidu de bauxite pour produire des matériaux de construction a longtemps été considérée comme la façon la plus efficace de valoriser ce résidu (Wang et al, 2021). Le résidu de bauxite peut être utilisé pour former un liant géopolymère en remplacement du ciment (El-Gass 2020, Zhang et al. 2020, World Aluminium 2020). Ce liant géopolymère est un matériau résultant d'une réaction chimique entre un précurseur source riche en silice (SiO_2), en alumine (Al_2O_3) ou en silice (SiO_2), en oxyde de calcium (CaO) et une solution d'activation alcaline, soumis à des conditions d'activation (Hardjito, 2005, Hassan et al. 2019, Hassan et al. 2020). Ce nouveau type de liant résistant et durable est une façon novatrice de substituer le ciment dans le béton. Dans le cas d'un géopolymère à base de résidu de bauxite, cette utilisation offre un potentiel substantiel de valorisation, tout en permettant d'éliminer le ciment Portland du béton. Cette substitution du ciment par un résidu industriel peut donc permettre, d'une part, de réduire l'empreinte environnementale et les coûts associés à l'entreposage du résidu de bauxite, et d'autre part, de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la production du béton. À ce jour, bien que différentes études aient démontré qu'il est possible de produire un liant géopolymère à base de résidu de bauxite résistant, ce matériau novateur n'est peu, voire pas utilisé en construction. Cette situation découle, entre autres, des connaissances limitées en ce qui a trait aux paramètres affectant les propriétés du matériau ainsi que la méthode de fabrication des éléments à construire.

1.2 Définitions et objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet de recherche est de mieux comprendre l'effet des paramètres de confection d'un mélange de béton géopolymère à base de résidu de

bauxite et de cendre volante de classe F sur ses principales propriétés à l'état frais et à l'état durci, pour la fabrication d'un élément en béton géopolymère architectural. De façon plus spécifique, les sous-objectifs de ce projet :

1. Identifier les principaux paramètres d'influence et fabriquer une série de mélanges tests à base de résidu de bauxite et de cendre volante de classe F ;
2. Caractériser les principales propriétés des mélanges à l'état frais (maniabilité) et à l'état durci (résistance à la compression) ;
3. Sélectionner les mélanges qui offrent le meilleur potentiel de valorisation du résidu de bauxite et d'utilisation en génie civil, pour une application architecturale (les standards requis en termes de maniabilité, résistance, durabilité et retombées environnementales), et procéder à leur caractérisation détaillée ;
4. Évaluer la faisabilité d'utilisation à grande échelle du béton géopolymère à base de résidu de bauxite et valider la méthode de fabrication au moyen de la construction d'un prototype d'un banc de parc à grandeur réelle.

Plusieurs paramètres tels que le rapport eau/liant, le rapport résidu de bauxite/cendre volante, les conditions d'activation (température et durée de cure) et l'ajout d'adjuvants seront étudiés. Leurs influences sur les propriétés mécaniques des pâtes de géopolymère feront l'objet de cette étude au travers des trois premiers sous-objectifs. Le dernier sous-objectif permet finalement de vérifier et démontrer que l'un des mélanges développés ainsi que la méthode de fabrication utilisée peuvent être appliqués pour la fabrication d'éléments nécessitant un grand volume. À terme, le béton développé et caractérisé ainsi que le procédé de fabrication utilisé dans ce projet

et optimisé en fonction des propriétés des matériaux permettront de produire des éléments de béton géopolymère plus complexe en terme, par exemple, de géométrie et de contraintes d'exploitations ou structurales.

1.3 Plan du document

Ce mémoire est structuré en 6 chapitres. Le présent chapitre regroupe l'introduction et la mise en contexte. Le deuxième chapitre est consacré à la revue de littérature, qui porte sur le béton géopolymère et ses principaux constituants. La méthodologie utilisée pour la réalisation du projet et le programme expérimental sont définis au troisième chapitre. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus, suivi par le cinquième chapitre qui porte sur l'analyse et la synthèse des résultats. Finalement, le dernier chapitre aborde les conclusions et les futures perspectives de recherche.

2 Revue de littérature

2.1 Géopolymères

2.1.1 Composition

Le géopolymère est issu de la réaction de géopolymérisation se produisant entre une solution alcaline et un précurseur à forte teneur en aluminosilicate, tel que montré à la Figure 2.1. Typiquement, l'hydroxyde de sodium (NaOH) et le silicate de sodium (Na_2SiO_3) sont les composés les plus utilisés comme activateur alcalin (Hardjito, 2005). Quant à lui, le précurseur source joue un rôle essentiel dans la réaction de géopolymérisation en contrôlant la composition chimique et la microstructure du géopolymère final (He et al., 2013). Néanmoins, tous les matériaux constitués principalement de silice (SiO_2) ou d'alumine (Al_2O_3) amorphe sont des matériaux sources potentiels pour la production de géopolymères.

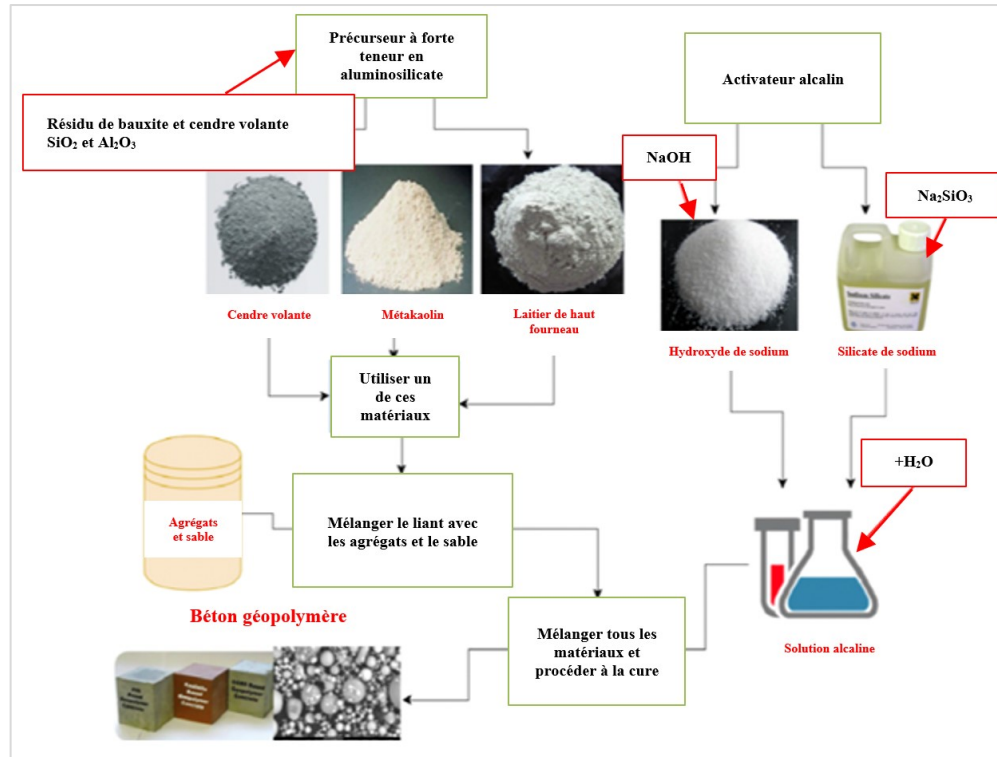


Figure 2.1 : Production de géopolymère (Tiré de Hassan et al., 2019)

Palomo et al. (1999) ont classifié les géopolymères en deux catégories selon le matériau source, soient ceux principalement composés de laitier de haut fourneau et ceux de cendre volante. L'utilisation de cendre volante est avantageuse en raison de sa haute teneur en aluminosilicates, sa forte réactivité lors de la réaction de géopolymérisation expliquée par la finesse de ses particules, en comparaison avec le laitier de haut fourneau (Hardjito, 2005, He et al. 2013). De façon plus spécifique, la cendre volante à faible teneur en calcium, aussi connue sous le nom de cendre volante de classe F, est plus écologique lorsqu'utilisée comme précurseur solide (Kamseu et al., 2021). De plus, la forme sphérique de la cendre volante améliore l'ouvrabilité des mélanges à l'état frais tandis que la petite taille de sa particule contribue à la création d'une matrice dense et durable (Hardjito, 2005). Ainsi, la recherche a principalement

permis de développer et de comprendre le géopolymère fait à base de cendre volante (riche en SiO_2 , Al_2O_3), matériau qui est, aujourd'hui, largement documenté et couramment utilisé dans l'industrie de la construction.

2.1.2 Réaction de géopolymérisation

La géopolymérisation de la cendre volante est constituée de trois grandes étapes : 1) la dissolution des atomes de silicium et d'aluminium des précurseurs grâce à l'action des ions hydroxydes de la solution alcaline 2) le transport, l'orientation ou la condensation des ions précurseurs en monomères 3) le processus de polycondensation menant à la formation de polymères aluminosilicates amorphes ou semi-cristallins (He et al., 2013). D'après Hardjito (2005), cette réaction de géopolymérisation produit de l'eau, ce qui diffère de la réaction d'hydratation du ciment Portland qui en consomme. À la suite de la réaction de géopolymérisation, cette eau occupe une certaine portion du volume de la matrice. En raison du gradient d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur de la matrice géopolymère, cette eau peut s'en échapper et laisse des nano pores discontinus, ce qui est un atout à la performance des géopolymères, en termes de durabilité. Mise à part l'eau présente dans la solution aqueuse de silicate de sodium, aucun ajout d'eau supplémentaire de gâchage n'est nécessaire à la géopolymérisation. Une certaine quantité d'eau est tout de même requise afin d'assurer l'homogénéité et la maniabilité du mélange de béton frais. La quantité d'eau ajoutée au mélange doit toute de même être optimisée, car elle influence négativement les propriétés mécaniques du béton géopolymère durci, comme la résistance à la compression (Figure 2.2).

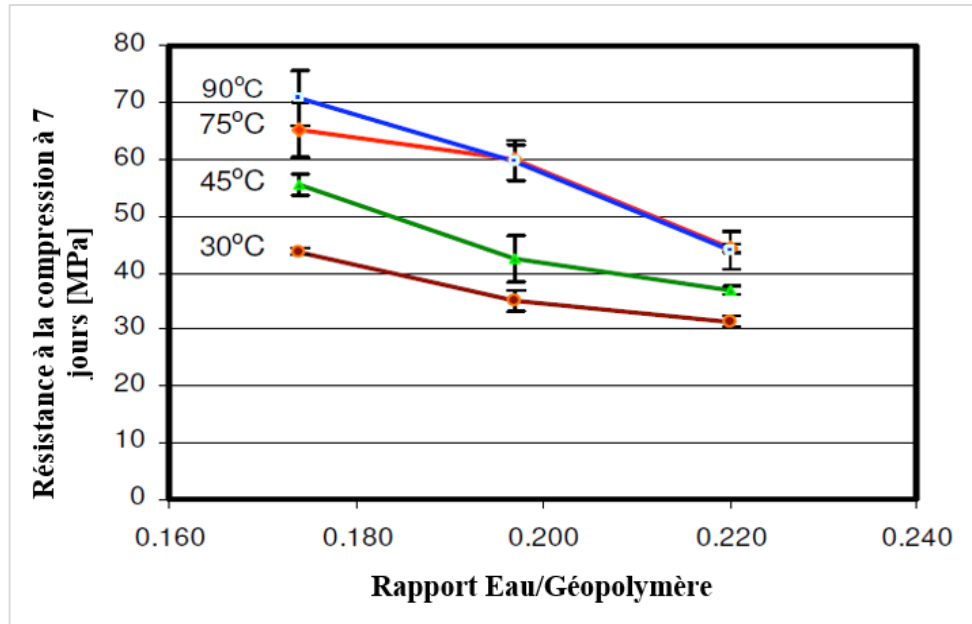


Figure 2.2 : Effet du rapport eau / géopolymère sur la résistance à la compression du béton géopolymère mesurée après 7 jours à différentes températures (Tiré de Hardjito, 2005)

Il a également été constaté que la résistance en compression des mortiers et bétons de géopolymère de cendre volante dépend des ratios $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, $\text{NaOH}/\text{Cendre volante}$ et $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Cendre volante}$ (Hassan et al., 2019). Afin de favoriser la réaction de géopolymérisation et maximiser les propriétés à l'état durci, plusieurs auteurs ont recouru à une cure à température élevée (de l'ordre de 50 °C à 90 °C) (Hardjito. 2005, Toufigh et al. 2021). La température et la durée de la cure sont en effet des paramètres majeurs qui affectent la résistance à la compression du mélange à l'état durci, tel que montré à la Figure 2.3.

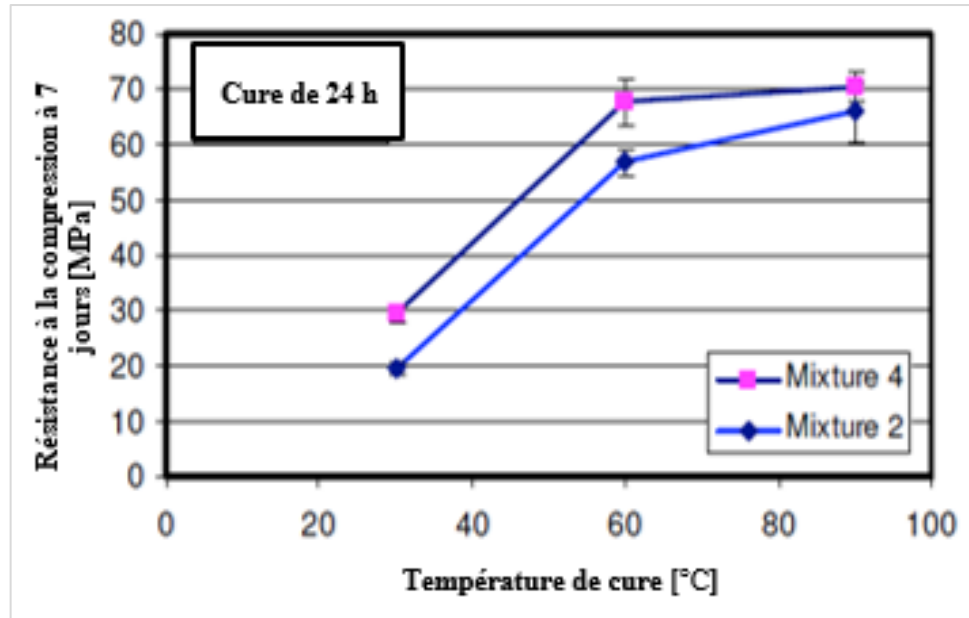


Figure 2.3 : Effet de la température de cure sur la résistance à la compression du béton géopolymère mesurée après 7 jours (Tiré de Hardjito, 2005)

2.1.3 Paramètres influençant les propriétés mécaniques

En plus de certaines propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques à l'état durci du béton géopolymère, dont la résistance mécanique et le mûrissement (gain en résistance au fil du temps), sont fortement influencées par la nature et la concentration de l'activateur alcalin ainsi que par la température et le type de cure (Hassan et al. 2020, He et al. 2013). Plus la concentration de NaOH est élevée, plus la résistance en compression et la rigidité du géopolymère vont augmenter (Hassan et al. 2020, He et al. 2013 & Hu et al. 2018). La résistance à la compression augmente également avec l'augmentation du rapport $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, tel qu'observé sur la Figure 2.4 (Hassan et al., 2020).

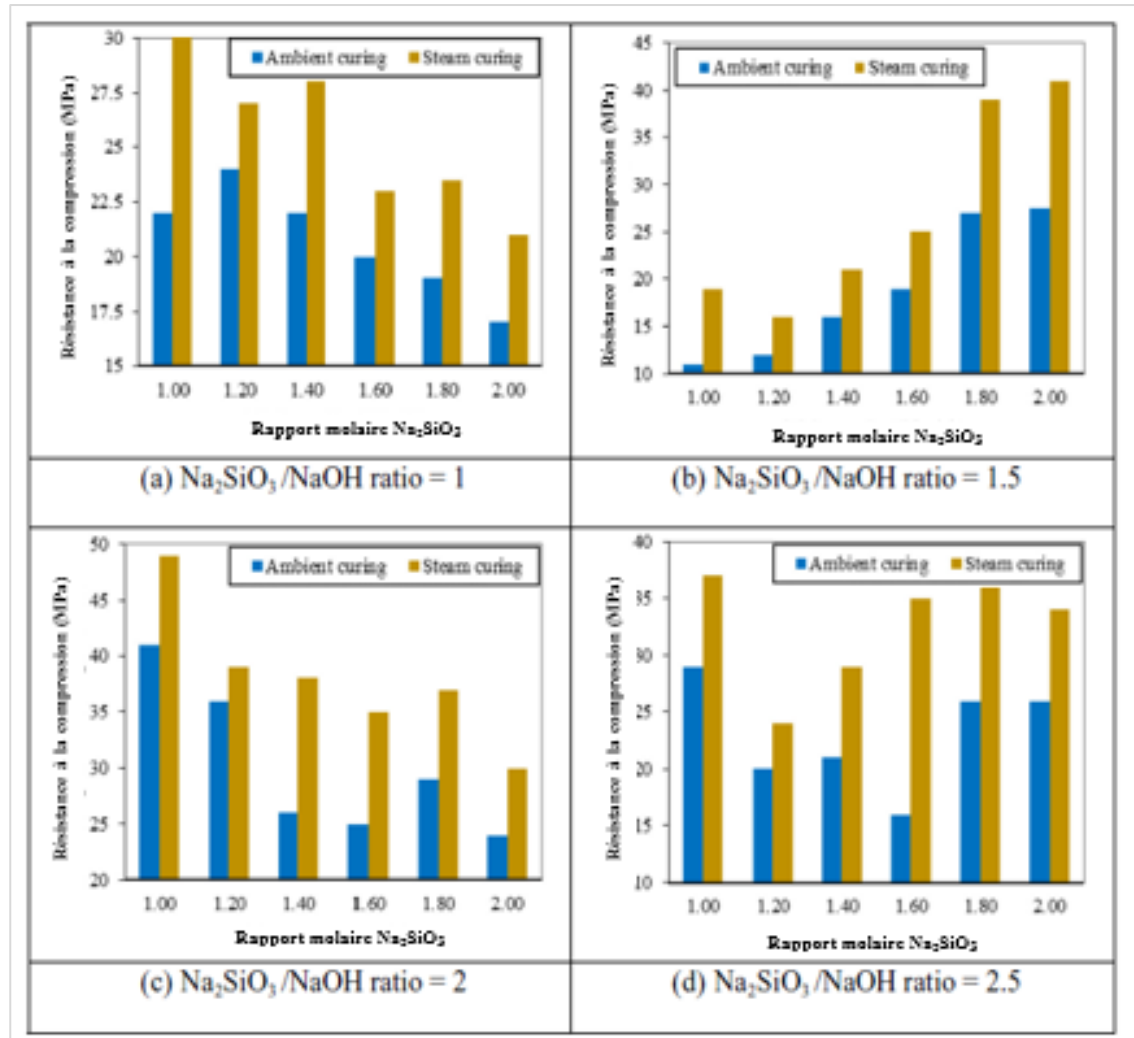


Figure 2.4 : Effet du ratio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sur la résistance à la compression à différentes conditions de cure (Tiré de Hassan et al., 2020)

D'autres facteurs comme le ratio Si/Al des matériaux précurseurs, le taux d'impuretés et la stabilité de la composition chimique des matériaux précurseurs influencent la performance mécanique des composés géopolymères finaux (He et al., 2013). Comme c'est le cas pour le béton de ciment Portland, la résistance du béton géopolymère est grandement affectée par sa teneur en eau. Une faible variabilité dans le rapport eau/liant peut entraîner une importante variation de la résistance à la compression du matériau (Hardjito, 2005). De façon analogue, la finesse des particules

impliquées dans la réaction de géopolymérisation influence la résistance mécanique du béton. En effet, plus les particules de résidu de bauxite ou de cendre volante sont fines, plus la résistance à la compression augmente (Hardjito, 2005). Cette corrélation s'explique par le fait que les particules plus fines présentent une surface spécifique plus importante favorisant leur dissolution dans la solution alcaline (He et al., 2013).

2.1.4 Liant géopolymère à base de résidu de bauxite

El-Gass (2020) est l'un des premiers à avoir enrichi un béton géopolymère fait de cendre volante par du résidu de bauxite produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les recettes développées par El-Gass (2020) sont composées de cendre volante de classe F, de résidu de bauxite, de sable, de NaOH et de Na_2SiO_3 . La composition chimique du résidu de bauxite utilisé dans les mélanges de géopolymère s'apparente à celle de la cendre volante de classe F. En substituant progressivement une fraction de la cendre volante par du résidu de bauxite, par des ratios allant de 0 % à 90 % de substitution, El-Gass (2020) a montré qu'il était possible d'utiliser une quantité importante de résidu de bauxite (jusqu'à 80 % du précurseur solide) pour produire un béton géopolymère offrant des propriétés mécaniques suffisantes pour la construction. Néanmoins, une diminution significative des propriétés mécaniques a été observée lorsque 70 % ou plus du précurseur, sont constitués de résidu de bauxite. Ainsi, la recette identifiée par l'auteur qui assure le meilleur compromis entre la performance mécanique et la valorisation du résidu de bauxite contient 40 % de cendre volante et de 60 % de résidu de bauxite. La résistance moyenne en compression obtenue pour ce mélange a été de 28,4 MPa.

2.2 Matériaux précurseurs solides

2.2.1 Cendre volante

Comme présenté au Tableau 2.1, la cendre volante de classe F est principalement composée de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et CaO (Wood, 2021). Sa composition peut cependant fluctuer significativement en raison de sa méthode de production et de sa provenance. En effet, la cendre volante est un sous-produit de la combustion du charbon des centrales thermiques. Sa composition dépend donc en partie de la composition du charbon, mais également de la température de combustion. La cendre volante ne présente pas de caractéristiques dangereuses, elle est réputée inoffensive pour l'environnement et peut être utilisée de façon sécuritaire plutôt que d'être disposée dans des centres d'enfouissement (Kamseu et al., 2021). Comme remplacement du ciment Portland, la cendre volante joue le rôle d'une pouzzolane artificielle (Hardjito, 2005), ce qui permet de former un composé cimentaire lorsqu'elle est ajoutée à de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 et à de l'eau (H_2O) (Lafarge, 2020). Pour chaque type de cendre volante, la fraction active liée à l'oxyde de calcium (CaO) libre peut être activée par l'eau alors que la fraction amorphe et métastable de l'aluminium (Al) et du silicium (Si) peut être activée par la solution alcaline. Ainsi, un bon dosage est requis pour atteindre un géopolymère avec un bon équilibre chimico-mécanique favorisant une durabilité à long terme (Kamseu et al., 2021).

Tableau 2.1 : Composition de la cendre volante provenant de la compagnie Shand Power Station située à Calgary (AB, Canada) et du résidu de bauxite provenant des installations Rio Tinto situées au Saguenay (QC, Canada)

Composition	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	Autre
Cendre volante de classe F [% massique]	53.7	19.0	4.40	7.80	15.1
Résidu de bauxite [% massique]	11.1	17.2	44.4	2.61	24.7

2.2.2 Résidu de bauxite

Le résidu de bauxite est un solide hautement alcalin généré dans le processus d'extraction de l'alumine. Sa composition chimique typique est présentée au Tableau 2.1. La composition du résidu de bauxite est cependant relativement variable et dépend fortement du lieu de production et de la provenance de la bauxite d'origine. Il est observé que le résidu de bauxite contient des proportions importantes de Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂ et CaO (COREM, 2021), composés retrouvés également dans le ciment Portland et dans la cendre volante de classe F. Ils peuvent également contenir une proportion significative d'oxydes métalliques, des minéraux et une large variété de composés organiques (International Aluminium Institute, 2020). En raison de la haute concentration en alcalis et en aluminates, le résidu de bauxite a le potentiel d'être utilisé comme précurseur solide dans les géopolymères (Hu et al., 2018). Néanmoins, ce potentiel peut être limité par la stabilité chimique des aluminosilicates présents dans le résidu qui découle du processus de production de l'aluminium primaire à partir de minerai de bauxite (Wang et al., 2021). Le résidu de bauxite présente également une

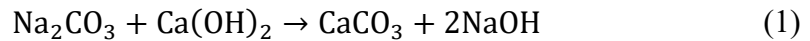
haute alcalinité (pH d'environ 11.3) en raison des grandes quantités d'alcalis utilisées pour extraire l'alumine de la bauxite (Zhang et al., 2014).

2.3 Activation alcaline

La présence d'activateurs alcalins est nécessaire au processus de géopolymérisation. Ces activateurs ont pour fonction d'accélérer la dissolution de la source d'aluminosilicate favorisant la formation d'hydrates stables à faible solubilité et la formation d'une structure compacte avec ces hydrates. Généralement, les activateurs utilisés sont des hydroxydes ou des sels alcalins, soit le NaOH, le Na₂CO₃, le Na₂O_nSiO₂ et le Na₂SO₄ (Balaguer Pascual, 2014). L'activation alcaline se produit plus rapidement quand la solution alcaline contient des silicates solubles en comparaison à une solution alcaline composée uniquement d'hydroxyde (Hardjito, 2005). Un mélange composé d'un ratio Na₂SiO₃ / NaOH élevé, permet une meilleure géopolymérisation et influence directement la résistance en compression du géopolymère (Hardjito D. 2005, Hassan et al. 2020).

2.3.1 Hydroxyde de sodium (NaOH)

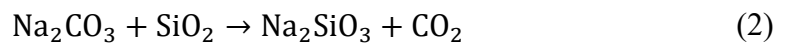
L'hydroxyde de sodium est un activateur alcalin sous forme cristalline, produit par l'électrolyse du chlorure de sodium (eau saturée en sel) ou à partir de carbonate de sodium et d'hydroxyde de calcium (Équation 1) (Balaguer, 2014, Deschamps et al. 2018).



En général, à température ambiante, l'hydroxyde de sodium se présente sous forme de pastille solide pouvant être diluée sous forme de solution aqueuse. À l'état solide, sa masse molaire est de 40 g/mol et sa masse volumique de 2100 kg/m³ (Rifaai, 2020). Lors de la dissolution de ce composé hygroscopique et très corrosif, le pH de la solution augmente significativement au-dessus de la neutralité et peut atteindre la valeur de 14. La dissolution du NaOH engendre également un important dégagement de chaleur, pouvant conduire à l'ébullition de la solution. Pour ces raisons, des mesures de sécurité strictes doivent être respectées lors de sa manipulation durant la fabrication du béton géopolymère. D'un point de vue environnemental, la production d'une tonne de NaOH émet environ une tonne de CO₂ (Balaguer, 2014). Cependant, l'impact environnemental de l'hydroxyde de sodium dans la fabrication d'un géopolymère est négligeable en raison de la très faible quantité de NaOH généralement requise pour activer la réaction (Balaguer, 2014).

2.3.2 Silicate de sodium (Na₂SiO₃)

Le silicate de sodium (Na₂SiO₃) est un activateur alcalin souvent utilisé sous forme de solution aqueuse dans la préparation d'un mélange géopolymère (Balaguer, 2014). La masse molaire du silicate de sodium est de 122 g/mol et sa masse volumique de 2600 kg/m³ (Rifaai, 2020). C'est une base très forte qui, pour une concentration d'environ 1 %, peut augmenter le pH d'une solution aqueuse à un pH de 13 (Rifaai, 2020). Cet activateur alcalin liquide est produit à une température de 140-160 °C, par la dissolution des silicates de sodium cristallins, eux-mêmes fabriqués à une température élevée (≈1400 °C) (Balaguer, 2014) à partir de carbonate ou de sulfate de sodium et de sable de silice. Il est également possible d'obtenir du silicate de sodium liquide par attaque à chaud de produits siliceux par de l'hydroxyde de sodium concentré (Balaguer, 2014). Ce composant peut se former naturellement par la réaction de la silice SiO₂ avec les carbonates de sodium, suivant l'équation 2 (Rifaai, 2020) :



3 Matériaux et méthodologie

3.1 Plan expérimental

La méthodologie de ce projet se divise en cinq grandes phases interreliées (Figure 3.1). De façon générale, la première phase (phase 1) consiste à développer et fabriquer différents mélanges de mortier géopolymère à partir de résidu de bauxite. Les phases 2 et 3 sont respectivement dédiées à la caractérisation et à l'optimisation des mélanges de mortier et de béton géopolymère afin de s'assurer qu'ils atteignent un niveau de performance acceptable, en termes de propriétés à l'état frais et durci. La phase 2 commence par la fabrication, la caractérisation et l'optimisation de différents mélanges de mortier géopolymère, auxquels sera ensuite ajouté le granulat grossier pour fabriquer, caractériser et optimiser les mélanges de béton géopolymère au cours de la phase 3. Pendant les phases 2 et 3, l'effet d'un certain nombre de paramètres (teneur en résidu de bauxite, teneur en eau, cure, etc.) sera étudié sur les principales propriétés du mélange (maniabilité et résistance à la compression). Ces phases permettront de cibler les paramètres optimaux pour la confection de mélanges qui maximise l'utilisation du résidu de bauxite et offre le meilleur potentiel d'utilisation en génie civil.

Le mélange ciblé sera ensuite raffiné et caractérisé de façon plus détaillée à la 4^e phase, en établissant entre autres certaines propriétés additionnelles (le temps de prise, la résistance à la pénétration, la résistance à la traction, la résistance à l'écaillage) mesurées à l'état frais et durci. Finalement, le mélange offrant le meilleur potentiel d'utilisation et la méthode de fabrication seront validés par la mise au point d'un

prototype d'un élément architectural à grande échelle à la phase 5. Cette dernière phase permet de confirmer que la méthode de fabrication est viable également à grande échelle. Chacune des phases sera abordée plus en détail dans les sections suivantes. Ce projet est réalisé au centre universitaire de recherche sur l'aluminium (CURAL) et à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), en collaboration avec Rio Tinto (RT) et Béton Préfabriqué Du Lac (BPDL).

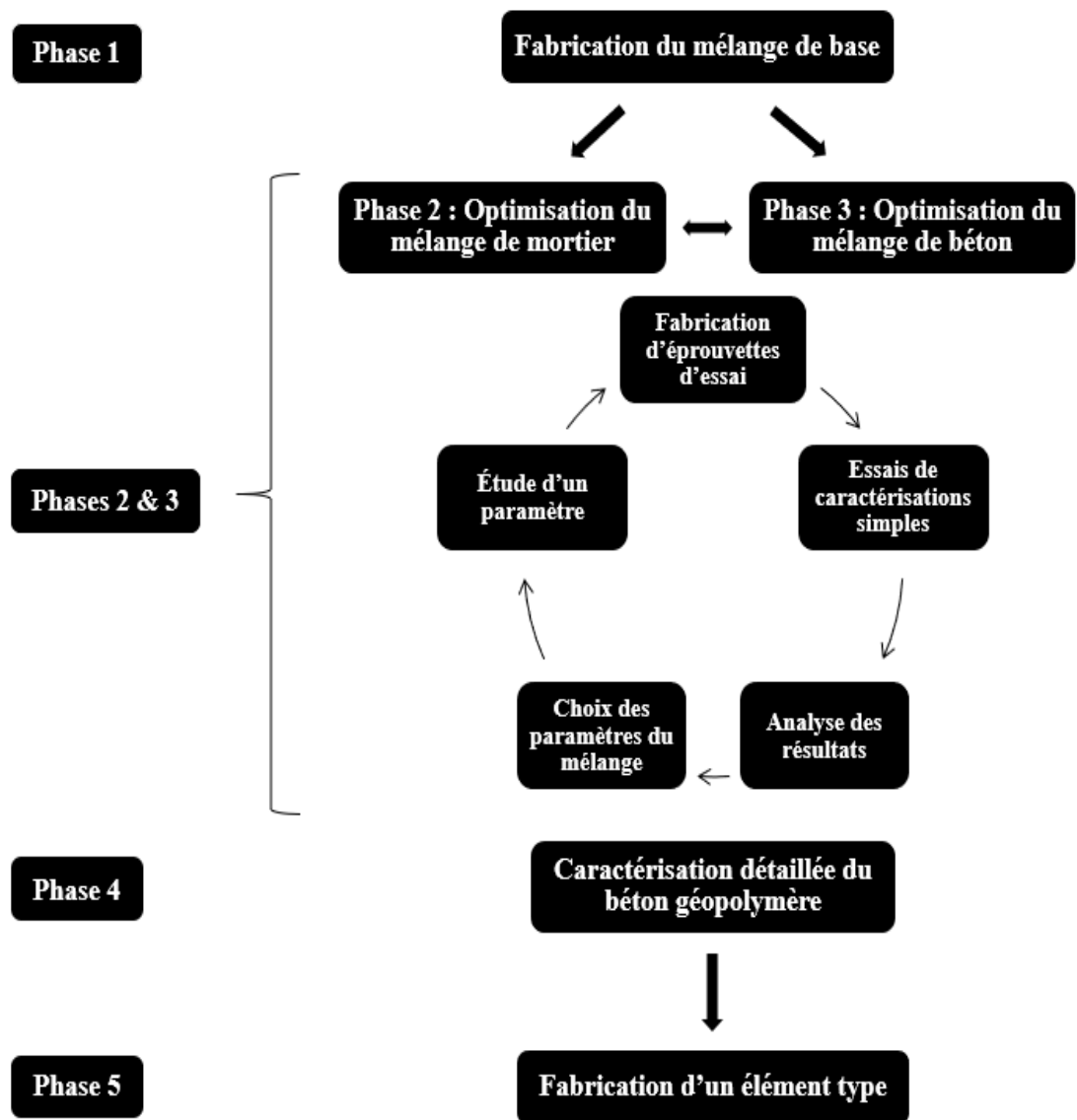


Figure 3.1 : Méthodologie générale du projet

3.2 Matières premières et caractérisation

3.2.1 Cendre volante

Selon la norme CSA 3001-03 (Canadian Standards Association, 2008), la cendre volante (CV) sélectionnée pour ce projet est de classe F, ce qui signifie qu'elle est composée de moins de 15 % de CaO. Ce matériau source provient de la compagnie Shand Power Station située à Calgary (AB, Canada). La cendre volante utilisée affiche une densité de 2.31 g/cm³. Les données de la composition chimique de la cendre volante de classe F se trouvant au Tableau 3.1 sont reprises de la fiche signalétique de l'annexe A.

Tableau 3.1 : Composition chimique de la cendre volante de classe F

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	PAF	Na ₂ O _{éq} (alcalis)
Proportion massique [%]	53.7	19.0	7.80	4.40	1.27	0.46	2.12

3.2.2 Résidu de bauxite

Le résidu de bauxite (RB) utilisé est obtenu à la suite de l'extraction de l'alumine dans le minerai par le procédé Bayer. Cette source de résidu provient des installations de Rio Tinto situées au Saguenay (QC, Canada). Le résidu de bauxite utilisé présente une densité de 3.24 g/cm³ et une finesse de 8 microns. Il affiche une absorption d'environ 26 % (COREM, 2021). Les données de la composition chimique (CC) du résidu de bauxite se trouvant au Tableau 3.2 sont reprises de la fiche signalétique présentée de façon détaillée à l'annexe B.

Tableau 3.2 : Composition chimique (CC) du résidu de bauxite

CC	Proportion massique [%]	CC	Proportion massique [%]	CC	Proportion massique [%]
Fe₂O₃	44.4	CaO	2.61	K₂O	0.06
Al₂O₃	17.2	ZrO₂	0.24	MgO	0.05
SiO₂	11.1	V₂O₅	0.18	MnO	0.01
Na₂O	6.44	P₂O₅	0.13		
TiO₂	4.74	Cr₂O₃	0.10	PAF	11.9

3.2.3 Hydroxyde de sodium (NaOH)

L'hydroxyde de sodium utilisé dans l'ensemble du projet est fourni par le laboratoire MAT au Québec. Sa composition chimique dépasse 97 % de NaOH, tandis que le reste du mélange présente une faible quantité de carbonates, de sulfates, de chlorures et de phosphates. La densité du NaOH est de 2.13 g/cm³.

3.2.4 Silicate de sodium (Na₂SiO₃)

Le silicate de sodium sélectionné est fourni par Univar Solutions™. Sa composition chimique comprend 28.7 % de SiO₂, 8.9 % de Na₂O et 62.4 % de H₂O. Il a une densité de 1.38 g/cm³.

3.2.5 Granulat fin

Le granulat fin utilisé tout au long du projet provient de la carrière de Saint-Henri-de-Taillon (QC, Canada) est fourni par Béton Préfabriqué Du Lac. Ce granulat fin consiste en un sable naturel caractérisé par un module de finesse de 2.7, une densité à l'état saturé et sec en surface (SSS) de 2.68 g/cm³, ainsi qu'un coefficient d'absorption d'environ 0.74 %. Ces propriétés physiques ont été déterminées

conformément à la norme CSA A23.2-6A (Canadian Standards Association, 2019). Sa granulométrie reprise de l'annexe C est présentée au Tableau 3.3 et à la Figure 3.2. Elle est conforme aux exigences de la norme CSA A23.2-2A (Canadian Standards Association, 2019).

Tableau 3.3 : Distribution granulométrique du granulat fin

Ouverture des tamis [mm]	Passant [%]	Limites CSA [%]
10	100	100-100
5	99	95-100
2.5	88	80-100
1.25	60	50-90
0.630	36	25-65
0.315	19	10-35
0.160	5	2-10
0.080	1.7	0-3

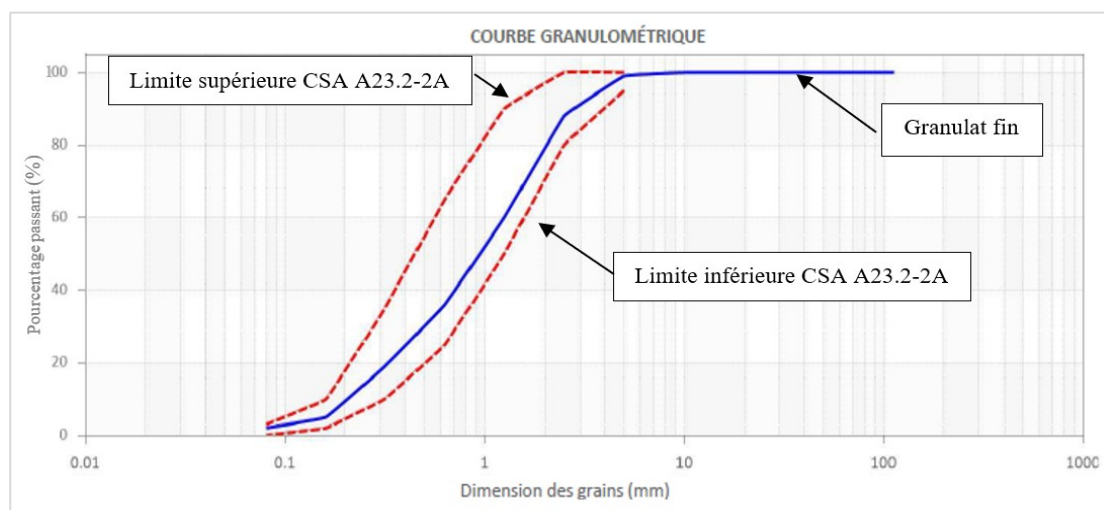


Figure 3.2 : Courbe granulométrique du granulat fin

3.2.6 Granulat grossier

Le granulat grossier utilisé tout au long du projet est fourni par Béton Préfabriqué Du Lac et provient de la carrière des Bergeronnes (QC, Canada). Il s'agit d'un granulat 2.5-10 mm caractérisé par une densité à l'état saturé et sec en surface (SSS) de 2.85 g/cm³ et d'un coefficient d'absorption d'environ 0.28 %. Ces propriétés physiques ont été établies selon la norme CSA A23.2-12A (Canadian Standards Association, 2019). Sa granulométrie reprise de l'annexe D est présentée au Tableau 3.4 et à la Figure 3.3. Elle est comparée aux limites données par la norme CSA A23.2-2A (Canadian Standards Association, 2019).

Tableau 3.4 : Distribution granulométrique du granulat grossier

Ouverture des tamis [mm]	Passant [%]	Limites CSA [%]
14	100	100-100
10	89	85-100
5	19	10-30
2.5	2	0-10
1.25	1	0-5
0.630	1	-
0.315	1	-
0.160	1	-
0.080	0.5	0-2

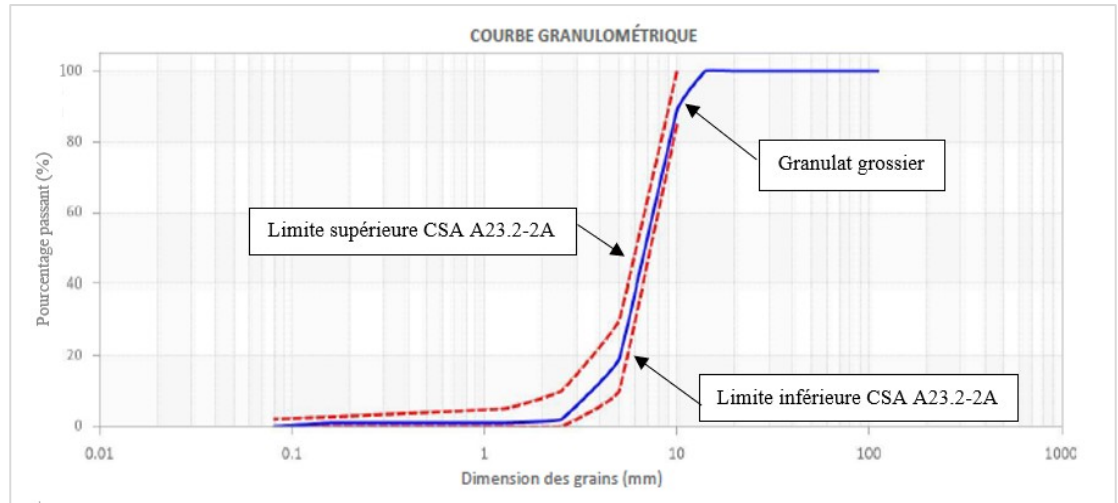


Figure 3.3 : Courbe granulométrique du granulat grossier

3.2.7 Superplastifiant

Pour cette étude, deux superplastifiants de type polycarboxylate (V_6 et V_2) et deux superplastifiants de type naphthalène (N_3 et E_3) disponibles ont été utilisés. Les valeurs des densités relatives à 25 °C, telles que présentées au Tableau 3.5, sont reprises des fiches techniques détaillées à l'annexe E.

Tableau 3.5 : Densité à 25 °C des superplastifiants utilisés

Nom	Type	Densité [g/ml]
V_6	Superplastifiant à base de polycarboxylate	1,09
V_2	Superplastifiant à base de polycarboxylate	1,08
N_3	Superplastifiant à base de naphthalène	1,21
E_3	Superplastifiant à base de naphthalène	1,21

3.3 Phase 1 : Fabrication du mélange de base

Le premier volet du programme expérimental consiste à confectionner et améliorer différents mélanges de base (mortier géopolymère). Tout d'abord, la

composition de base fabriquée au cours de cette phase est présentée au Tableau 3.6. La recette est élaborée en s'appuyant sur les mélanges 60-40 (avec un liant constitué de 60 % de cendre volante et 40 % de résidu de bauxite) développés par El-Gass (2020) et Lago Araujo Seixas (2020).

Tableau 3.6 : Mélange de mortier géopolymère 60-40 de El-Gass (2020), en kg pour 1 m³ de mortier

Mélange	Sable	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
60-40 (El-Gass)	1164,84	522,68	297,47	37,63	189,96	58,97

Le résidu de bauxite (RB) utilisé par El-Gass (2020) se présente sous forme de solution aqueuse, avec une forte teneur en eau qui peut varier considérablement entre deux échantillons. Pour cette étude, afin d'apporter un dosage précis de la quantité d'eau dans les mélanges, le résidu de bauxite a été préalablement séché et broyé sous forme de poudre. En se basant sur les travaux de El-Gass (2020) et Lago Araujo Seixas (2020), la recette de référence (R0-100) constituée uniquement de cendre volante comme précurseur solide et utilisée dans ce projet est présentée au Tableau 3.7. À titre comparatif, le mélange dont le précurseur solide est remplacé à 60 % par du résidu de bauxite est également présenté. Cette formulation est similaire à celle testée par El-Gass (2020), mais contient du résidu de bauxite préalablement séché et broyé.

Tableau 3.7 : Mélange de mortier de référence R0-100 et mélange de mortier de comparaison R60-40 testé dans ce projet, en kg pour 1 m³ de mortier

Mélange	Sable	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
R0-100	1280,19	0	895,87	41,36	208,77	64,81
R60-40	1280,19	574,43	321,43	41,36	208,77	64,81

De façon générale, la fabrication des mélanges consiste à mélanger les ingrédients secs (sable, cendre volante, résidu de bauxite et hydroxyde de sodium (NaOH) avec la totalité des ingrédients liquides (silicate de sodium (Na₂SiO₃) et eau) pour former le mortier géopolymère. Pour toutes les recettes réalisées au cours de la fabrication et de l'optimisation du mortier géopolymère (phases 1 et 2), la bétonnière électrique utilisée est présentée à la Figure 3.4.



Figure 3.4 : Bétonnière électrique - Modèle 060-4050-2 (Tiré de : Canadian Tire)

Avant la fabrication des mélanges, la teneur en eau des ingrédients solides (précurseurs et granulats) est évaluée conformément à la norme CSA A23.2-11A (Canadian Standards Association, 2019) et la quantité d'eau incorporée est ajustée au besoin pour la recette. Pour la fabrication de 25 litres de mortier géopolymère requis à cette phase, la séquence de fabrication et de malaxage employée est la suivante :

1. Peser les ingrédients secs et les ingrédients liquides ;
2. Incorporer les cristaux de NaOH dans la solution de Na_2SiO_3 et mélanger jusqu'à dissolution complète du NaOH ;
3. Recouvrir avec une pellicule plastique la solution alcaline afin de diminuer le contact avec l'air ambiant ;
4. Ajouter le sable dans le malaxeur et malaxer 2 minutes ;
5. Introduire graduellement 30 % de l'eau de gâchage et malaxer 4 minutes ;
6. Ajouter les liants et malaxer 6 minutes pour homogénéisation ;
7. Ajouter graduellement la solution alcaline et malaxer rigoureusement 2 minutes entre chaque ajout ;
8. Introduire graduellement le restant de l'eau de gâchage et malaxer rigoureusement 6 minutes ;
9. Ajouter un adjuvant (lorsque requis) et malaxer 2 minutes ;
10. Arrêter le malaxeur et laisser reposer le mortier durant 2 minutes ;
11. Faire les essais d'affaissement et de teneur en air ;
12. Préparer les cylindres de mortier géopolymère ;
13. Placer au four pour la cure.

Un descriptif détaillé des essais réalisés est présenté à la section 3.6. Dans ce protocole, les mélanges frais de mortier géopolymère sont caractérisés à l'étape 11 par le biais des essais d'affaissement et de teneur en air, conformément aux normes CSA A23.2-5C et CSA A23.2-4C (Canadian Standards Association, 2019). Chaque cylindre de mortier géopolymère (76,2 mm x 152,4 mm) a été fabriqué selon les spécifications de la norme CSA A23.2-3C (Canadian Standards Association, 2019). La Figure 3.5 a) présente les cylindres à l'état frais immédiatement après leur fabrication, avant le processus de cure. De plus, chaque mélange est soumis à une caractérisation à l'état durci en effectuant un essai de compression sur cylindre (CSA A23.2-9C). Afin de procéder aux essais de résistance à la compression sur cylindres, des coiffes de soufre sont réalisées, conformément à la norme ASTM C617 (ASTM International, 2015). La Figure 3.5 b) présente un cylindre de mortier géopolymère du mélange contenant 60 % de résidu de bauxite après une cure de 24 heures, avant d'être soumis à un essai de compression.

a) Confection des cylindres avant la cure b) Cylindre avant l'essai de compression



Figure 3.5 : Fabrication des mortiers géopolymères (a) Confection des cylindres avant la cure (b) Cylindre avant l'essai de compression

3.4 Phase 2 : Optimisation de la recette de mortier géopolymère

En parallèle au processus de fabrication, les mélanges testés de mortier géopolymère ont été caractérisés et optimisés afin d'améliorer les propriétés requises. Les propriétés de référence choisies sont la résistance à la compression (f'_c) et l'affaissement, qui sont les principales propriétés utilisées pour caractériser le béton en construction. De ce fait, la résistance à la compression est directement influencée par les paramètres à l'étude, soit le rapport résidu de bauxite/cendre volante, le rapport eau/liant, les adjuvants, le temps de cure ainsi que la température de cure. L'ajustement du dosage de chaque mélange est effectué en fonction de l'humidité des matériaux au moment de la coulée. Le Tableau 3.8 présente les paramètres étudiés au cours de la phase d'optimisation du mortier géopolymère. L'effet de ces paramètres sur les propriétés des mélanges de mortier géopolymère sera étudié en détail. Les caractéristiques de chaque mélange testé sont présentées dans les sous-sections suivantes. Une fois le mélange optimisé, des essais mécaniques additionnels sur dalles, sur poutrelles et sur cylindres, sont prévus à la phase 4 de cette méthodologie, afin d'évaluer en profondeur les propriétés du mortier géopolymère. Plusieurs paramètres peuvent influencer les propriétés du mélange, ainsi, en se basant sur El Gass (2020), Hardjito (2015) et les objectifs de ce projet, il a été choisi d'étudier les paramètres suivants.

Tableau 3.8 : Paramètres à l'étude pour la phase 2

Paramètres à l'étude	
1	Proportion résidu de bauxite : cendre volante
2	Rapport eau / liant
3	Superplastifiant
4	Durée et méthode de cure
5	Température de cure constante
6	Température de cure croissante

3.4.1 Proportion de résidu de bauxite : cendre volante

Tout d'abord, l'influence des différentes proportions de liant a été étudiée. Un des principaux objectifs du projet est la valorisation du résidu de bauxite. Il est donc important de maximiser le résidu de bauxite tout en conservant une résistance à la compression suffisante. La proportion de résidu de bauxite et de cendre volante dans le mortier géopolymère a une influence sur ses propriétés à l'état durci. Le Tableau 3.9 présente les différents rapports de résidu de bauxite et cendre volante testés.

Tableau 3.9 : Différentes proportions de liants à l'étude

Proportion RB : CV	
1	0 : 100
2	60 : 40
3	70 : 30
4	80 : 20

La recette de base a été modifiée afin de faire varier les proportions de liants et de trouver la combinaison optimale qui garantit une meilleure résistance à la compression. Quatre formulations de liants ont été sélectionnées : 0 % de résidu de

bauxite et 100 % de cendre volante (0:100), 60 % de résidu de bauxite et 40 % de cendre volante (60:40), 70 % de résidu de bauxite et 30 % de cendre volante (70:30), ainsi que 80 % de résidu de bauxite et 20 % de cendre volante (80:20). Les mélanges sont présentés au Tableau 3.10 où les masses indiquées correspondent à un volume d'un mètre cube de mortier géopolymère.

Tableau 3.10 : Mélanges de mortier géopolymère composés de différentes proportions de liants, en kg pour 1 m³ de mortier

Mélange	Sable	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
R0-100	1280,19	0	895,87	41,36	208,77	64,81
R60-40	1280,19	574,43	321,43	41,36	208,77	64,81
R70-30	1280,19	627,11	268,76	41,36	208,77	64,64
R80-20	1280,19	716,69	179,18	41,36	208,77	90,12

Il est possible de constater au Tableau 3.10 que la quantité d'eau ajoutée au mélange R80-20 est supérieure à celle ajoutée aux autres mélanges. Cette différence s'explique par le fait que le résidu de bauxite, constituant principal du mortier géopolymère, nécessite une plus grande quantité d'eau que la cendre volante afin d'être maniable. En raison de l'objectif de ce projet qu'est la valorisation du résidu de bauxite, seules les recettes R60-40 et R70-30 ont été retenues pour examiner l'effet des autres paramètres étudiés ci-après.

3.4.2 Rapport eau / liant

Le rapport eau/liant exerce une grande influence sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un mortier ou d'un béton. Pour atteindre une résistance à la compression acceptable tout en maintenant un affaissement cible, différents ratios

eau/liant (e/l) ont été testés. Rapidement, l'évidence de devoir se concentrer sur une propriété à la fois s'est fait remarquer, car l'affaissement et la résistance à la compression sont en corrélation inverse dans ce cas. Ainsi, la présente phase d'optimisation se concentre exclusivement sur le paramètre de la résistance à la compression.

Dans le but de déterminer le rapport eau/liant (e/l) optimal pour le mortier géopolymère, les mélanges présentés au Tableau 3.11 ont été étudiés en détail. Dans le rapport eau/liant, il est important de noter que la fraction d'eau inclut non seulement le volume d'eau ajouté au mélange, mais également le volume de la solution aqueuse des activateurs alcalins ($0.72 \cdot \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{eau ajoutée}$). En modifiant le rapport e/l, le ratio $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ varie entre 2.75 et 5.00. Le liant quant à lui est composé de la cendre volante et du résidu de bauxite. Toutes les recettes testées sont des dérivées de la recette de base contenant 60 % de résidu de bauxite (RB) et 40 % de cendre volante (CV) et diffèrent seulement par leur rapport eau/liant (R60-40, voir Tableau 3.10).

Tableau 3.11 : Mélanges de mortier géopolymère composés de différentes proportions d'eau et de liant, en kg pour 1 m³ de mortier

Mélange	Rapport e/l	Sable	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
EL12	0,12	1239,92	556,37	311,32	40,05	109,69	25,32
EL13	0,13	1239,92	556,37	311,32	40,05	121,88	28,13
EL18	0,18	1239,92	556,37	311,32	40,05	162,61	37,53
ES-25	0,24	1239,92	556,37	311,32	40,05	202,20	58,34
ES-50	0,25	1239,92	556,37	311,32	40,05	202,20	70,01
ES-100	0,28	1239,92	556,37	311,32	40,05	202,20	93,34

Après avoir varié la température de cure sur les mélanges, il a été observé que les résistances à la compression obtenues étaient supérieures à celles requises. Sachant que le pourcentage d'eau dans le mélange exerce une influence sur le mortier géopolymère à l'état frais et à l'état durci, une réflexion a été menée sur l'augmentation du rapport eau/liant en ajustant le pourcentage d'eau. Les recettes sont composées d'une quantité d'eau équivalente à 25 %, 50 % ou 100 % de la quantité d'eau déjà considérée dans le dosage. Ces mélanges sont dérivés de la recette de base contenant 60 % de résidu de bauxite et 40 % de cendre volante (ES-25, ES-50 et ES-100, voir Tableau 3.11).

3.4.3 Superplastifiant

L'ajout de superplastifiant dans le mortier/béton est une pratique courante pour améliorer sa malléabilité et obtenir un affaissement conforme aux normes établies. Différentes proportions de quatre superplastifiants présentées au Tableau 3.12 ont été testées sur les mortiers géopolymères (détails des superplastifiants au Tableau 3.5).

Tableau 3.12 : Différents superplastifiants à l'étude

Superplastifiant	
1	V ₆
2	V ₂
3	N ₃
4	E ₃

Afin de suivre les recommandations du fabricant établies pour un béton de ciment Portland, des quantités minimales et maximales de chaque type de superplastifiant (SP) ont été ajoutées au mélange. De plus, des dosages plus élevés,

dépassant les recommandations pour un béton de ciment, ont été expérimentés spécifiquement avec le superplastifiant E₃ (E₃₋₂₅, E₃₋₅₀, E₃₋₁₀₀). Pour éviter d'augmenter le rapport eau/liant et ainsi affecter la résistance à la compression, la quantité d'eau a été ajustée en fonction de la masse du superplastifiant ajoutée. Les mélanges testés avec des superplastifiants (SP) et détaillés au Tableau 3.13 sont tous dérivés de la recette de base R60-40. En ce qui concerne les recettes avec un dosage plus élevé, la quantité de superplastifiant E₃ est équivalente à 25 %, 50 % ou 100 % de la quantité d'eau ajoutée.

Tableau 3.13 : Mélanges de mortier géopolymère avec superplastifiant, en kg pour 1 m³ de mortier

Mélange*	SP	Sable	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
V _{6max}	6,48	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87
V _{6min}	1,68	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	44,04
V _{2max}	8,03	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87
V _{2min}	1,94	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	44,04
N _{3max}	8,35	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87
N _{3min}	1,86	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	44,04
E _{3max}	8,54	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87
E _{3min}	1,94	1239,93	556,37	311,32	40,05	202,20	44,04
E ₃₋₂₅	11,66	1238,72	555,83	311,02	40,02	202,01	50,60
E ₃₋₅₀	23,31	1238,72	555,83	311,02	40,02	202,01	46,62
E ₃₋₁₀₀	46,62	1238,72	555,83	311,02	40,02	202,01	46,62

* La désignation des superplastifiants réfère au Tableau 3.12 et les indices min et max, réfèrent respectivement aux dosages minimum et maximum suggérés par le fabricant.

3.4.4 Durée et méthode de cure

La durée et la température auxquelles la cure d'un élément de béton est effectuée influencent les propriétés à l'état durci du mortier géopolymère. Deux séries

d'essais ont été réalisées afin d'étudier la durée et la méthode de cure employée. La première série consistait à évaluer différentes périodes de cure initiale (précure) à température ambiante (~20 °C), suivies d'une cure à température élevée (60 °C). Le concept de faire cure initiale (précure) vise à accélérer le décoffrage des éléments à grande échelle afin d'augmenter la production en industrie. Le Tableau 3.14 présente les temps de précure et de cure à l'essai pour cette première série de tests.

Tableau 3.14 : Différents temps de précure et de cure à l'étude

Mélange	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Durée de précure à température ambiante ~20 °C [jrs]	0	2	2	3	3	7	7
Durée de cure à température élevée ~60 °C [jrs]	1	0	1	0	1	0	1

La deuxième série implique une cure immédiate à température élevée à (de 50 °C à 90 °C) juste après la coulée, tout en évaluant l'effet de la durée de cure sur la résistance mécanique. Le Tableau 3.15 présente les différentes durées de cure à température élevée (50 °C à 90 °C) testées pour cette 2^e série d'essais. Toutes les recettes testées sont dérivées des recettes de base qui contiennent entre 60 à 70 % de résidu de bauxite (RB) et entre 30 à 40 % de cendre volante (CV) (R60-40 et R70-30, voir Tableau 3.10).

Tableau 3.15 : Différentes durées de cure à température élevée (50 °C à 90 °C)

Durée de cure [h]	
1	6
2	24
3	48

3.4.5 Température de cure constante

La température de cure est un paramètre très important qui influence les propriétés à l'état durci. L'effet de ce paramètre a été testé sur les mélanges R60-40 et R70-30. Toutes les recettes testées sont dérivées des recettes de base, composées de 60 à 70 % de résidu de bauxite (RB) et de 30 à 40 % de cendre volante (CV) (R60-40 et R70-30, voir Tableau 3.10). Des éprouvettes de chacun des mélanges ont été fabriquées et mises au four pour une durée de 6, 24 ou 48 heures à des températures constantes. Les températures étudiées sont présentées au Tableau 3.16.

Tableau 3.16 : Différentes températures de cure au four

Température de cure au four [°C]	
1	50
2	60
3	70
4	80
5	90

3.4.6 Température de cure croissante

Après avoir testé différentes cures à température constante, il était intéressant d'explorer une cure par paliers avec différentes températures, dans le but de réduire la consommation d'énergie. Ainsi, quatre groupes de cylindres composés du mélange R60-40 ont été fabriqués et mis au four pour une cure par paliers. Chaque groupe est composé de 3 échantillons (pour un total de 12 cylindres). Après la coulée, les éprouvettes sont initialement mises au four pendant une période d'un jour à une température de 50 °C, tel qu'illustré à la Figure 3.6. Ensuite, la température est

augmentée successivement, à des intervalles d'un jour, de 10, 20 et 10 °C respectivement, et maintenue constante entre chaque incrément de température. Après 4 jours, les éprouvettes restantes à 90 °C sont sorties du four et testées mécaniquement par un essai de compression. La recette de base contenant 60 % de résidu de bauxite (RB) et 40 % de cendre volante (CV) est utilisée pour cet essai (R60-40, voir Tableau 3.10).

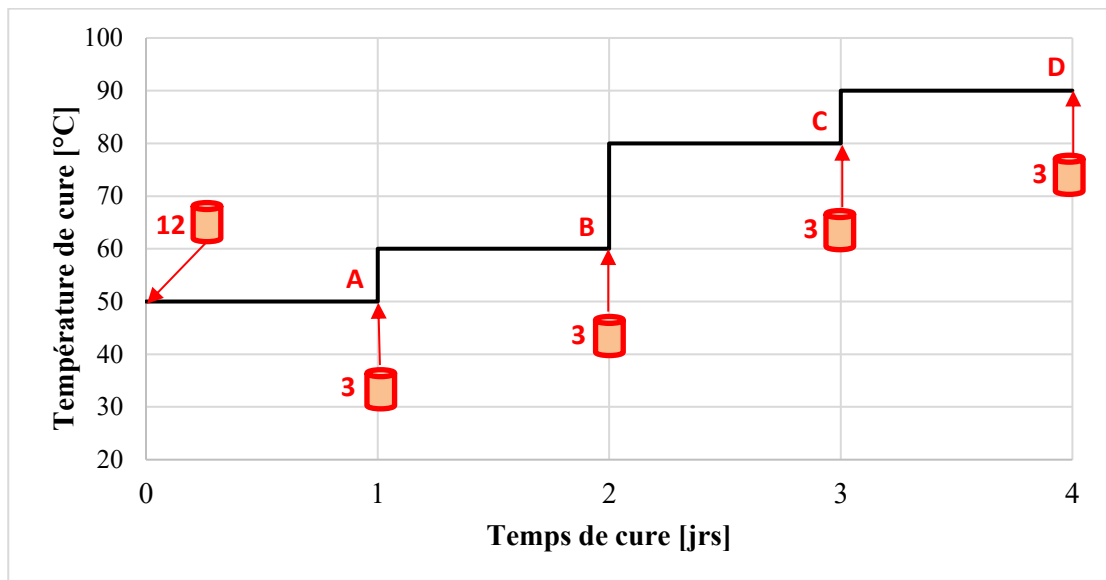


Figure 3.6 : Variation de la température en fonction du temps de cure au four

3.5 Phase 3 : Optimisation de la recette de béton géopolymère

Pour atteindre l'objectif initial de concevoir un béton géopolymère, il est nécessaire d'incorporer des granulats grossiers dans la pâte de géopolymère optimisée précédemment. La proportion idéale a été déterminée en prenant en compte la granulométrie combinée du sable et du gravier. Étant donné que le comportement du béton géopolymère diffère de celui du béton de ciment, trois autres proportions ont été soumises à des essais. Les ratios étudiés sont présentés au Tableau 3.17.

Tableau 3.17 : Différentes proportions sable : gravier à l'étude

Proportion sable : gravier	
1	80:20
2	50:50
3	38:62
4	0:100

Quatre combinaisons de granulats ont été sélectionnées : 80 % de sable et 20 % de gravier (80:20), 50 % de sable et 50 % de gravier (50:50), 38 % de sable et 62 % de gravier (38:62), ainsi que 0 % de sable et 100 % de gravier (0:100). Les mélanges sont présentés au Tableau 3.18 et les masses indiquées correspondent à un volume d'un mètre cube de mortier géopolymère. Tous les mélanges sont issus de la recette de base contenant 60 % de résidu de bauxite et 40 % de cendre volante (R60-40).

Tableau 3.18 : Mélanges de béton géopolymère composés de différentes proportions de sable et de gravier, en kg pour 1 m³ de béton

Mélange	Sable	Gravier	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
SG80-20	991,94	247,98	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87
SG50-50	619,96	619,96	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87
SG38-62	471,17	768,75	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87
SG0-100	0	1239,92	556,37	311,32	40,05	202,20	38,87

3.6 Phase 4 : Caractérisation détaillée du béton géopolymère

Cette étape du programme expérimental est définie par la caractérisation approfondie des propriétés du matériau de géopolymère. Dans un premier temps, les mélanges de mortier et de béton développés à l'étape d'optimisation ont été répétés et caractérisés au moyen d'essais de compression et d'affaissement. Ces mélanges ont

servi de point de départ afin d'identifier les propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci à bonifier. Donc, cette phase a pour objectif de valider les propriétés physiques, les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers confectionnés et ainsi développer des bétons géopolymères. Le Tableau 3.19 présente les essais normés effectués à la phase 4. Certains de ces essais ont été préalablement réalisés aux phases 1 à 3, et sont repris à la phase 4. La méthodologie de ces essais est détaillée ci-dessous.

Tableau 3.19 : Essais réalisés à la phase 4 et normes associées

	Essais	Normes
Propriétés physiques	Affaissement	A23.2-5C
	Teneur en air	A23.2-4C
	Masse volumique	ASTM C642
	Temps de prise	ASTM C403
Propriétés mécaniques	Résistance à la compression	A23.2-9C
	Résistance à la traction par flexion	A23.2-8C
	Résistance à la traction par fendage	A23.2-13C
	Module d'élasticité et courbe contrainte-déformation	ASTM C469
Durabilité	Résistance à l'écaillage	A23.2-22C
	Essai de lixiviation	-

Les deux principaux mélanges de béton géopolymère B60-40 et B70-30 testés à la phase 4 et présentés au Tableau 3.20 sont élaborés à partir des mortiers R60-40 et R70-30, desquels est ajouté le gravier. De plus, le mélange B60-40SP également présenté au Tableau 3.20 est analogue au mélange B60-40, à l'exception que la moitié de l'eau initialement prévue dans le mélange est substituée par du superplastifiant E₃. Les choix de ces mélanges seront justifiés par les résultats obtenus au chapitre 4.

Tableau 3.20 : Mélanges de béton géopolymère testés à la phase 4, en kg pour 1 m³ de béton

Mélange	Sable	Gravier	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O	SP*
B60-40	1239,92	247,98	556,37	311,32	40,05	202,20	46,67	0
B70-30	1239,92	247,98	607,38	260,31	40,05	202,20	46,67	0
B60-40SP	1239,92	247,98	607,38	260,31	40,05	202,20	23,34	23.33

*SP : Superplastifiant E₃

3.6.1 Propriétés physiques

3.6.1.1 Affaissement

L'essai d'affaissement est réalisé conformément la norme A23.2-5C (Canadian Standards Association, 2019), pour évaluer la maniabilité du béton à l'état frais. L'affaissement est mesuré à environ 8 à 10 minutes, après le contact entre la solution alcaline et le liant. Le cône est placé sur une surface solide et plane. Il est rempli en trois couches et pilonné 25 coups chacune. L'affaissement est mesuré par la différence entre la hauteur du cône et celle de l'échantillon. Pour la réalisation de cet essai, 2 cônes différents ont été utilisés. Le choix du cône dépend du volume de la recette. Le moule conventionnel est présenté sur la Figure 3.7. Les dimensions du petit cône sont proportionnelles à celles du cône conventionnel, telles que présentées au Tableau 3.21.



Figure 3.7 : Moule conventionnel pour l’essai d’affaissement (Tiré de : TMI)

Tableau 3.21 : Dimensions des cônes, en mm

	Petit cône	Grand cône
Diamètre supérieur	50	100
Diamètre inférieur	100	200
Hauteur	150	300

3.6.1.2 Teneur en air

Le volume d’air entraîné dans le béton géopolymère peut être mesuré par différentes méthodes. La méthode la plus utilisée par sa fiabilité est la méthode pressiométrique. La teneur en air est déterminée selon la norme A23.2-4C (Canadian Standards Association, 2019). La mise en place du béton suit le même principe que pour l’affaissement. Le béton est échantillonné en trois couches, avec 25 coups administrés entre chaque couche. Le contenant utilisé a un volume de 7.02 litres. L’appareil utilisé pour la réalisation de cet essai est présenté sur la Figure 3.8.



Figure 3.8 : Pressiomètre CA-0500 (Tiré de : TMI)

3.6.1.3 Masse volumique

La masse volumique du béton géopolymère varie selon le dosage du liquide, la quantité de liant, la densité des granulats et la quantité d'air emprisonné. Elle est déterminée conformément à la norme ASTM C642 (ASTM International, 2021). L'essai se décrit en deux étapes soit de peser le spécimen une fois à l'état frais et une fois à l'état durci après sa durée de cure. Particulièrement pour ce cas, la densité après 28 jours est une donnée intéressante pour suivre le comportement du géopolymère. Une balance avec une précision de ± 0.001 g a été utilisée pour cet essai.

3.6.1.4 Temps de prise

L'essai de temps de prise est réalisé conformément la norme ASTM C403 (ASTM International, 2016), pour évaluer à la fois le temps de la prise initiale et finale du mélange de béton. Le temps de la prise initiale est caractérisé par le début de la perte de la plasticité du mélange. Plusieurs facteurs affectent cette propriété physique, tels

que les conditions atmosphériques et la finesse du liant. L'essai se fait avec des aiguilles de tailles différentes. À différents moments, chacune d'entre elles est placée dans l'appareil de résistance à la pénétration. Progressivement et uniformément, une force verticale est appliquée vers le bas jusqu'à avoir une profondeur de pénétration d'environ 25 mm. L'appareil utilisé pour la réalisation de cet essai est présenté sur la Figure 3.9.



Figure 3.9 : Pénétromètre H-4133 (Tiré de : Humboldt)

3.6.2 Propriétés mécaniques

3.6.2.1 Résistance à la compression

Conformément à la norme CSA A23.2-9C (Canadian Standards Association, 2019), l'essai de la résistance à la compression est effectué sur des éprouvettes de 76,2 mm x 152,4 mm. Chaque valeur est basée sur la moyenne de trois cylindres. Cet essai se fait pour la majorité des éprouvettes, à la fin de la cure et à 28 jours. La résistance à

la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale du cylindre. Afin d'avoir une distribution uniforme des contraintes, des coiffes de soufre sont fabriquées conformément à la norme ASTM C617 (ASTM International, 2015). Les cylindres sont soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture. Un taux de chargement compris entre 0.15 et 0.35 MPa/s est appliqué sur les éprouvettes. La presse a une capacité nominale de 1500 kN. L'appareil utilisé pour la réalisation de cet essai est présenté sur la Figure 3.10.



Figure 3.10 : Presse à béton automatique PILOT 1500 kN (Tiré de : Controls)

3.6.2.2 Résistance à la traction par la flexion

L'essai de la résistance à la traction par la flexion est effectué sur des poutres simples chargées aux tiers de la portée, de 152,4 mm x 152,4 mm x 533,4 mm, conformément à la norme CSA A23.2-8C (Canadian Standards Association, 2019). Il consiste à centrer l'échantillon sur les blocs d'appui. De cette manière, les blocs d'application de la charge viennent appliquer une charge verticale aux tiers de la

longueur entre les appuis. Le taux de chargement doit être maintenu entre 0.85 et 1.20 MPa/min. Le montage type pour la réalisation de cet essai est présenté sur la Figure 3.11. Le mélange de base de mortier est modifié par le remplacement de 20 % du sable par du gravier. Les recettes utilisées sont présentées au Tableau 3.20 (B60-40 et B70-30). En raison du volume de béton requis, le protocole de fabrication présenté à la section 3.7 a été utilisé pour la confection des éprouvettes de cet essai.

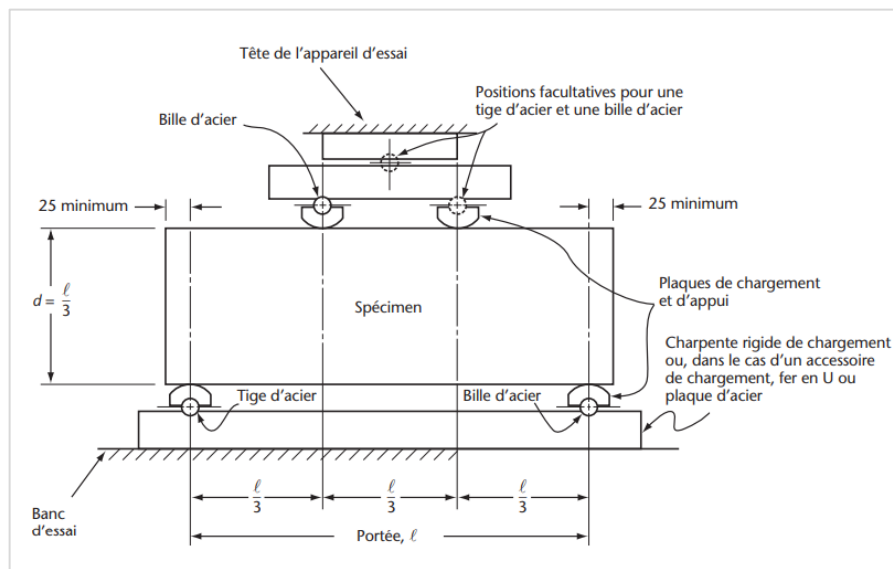


Figure 3.11 : Schéma du montage servant à l'essai de flexion du béton par la méthode du chargement au tiers (Tiré de : Canadian Standards Association, 2019)

3.6.2.3 Résistance à la traction par fendage

L'essai de la résistance à la traction par fendage, communément appelé « essai brésilien », est réalisé selon la norme CSA A23.2-13C (Canadian Standards Association, 2019). Il consiste à appliquer une pression verticale sur un cylindre placé à l'horizontale, ce qui cause un écrasement latéral sur le cylindre, tel que présenté à la Figure 3.12.

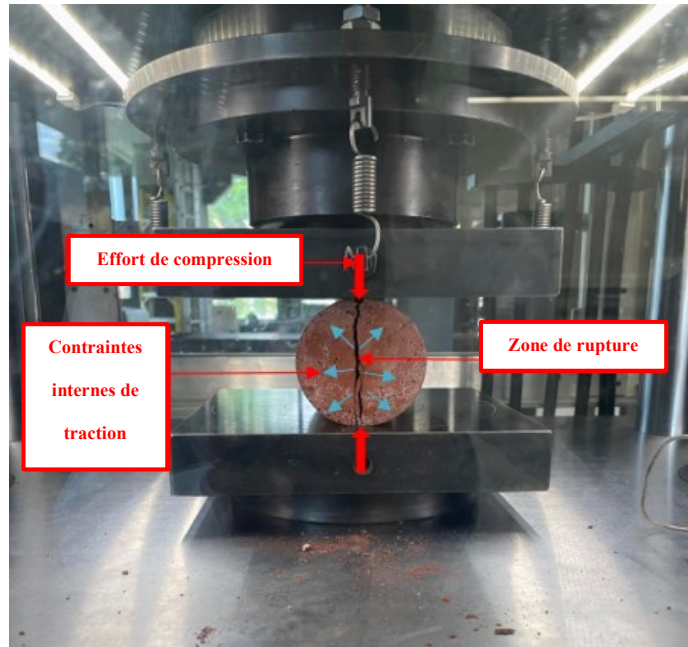


Figure 3.12 : Le montage type pour la réalisation de cet essai

Les échantillons utilisés sont de mêmes dimensions que ceux utilisés pour les essais de compression, soit de 76,2 mm x 152,4 mm. Le taux de chargement doit être maintenu entre 700 à 1400 kPa/min. La presse a une capacité nominale de 1000 kN. L'appareil utilisé pour la réalisation de cet essai est présenté à la Figure 3.13.



Figure 3.13 : Presse à béton automatique C64.106 (Tiré de : MTS Criterion)

3.6.2.4 Module d'élasticité et courbe contrainte-déformation

Conformément à la norme ASTM C469 (ASTM International, 2022), cet essai est réalisé sur des cylindres de 76,2 mm x 152,4 mm. Cet essai consiste à mesurer la déformation d'une éprouvette sous chargement uniaxial de compression pour alors être en mesure de déterminer la relation contrainte déformation du matériau ainsi que son module d'élasticité. L'appareil utilisé pour cet essai est le même que pour l'essai de traction par fendage (Figure 3.13).

3.6.3 Durabilité

3.6.3.1 Résistance à l'écaillage

L'essai de la résistance à l'écaillage a été réalisé conformément à la norme CSA A23.2-22C (BNQ 2621-905) (Canadian Standards Association, 2019). Afin d'évaluer la durabilité du matériau, les plaques de béton (300 mm x 300 mm x 75 mm) sont

soumises à un cycle de gel-dégel avec un ajout de solution saline (3 % de chlorure de sodium). L'écaillage est déterminé selon la quantité de particules qui s'écaille et se détache de la surface exposée et aussi selon la répartition du phénomène. La Figure 3.14 présente le montage type pour effectuer les essais de résistance à l'écaillage. Le mélange de base de mortier est modifié par le remplacement de 20 % du sable par du gravier. Les recettes utilisées sont présentées au Tableau 3.20 (B60-40 et B70-30). En raison du volume de béton requis, le protocole de fabrication présenté à la section 3.7 a été utilisé pour la confection des éprouvettes de cet essai. Les essais ont été réalisés par un laboratoire externe.

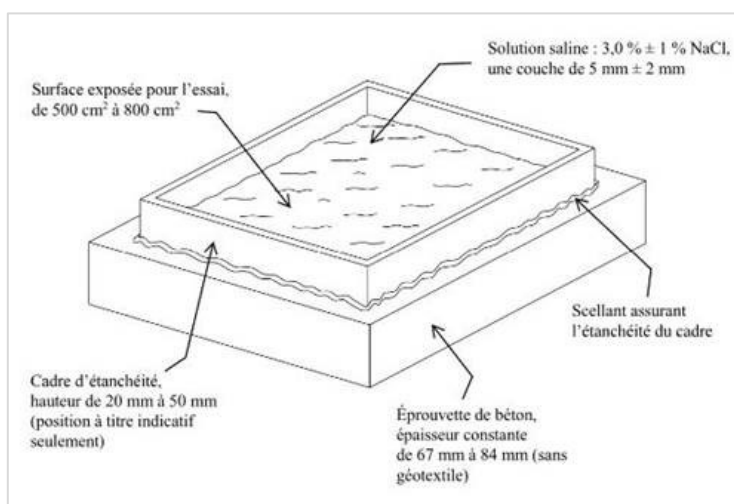


Figure 3.14 : Montage type pour l'essai de résistance à l'écaillage (Tiré de : BNQ 2621-905, article B.4.4 et B.5.1)

3.6.3.2 Essai de lixiviation

Des essais de lixiviation ont été réalisés conformément aux méthodes de référence d'organismes provinciaux, fédéraux et américains, tels que le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME), le Ministère de

l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et l'Environmental Protection Agency (EPA).

Brièvement, la lixiviation est un processus chimique qui consiste à extraire des substances solubles d'un matériau solide en le plaçant dans une solution, où elles se dissolvent sous forme ionique. Afin de réaliser l'essai de lixiviation, un échantillon de matériau est placé dans une solution. Ensuite, la solution est agitée pour assurer un contact étroit entre les deux corps. Pour permettre à la lixiviation de se produire, le mélange repose pendant une certaine période de temps. Par la suite, le solvant est séparé du matériau solide et il est analysé pour déterminer la quantité de substance extraite. Pour ce projet, les essais ont été réalisés par un laboratoire externe.

Selon le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2020), il existe différents types de protocoles de lixiviation. Il y a des essais de lixiviation pour évaluer la mobilité des espèces inorganiques (TCLP, EPA 1311). Afin de déterminer le pH après 18 heures de mélange, le solide est broyé à une grosseur inférieure à 9.5 mm, placé dans la solution de lixiviation et agité pendant 18 heures à la température ambiante selon la méthode Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) de la norme EPA 1311. Le rapport solide : liquide est de 1 : 20 (MA. 100 – Lix.com.1.1, 2012).

Il y a également un essai pour déterminer la concentration des espèces inorganiques susceptibles d'être lixiviées en contact avec l'eau (CTEU-9). Le pH après 7 jours de mélange est déterminé selon la méthode de lixiviation à l'eau (CTEU-9). Dans ce cas, le solide est broyé à une grosseur inférieure à 100 Mesh, placé dans l'eau

et agité 7 jours à température ambiante. Le rapport solide : liquide est de 1 : 4. Cet essai est tiré de la méthode B9 (CTEU-9) Equilibrium Extraction selon l'Investigation of Test Methods for Solidified Waste Evaluation - A Cooperative Program (MA. 100 – Lix.com.1.1, 2012).

3.7 Phase 5 : Fabrication d'un prototype et validation

La cinquième phase du projet consiste à fabriquer un élément de taille réelle, le caractériser et finalement optimiser la méthode de fabrication et le matériau. En collaboration avec les partenaires du projet, la décision a été prise de fabriquer un prototype de banc de parc, tel qu'illustré à la Figure 3.15. Les détails du plan de ce prototype sont présentés à l'annexe F.

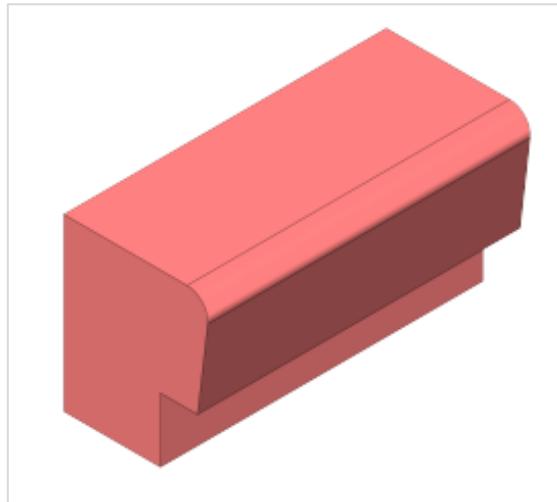


Figure 3.15 : Prototype de banc de parc (Tiré de Vandal. P, 2023)

Pour la fabrication du prototype, la recette de béton géopolymère utilisée est basée sur le mélange de mortier B60-40SP contenant 60 % de résidu de bauxite et 40 % de cendre volante, auquel a été ajouté le superplastifiant E₃. Cependant, dans le

mélange utilisé pour le banc de parc, il y a une réduction de la quantité de sable et une augmentation du gravier par rapport à la recette B60-40. La composition du mélange de béton géopolymère utilisé est présentée au Tableau 3.22.

Tableau 3.22 : Mélange de béton géopolymère (B60-40SP) utilisé pour le banc de parc, en kg pour 1 m³ de béton

SP E ₃	Sable	Gravier	RB	CV	NaOH	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O
23,31	1238,72	1238,72	555,83	311,02	40,02	202,01	46,62

En raison du grand volume de béton requis, la bétonnière électrique présentée à la Figure 3.16 et d'une capacité de malaxage de 280 litres a été utilisée.



Figure 3.16 : Bétonnière électrique Syntesi 350 EL (Tiré de : Imer)

Le protocole de fabrication a également dû être ajusté comme suit en raison du volume malaxé :

1. Préchauffer le coffrage à 60°C à l'aide des couvertures chauffantes ;

2. Nettoyer le coffrage afin d'enlever toute poussière ou corps étranger de ses surfaces internes ;
3. Appliquer une couche d'huile ou d'agent de décoffrage sur les surfaces internes du coffrage ;
4. Mettre en place le géopolymère par levées de 300 mm d'épaisseur, en s'assurant de débiter la mise en place au point le plus éloigné et en progressant vers la source de déversement de la trémie ;
5. Consolider chaque couche par vibration interne à l'aide d'une aiguille vibrante ;
6. Insérer verticalement l'aiguille dans le géopolymère, permettant à celle-ci de descendre naturellement sous l'effet de son propre poids jusqu'à atteindre le fond de la couche mise en place et d'au moins 150 mm de la couche située en dessous ;
7. Maintenir l'aiguille en place de 5 à 15 secondes jusqu'à l'apparition d'un mince film humide autour de l'aiguille ;
8. Répéter le processus de consolidation en respectant une distance d'environ 200 mm entre les sites d'insertion de l'aiguille ;
9. Une fois que toutes les couches ont été disposées et consolidées, araser le géopolymère en utilisant une règle, puis une aiguille vibrante afin de ramener la surface supérieure au niveau du coffrage ;
10. Insérer un thermocouple (toujours dans le tube, capteur dégagé) au centre du banc afin d'évaluer la température au point le plus éloigné des bords du coffrage et de la surface supérieure ;
11. Placer les couvertures préchauffées à 60 °C sur toutes les surfaces du banc ;
12. Mettre en place les senseurs des couvertures aux extrémités A et H ;

13. Continuer la cure jusqu'à ce que le centre du banc ait au moins atteint la température cible de 60 °C pendant 24 heures ;
14. Décoffrer.

Le coffrage placé sous les couvertures chauffantes doit atteindre la température cible de 60 °C au moment de la mise en place du béton. La configuration finale du coffrage utilisé pour la cure du béton géopolymère est illustrée à la Figure 3.17. Lors de la fabrication du banc de parc, des thermocouples ont été installés préalablement à la coulée du béton à l'intérieur du moule, afin de mesurer la température interne, la distribution de la température et le temps de cure requis. Les raisons justifiant le choix de la formule, la section finale du banc de parc ainsi que les résultats obtenus, seront présentées au chapitre 4.



Figure 3.17 : Cure du prototype du banc de parc avec les couvertures chauffantes

4 Présentation des résultats

Les résultats de cette phase sont importants à tenir compte tout au long du projet, car la fabrication du mélange de mortier géopolymère est plus délicate que celle du béton de ciment. Les observations suivantes sont constatées :

- La séquence d'introduction des composants est primordiale afin d'atteindre les standards requis ;
- Le géopolymère nécessite une activation alcaline, ce qui implique que la solution alcaline doit être introduite après le liant pour éviter toute adhérence aux parois, tout en préservant l'efficacité de la réaction ;
- Lorsque l'eau est incorporée après l'ajout de tous les autres matériaux, le mélange obtenu est nettement moins homogène que lorsqu'elle est introduite à des intervalles de temps spécifiques ;

Il est également important de mentionner que la durée de malaxage n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie, bien que cette variable puisse influencer le développement des géopolymères.

4.1 Mortier géopolymère

Cette section présente les résultats de la phase d'optimisation de la recette de base du mortier géopolymère. L'impact des paramètres étudiés a été caractérisé par des essais d'affaissement et de résistance à la compression, réalisés sur les mélanges de mortiers à l'état frais et durci, respectivement. Étant le paramètre principal du projet, la résistance à la compression a été utilisée comme référence pour la sélection des essais.

4.1.1 Proportion de résidu de bauxite : cendre volante

Afin de maximiser la valorisation du résidu de bauxite, différentes proportions de ce résidu ont été utilisées en remplacement de la cendre volante en tant que liant pour la fabrication d'une série de mélanges testée par des essais de compression. Ces mélanges, avec une quantité totale de liant est constante, sont identifiés par la notation RXX-YY, où XX et YY représentent respectivement les proportions du liant constitué de résidu de bauxite et de cendre volante. À titre d'exemple, le liant du mélange R0-100 est exclusivement constitué de cendre volante, alors que 60 % du liant du mélange R60-40 est constitué de résidu de bauxite. Le premier mélange utilisé constitué de 0 % de résidu de bauxite et de 100 % de cendre volante (R0-100) est utilisé comme point de référence pour évaluer l'influence du résidu de bauxite sur le liant géopolymère. Les résultats présentés à la Figure 4.1 ont été obtenus après une cure au four de 24 heures à une température de 60 °C. Pour chaque recette, les valeurs obtenues représentent la moyenne des résultats de trois essais de compression réalisés sur des cylindres.

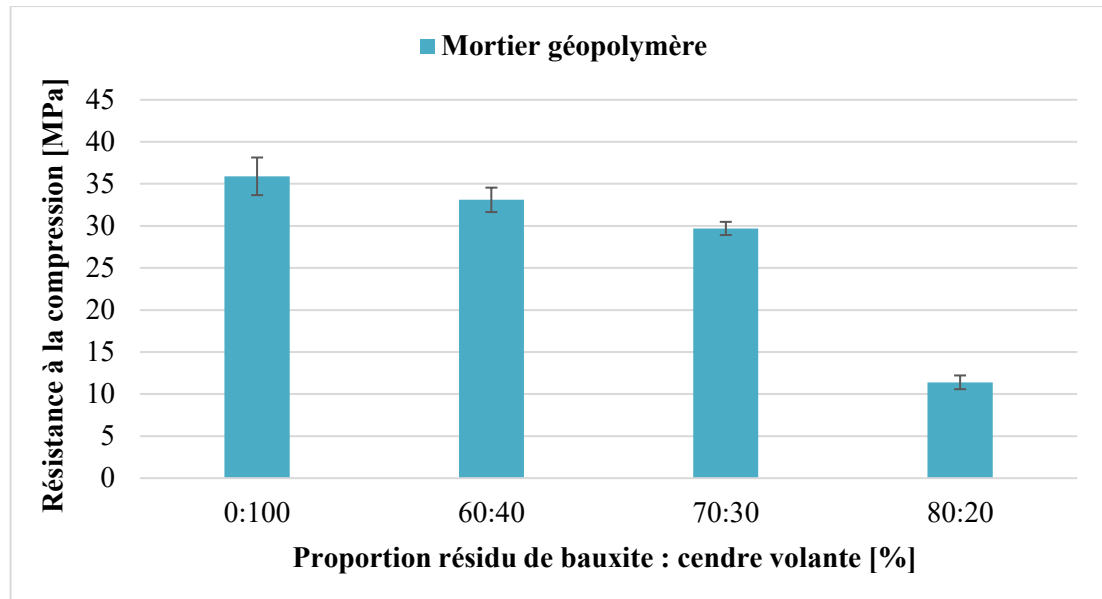


Figure 4.1 : Résistance à la compression du mortier géopolymère en fonction de la proportion de résidu de bauxite dans le liant, après une cure de 24 heures à 60 °C

Il est possible de constater qu'il y a une corrélation directe entre la proportion de résidu de bauxite et la résistance à la compression du mortier. Une augmentation de la quantité de résidu de bauxite dans le mélange entraîne une réduction de la résistance à la compression par rapport au mélange de référence, R0-100. Par exemple, le mélange R80-20 composé de 80 % de résidu de bauxite et 20 % de cendre volante, affiche une résistance de 11,4 MPa, tandis que le mélange R0-100, sans aucune présence de résidu de bauxite et constitué uniquement de cendre volante, atteint une résistance de 35,9 MPa. Cette différence notable de 24,5 MPa peut en partie être expliquée par le rapport eau/liant des mélanges, le degré de géopolymérisation du résidu de bauxite devant faire objet d'études ultérieures. Pour obtenir une maniabilité similaire à celle des autres mélanges, la recette avec 80 % de résidu de bauxite nécessite une quantité d'eau plus importante, ce qui a un impact direct sur le rapport eau/liant et réduit la résistance à la compression des éprouvettes. À la lumière de ces résultats, les deux mélanges

sélectionnés pour les prochaines séries d'essais sont ceux composés de 60 % de résidu de bauxite (R60-40) et de 70 % de résidu de bauxite (R70-30).

4.1.2 Rapport eau / liant

Le rapport eau/liant exerce une grande influence sur les résultats de résistance à la compression. Afin d'évaluer cet effet, le mélange R60-40 a été sélectionné et la quantité d'eau a été ajustée conformément aux proportions de mélanges présentés au Tableau 3.11. Les résultats présentés à la Figure 4.2 ont été obtenus après une cure au four de 24 heures à une température de 60 °C. Pour chaque recette, les valeurs obtenues représentent la moyenne des résultats de trois essais de compression réalisés sur des cylindres.

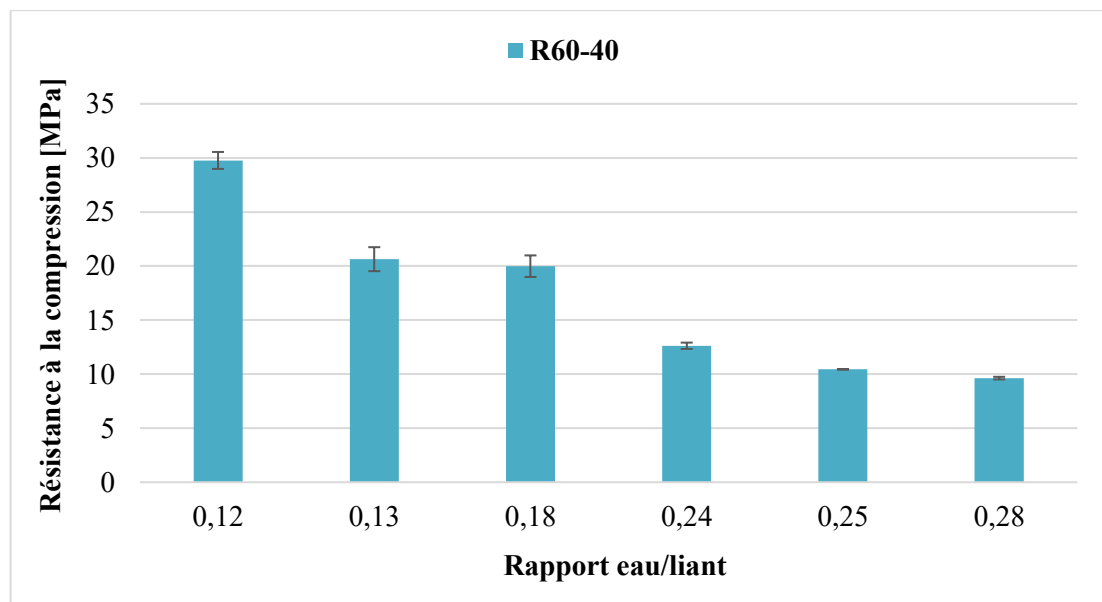
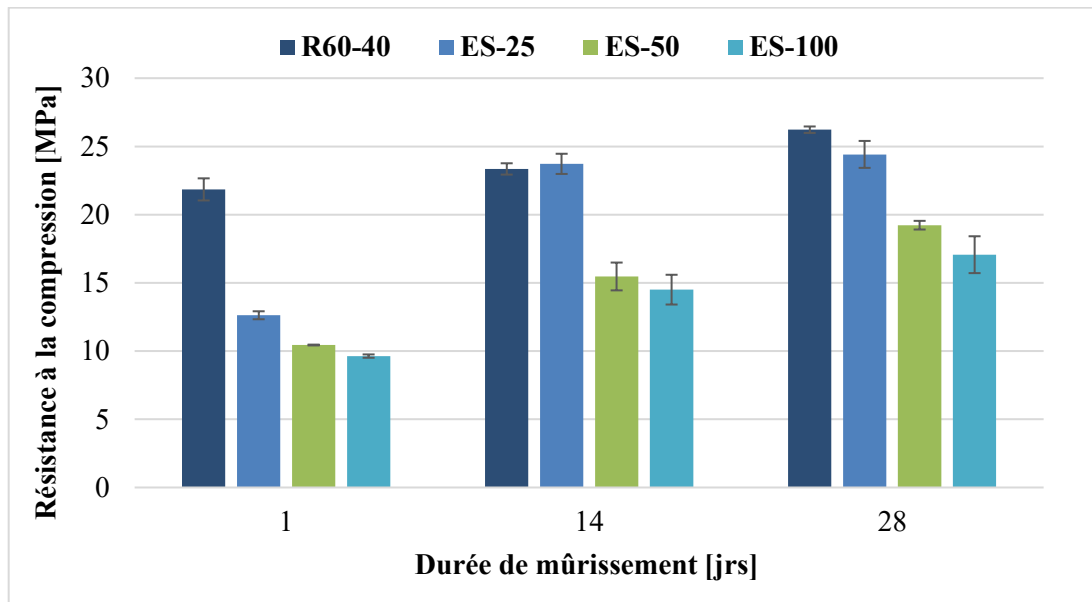


Figure 4.2 : Résistance à la compression du mortier géopolymère en fonction du rapport eau/liant, après une cure de 24 heures à 60 °C

Il est possible de constater que la quantité d'eau ajoutée au mélange exerce un effet négatif sur la résistance à la compression. Par exemple, le mélange avec un rapport eau/liant de 0,28 (ES-100) présente une résistance à la compression relativement faible, mesurée à 9,6 MPa, tandis que le mélange avec un rapport eau/liant de 0,12 (EL12) atteint une valeur de 29,8 MPa, indiquant une différence significative de 20,2 MPa. Ces résultats mettent en évidence le fort impact du rapport eau/liant sur la performance mécanique des mélanges de mortier géopolymère à base de résidu de bauxite. Par conséquent, le choix pour la prochaine série d'essais se porte sur le mélange ayant un rapport eau/liant de 0,12 (EL12).

À ce stade du projet, il est important de noter que l'augmentation du pourcentage de résidu de bauxite nécessite une augmentation concomitante de la quantité d'eau, ce qui entraîne une réduction de la résistance à la compression. Par conséquent, le mélange R70-30, composé de 70 % de résidu de bauxite, a été exclu pour la majorité des essais d'optimisation du matériau. La majeure partie de l'étude est axée sur le mélange R60-40, composé de 60 % de résidu de bauxite. Dans cette série d'essais, des formulations avec un rapport d'eau plus important ont été réalisées (ES-25, ES-50, ES-100). Les résultats présentés à la Figure 4.3 ont été obtenus avec le mélange R60-40 après une cure au four de 24 heures, à deux températures différentes, soit 60 °C et 80 °C. Pour chaque recette, les valeurs obtenues représentent la moyenne des résultats de trois essais de compression réalisés sur des cylindres.

a) Température : 60 °C



b) Température : 80 °C

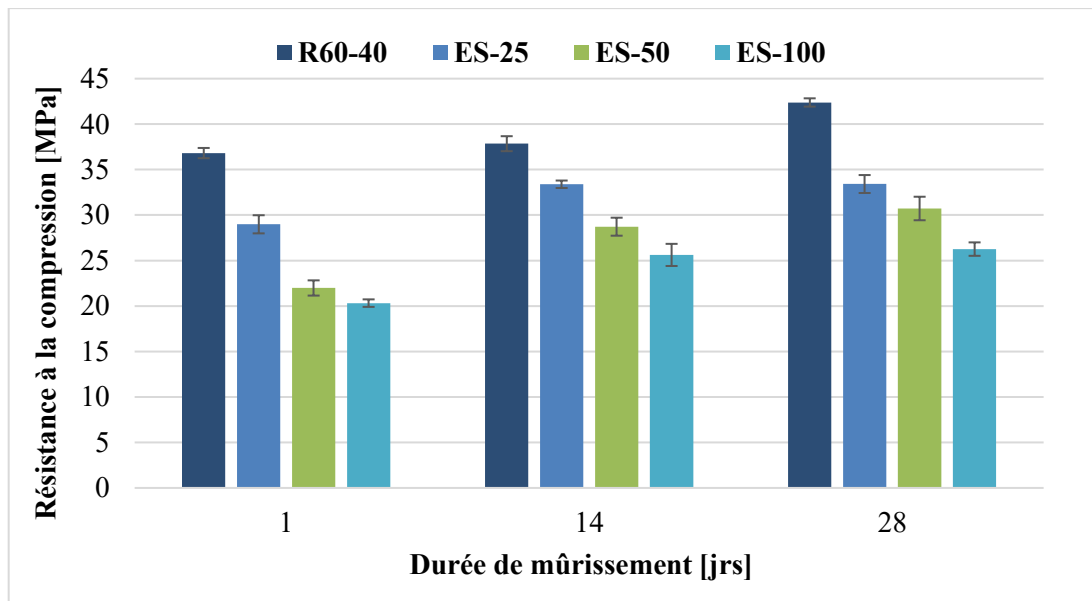


Figure 4.3 : Résistance à la compression en fonction de la durée de mûrissement des mélanges de mortier géopolymère (R60-40, ES-25, ES-50 et ES-100), après 24 heures de cure au four (a) à 60°C (b) à 80 °C

Il est observable que la quantité d'eau ajoutée a un effet important sur la résistance à la compression. À des températures de 60 °C ou 80 °C, le mortier présentant une teneur en eau supérieure à celle de la recette de base démontre une performance moindre en termes de compression. En analysant l'évolution temporelle des différents mélanges, aucune distinction significative n'est à noter. En comparant les résultats des mélanges incluant un ajout d'eau supplémentaire (ES-25, ES-50 et ES-100) à ceux du mélange sans ajout d'eau (R60-40), il est possible de remarquer que pour tous les mélanges présentés à la Figure 4.3, il y a un gain de résistance à chaque étape de maturation.

4.1.3 Superplastifiants

Deux séries d'essais ont permis de déterminer l'effet de l'ajout de superplastifiants sur la résistance mécanique et la maniabilité des mélanges de mortier géopolymère. La première série d'essais visait à tester les dosages minimums et maximums recommandés pour différents superplastifiants, en les testant avec la recette de mortier R60-40 adaptée (voir Tableau 3.13). La Figure 4.4 illustre la maniabilité des mélanges de mortier géopolymère mesurée par l'essai d'affaissement, pour chaque type de superplastifiant ajouté en quantité maximale recommandée. Il est possible de constater que malgré l'ajout de la quantité maximale de superplastifiant, conformément aux recommandations des fabricants pour le béton de ciment Portland, la cohésion des mélanges frais demeure généralement suffisamment importante pour limiter l'affaissement.

a) V_{6max}



b) V_{2max}



c) E_{3max}



d) N_{3max}



Figure 4.4 : Allure des affaissements des mélanges de mortier géopolymère composés de superplastifiants (a) V_{6max} (b) V_{2max} (c) E_{3max} (d) N_{3max}

La Figure 4.5 présente les résultats d'affaissement des mélanges de mortier géopolymère, intégrant les différents superplastifiants. De plus, la ligne sur le graphique de la Figure 4.5 indique l'affaissement (20 mm) du mortier de base R60-40 sans ajout de superplastifiant.

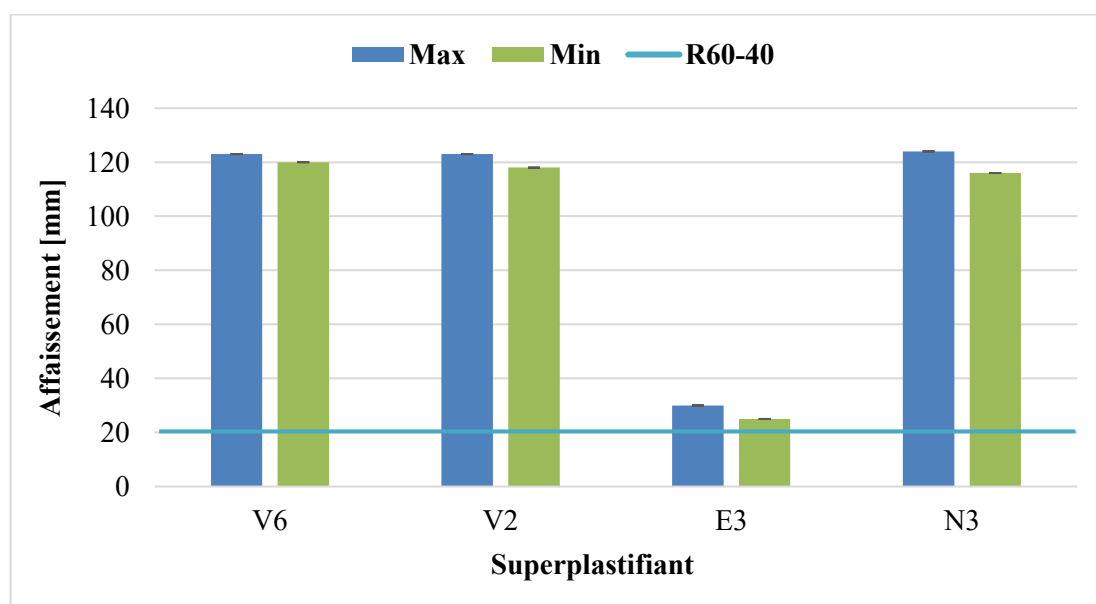


Figure 4.5 : Résultats d'affaissement des mélanges de mortier géopolymère en fonction du type de superplastifiant

La Figure 4.6 présente la résistance à la compression mesurée après une cure de 24 heures à une température de 60 °C pour les dosages minimums et maximums des superplastifiants soumis à l'étude. Pour chaque recette, les valeurs obtenues représentent la moyenne des résultats de trois essais de compression réalisés sur des cylindres. De plus, la ligne sur le graphique de la Figure 4.6 indique la résistance à la compression ($f'_c = 26,3$ MPa) du mortier de base R60-40, sans aucun ajout de superplastifiant, soumis aux mêmes conditions de cure (24 heures à une température de 60 °C) que les mélanges contenant du superplastifiant.

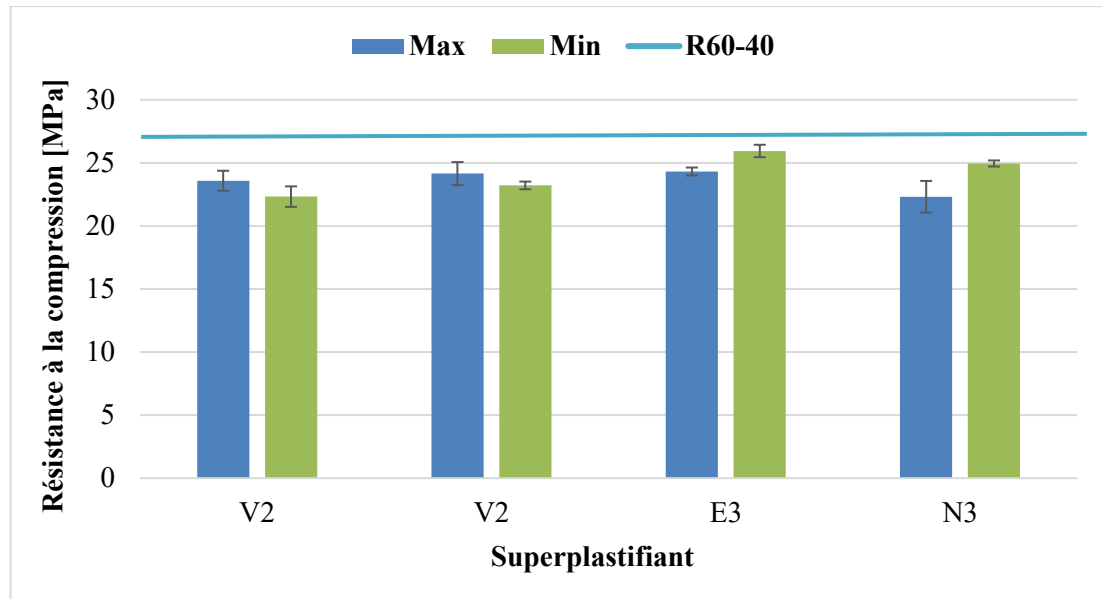


Figure 4.6 : Résistance à la compression des mélanges de géopolymère en fonction des quantités minimales et maximales de chaque type de superplastifiant, après 24 heures de cure au four à 60°C

Il est possible de constater que le superplastifiant n'exerce pas une influence marginale sur la résistance à la compression. Que ce soit le type de superplastifiant ou la quantité ajoutée, les valeurs de résistance à la compression se situent toutes entre 22,3 MPa et 25,9 MPa. Concernant les superplastifiants à base de polymère polycarboxylate (V_6 et V_2), leur résistance la compression diminue en moyenne de 1,0 MPa lorsque la quantité de superplastifiant ajoutée est minimale. Pour les superplastifiants à base de naphtalène (E_3 et N_3), une différence de résistance à la compression est également constatée, mais cette fois-ci, la résistance diminue en moyenne de 2,0 MPa lorsque la quantité de superplastifiant ajoutée est maximale. Cet écart est faible et peut rentrer dans la variabilité typique pour un mélange de mortier.

Puisque les différents superplastifiants testés n'ont pas donné des résultats optimaux en suivant les quantités recommandées par le fabricant, l'option d'augmenter

la quantité de superplastifiant E_3 a été mise de l'avant. Pour ce faire, trois dosages de ce superplastifiant dépassant les recommandations du fabricant pour un béton de ciment Portland ont été testés sur le mélange de mortier géopolymère R60-40 adapté (voir Tableau 3.13) dans le cadre d'une deuxième série d'essais. La méthode employée pour la préparation des mélanges contenant du superplastifiant E_3 diffère légèrement de celle utilisée pour les recettes avec du superplastifiant. Trois proportions du superplastifiant E_3 équivalentes à 25 %, 50 % et 100 % (E_{3-25} , E_{3-50} , E_{3-100}) de la quantité d'eau initialement présente dans le mélange, ont été expérimentées. La Figure 4.7 illustre la maniabilité des mélanges de cette seconde série d'essais, mesurée à la suite des essais d'affaissement. La Figure 4.8 présente les résultats d'affaissement des mélanges de mortier géopolymère, intégrant le superplastifiant (E_{3-25} , E_{3-50} , E_{3-100}) de cette seconde série d'essais. Il est possible de constater que ces mélanges présentent une fluidité supérieure que ceux comportant une quantité moins importante de superplastifiant.

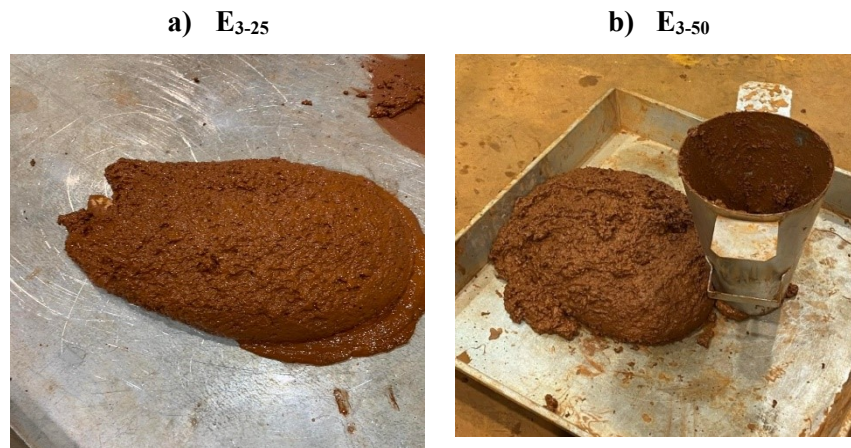


Figure 4.7 : Allure des affaissements des mélanges de mortier géopolymère composés du superplastifiant E_3 (a) E_{3-25} (b) E_{3-50}

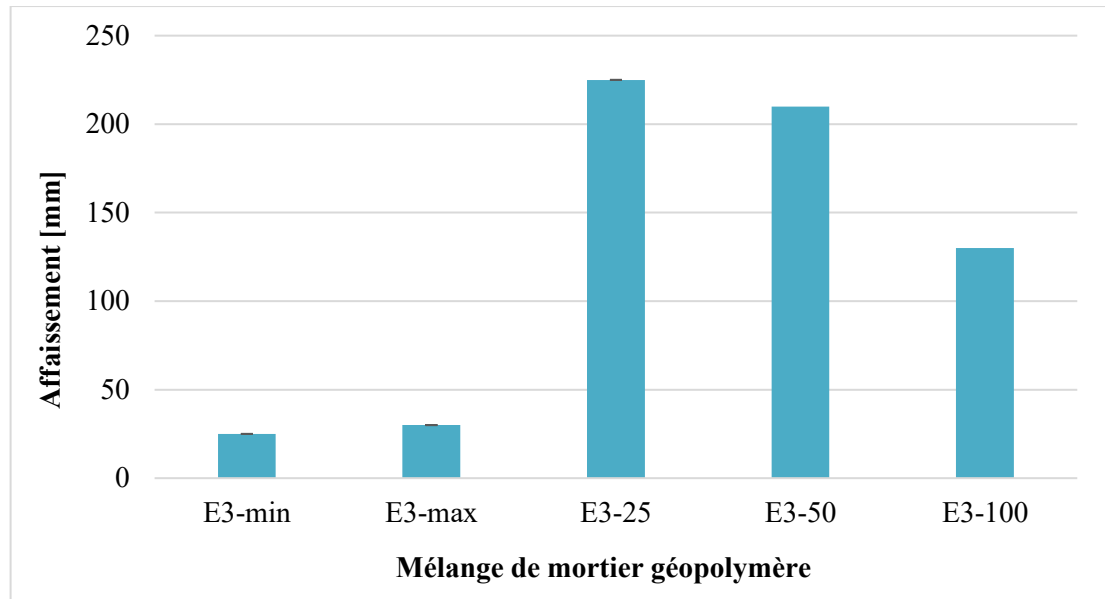


Figure 4.8 : Résultats d'affaissement des mélanges de mortier géopolymère avec le superplastifiant E₃ en fonction de la quantité de superplastifiant, après 24 heures de cure au four à 60°C

Pour les mélanges testés de cette seconde série d'essais, la résistance à la compression du mortier a été mesurée. Les résultats présentés à la Figure 4.9 ont été obtenus après une cure de 24 heures à une température de 60 °C. Les résistances à la compression du mortier ont été mesurées à 24 heures, 7, 28 et 56 jours. L'entreposage a été effectué à température ambiante et dans des conditions d'humidité normale. Pour chaque recette, les valeurs obtenues représentent la moyenne des résultats de trois essais de compression réalisés sur des cylindres. À titre comparatif, la résistance à la compression mesurée à 24 heures pour les dosages maximums et minimums du superplastifiant E₃ testés dans la première série d'essais était d'environ 25 MPa. À des fins de comparaison, les valeurs de résistance à la compression du mélange de mortier géopolymère R60-40 sont également présentées sur la Figure 4.9.

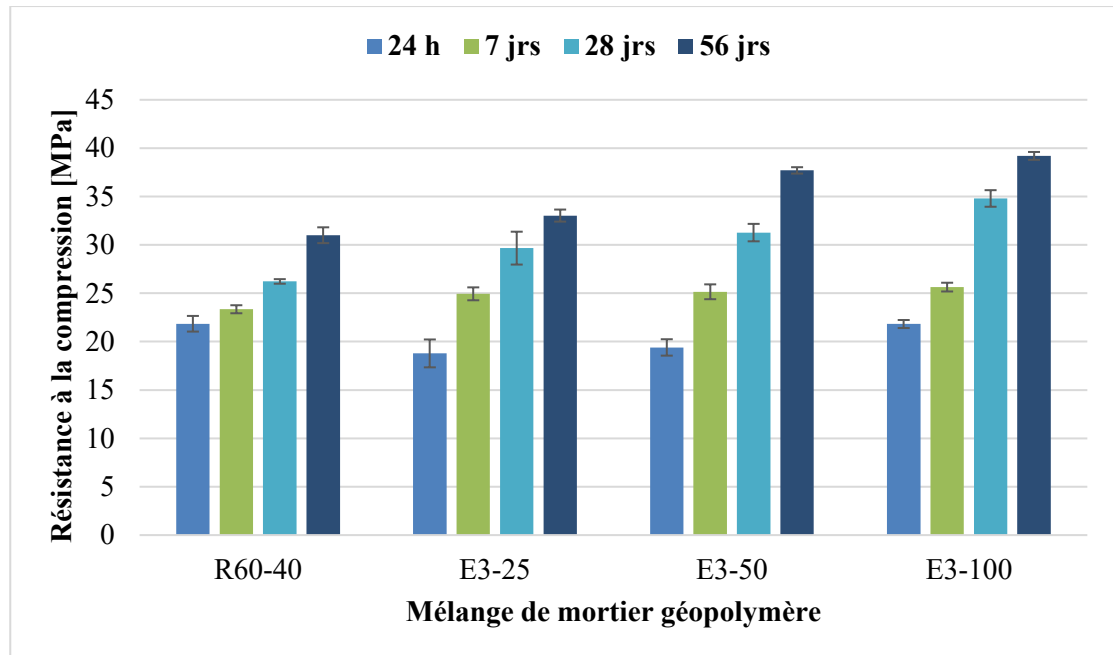


Figure 4.9 : Résistance à la compression en fonction de la durée de mûrissement des mélanges de mortier géopolymère avec du superplastifiant E₃, après 24 heures de cure au four à 60°C

Pour cette batterie d'essais, une plus grande quantité d'éprouvettes a été confectionnée dans le but de vérifier l'effet du superplastifiant E₃ sur l'évolution de la résistance à la compression dans le temps. Les résultats présentés à la Figure 4.9 mettent en évidence que la quantité de superplastifiant a une légère incidence sur la résistance à la compression du mortier. Une augmentation du pourcentage du superplastifiant augmente légèrement la résistance à la compression mesurée à une même durée de maturation. Cette différence semble être plus marquée lorsque le mortier atteint une plus grande maturité. En effet, à 28 jours et à 56 jours, il y a une hausse d'environ 15 % entre les résistances à la compression des mélanges E₃₋₂₅ et E₃₋₁₀₀.

En moyenne, il y a un gain de résistance important d'environ 50 %, entre les données de résistance à la compression mesurées à 24 heures et celles à 56 jours. Les éprouvettes continuent de gagner considérablement en résistance au fil des jours. De façon générale lorsqu'une maniabilité et un affaissement important sont requis, le mélange contenant 50 % de superplastifiant E₃ présente un bon potentiel d'utilisation.

4.1.4 Durée et méthode de cure

Comme mentionné à la section 3.4.4, deux méthodes de cure différentes sont présentées au Tableau 4.1. Elles ont été évaluées au moyen d'essais de compression effectués sur le mélange R60-40. La première méthode consiste à placer les éprouvettes de mortier géopolymère directement dans un four après la coulée, les soumettant ainsi à une cure à température élevée de 60 °C (mélanges P1, P3, P5 et P7). La seconde méthode prévoit une cure initiale (précure) à température ambiante avant de transférer les échantillons dans le four à haute température (60 °C). Les résistances à la compression des mélanges mesurées à la suite des différentes cures sont présentées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1: Résistance à la compression des mélanges de mortier géopolymère (R60-40) en fonction de la durée et du type de cure, à 60 °C

Mélange	Durée de cure initiale à température ambiante ~20 °C [jrs]	Durée de cure à température élevée ~60°C [jrs]	Résistance à la compression [MPa]	Écart-type [MPa]
P1	-	1	22,4	0,2
P2	2	-	NA	NA
P3	2	1	27,3	0,8
P4	3	-	NA	NA
P5	3	1	30,2	0,6
P6	7	-	5,5	0,1
P7	7	1	31,4	0,4

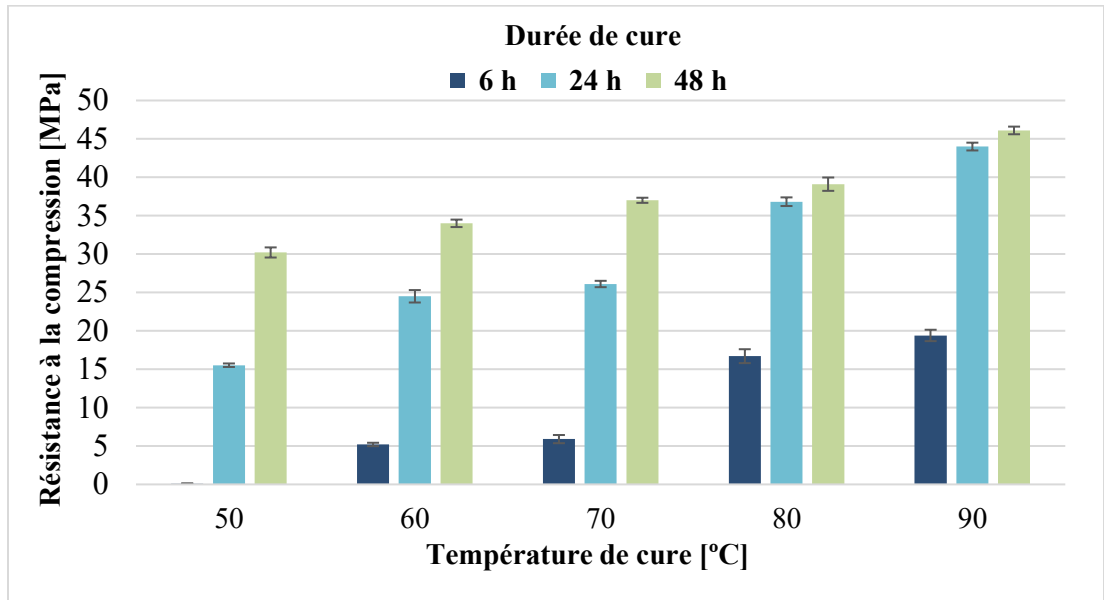
Il est possible de constater que les éprouvettes soumises à une cure unique à température ambiante n'offrent qu'une résistance très limitée. En effet, la cellule de charge s'est avérée incapable de mesurer la résistance des éprouvettes subissant les cures uniquement à température ambiante (P2 et P4), alors que la résistance à la compression mesurée pour les éprouvettes subissant la cure P6 s'est révélée très faible ($f'_c = 5,5$ MPa). En revanche, toutes les éprouvettes ayant subi une cure à température élevée ont affiché une résistance à la compression acceptable.

Bien que ces résultats montrent qu'une cure prolongée à température ambiante permette le durcissement du géopolymère, une cure à température élevée demeure nécessaire afin de développer une résistance mécanique acceptable dans un délai raisonnable. Cependant, la cure à température ambiante pourrait être un avantage pour économiser de l'énergie. Les résultats obtenus confirment la nécessité de chauffer les cylindres. À cette étape du projet, les résultats démontrent que plus la cure est de longue durée, plus la résistance à la compression est élevée.

4.1.5 Cure au four à température constante

À la suite de la dernière série d'essais (durée et méthode de cure), dans laquelle les cylindres sont placés à différentes températures de cure, la variation des valeurs de résistance à la compression s'est fait remarquer. Afin d'améliorer la résistance mécanique, différentes températures et durées de cure au four ont été testées sur les mélanges de mortier géopolymère R60-40 et R70-30. Le but de ces essais est de faire le pont entre la durée de cure et la température de cure. Les résultats présentés à la Figure 4.10 ont été obtenus pour des cures réalisées à des températures constantes de 50 à 90 °C, et des durées entre 6 et 48 heures. L'objectif de cette série d'essais est de comparer les résultats du mélange contenant 60 % de résidu de bauxite et celui contenant 70 %, tout en observant l'influence du temps et de la température sur les éprouvettes. Les résistances à la compression des mélanges présentées sont mesurées immédiatement après la cure. Pour chaque cure étudiée, les valeurs obtenues représentent la moyenne de 3 cylindres testés.

a) Mélange R60-40



b) Mélange R70-30

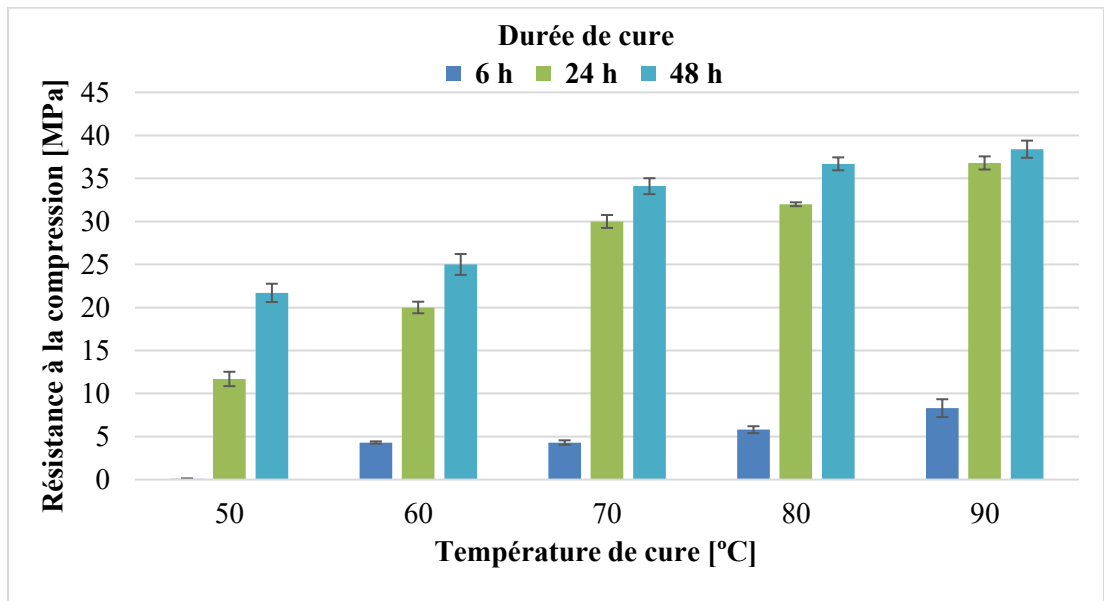


Figure 4.10 : Résistance à la compression des mélanges de mortier géopolymère (a) R60-40 et (b) R70-30 déterminée après une cure à température élevée constante (50 à 90°C) d'une durée 6 h, 24 h et 48 h

Il est possible de constater que de façon générale, pour toutes les durées et les températures de cure testées, les mélanges R60-40 affichent des résistances à la compression supérieures à celles des mélanges R70-30. En ce qui concerne les conditions de cure, l'augmentation de la durée et de la température de cure se traduit par une augmentation de la résistance à la compression du mélange de mortier géopolymère. À des températures de 60 °C et 70 °C, après 6 heures de cure, la réponse en compression des éprouvettes est d'environ 5,0 MPa pour les deux mélanges. Ce résultat suggère que la réaction de géopolymérisation est encore peu avancée et qu'une cure plus longue est nécessaire. Prolonger la cure à une durée de 24 heures permet d'augmenter significativement la résistance à la compression de tous les mélanges. De plus, le gain de résistance entre 6 heures et 24 heures de cure apparaît plus important pour les cures à température plus élevée (un gain d'environ 25 MPa à 90 °C pour R70-30 et R60-40, respectivement) que pour les cures à température plus basses (un gain d'environ 15 à 20 MPa à 60 °C pour R70-30 et R60-40, respectivement). Par exemple, lorsque le mélange R60-40, passe d'une température de cure de 60 °C à 90 °C pendant 24 heures, la résistance en compression augmente de 19,5 MPa. Quant au mélange R70-30, la différence est d'environ 16,8 MPa pour ces deux mêmes températures. En conséquence, l'augmentation de la température de cure permet donc d'accroître la résistance de tous les mélanges.

Une prolongation supplémentaire de la cure à 48 heures permet d'augmenter la résistance à la compression des mélanges, bien que cette augmentation soit relativement marginale par rapport aux niveaux de résistance à la compression atteints (un gain de 2 à 10 MPa selon les mélanges et les températures). De surcroît, les résultats

révèlent que le gain de résistance entre 24 heures et 48 heures de cure est moindre lorsque la température de cure est plus élevée. Ainsi, il apparaît que maximiser les conditions de cure au cours des 24 premières heures de cure favorise le développement d'une résistance mécanique adéquate. Pour tous les mélanges testés, une cure de 24 heures (70 °C à 80 °C) semble offrir le meilleur potentiel d'utilisation, atteignant un niveau de résistance à la compression similaire à celui requis pour le béton de ciment Portland utilisé dans la construction. Les résultats à 80 °C semblent intéressants, puisque le niveau de résistance à la compression atteint celui du béton de ciment après seulement 24 heures de cure.

Pour confirmer la stabilité ou l'éventuelle augmentation des résistances à la compression mesurées après une cure à température élevée et constante, comme présentées à la Figure 4.10, certaines éprouvettes du mélange de mortier géopolymère ont été entreposées à condition ambiante (température ~ 20 °C) et testées après 28 jours. La Figure 4.11 compare les résistances mesurées à 28 jours comparativement à celles mesurées immédiatement à la sortie du four, pour différentes conditions de cure.

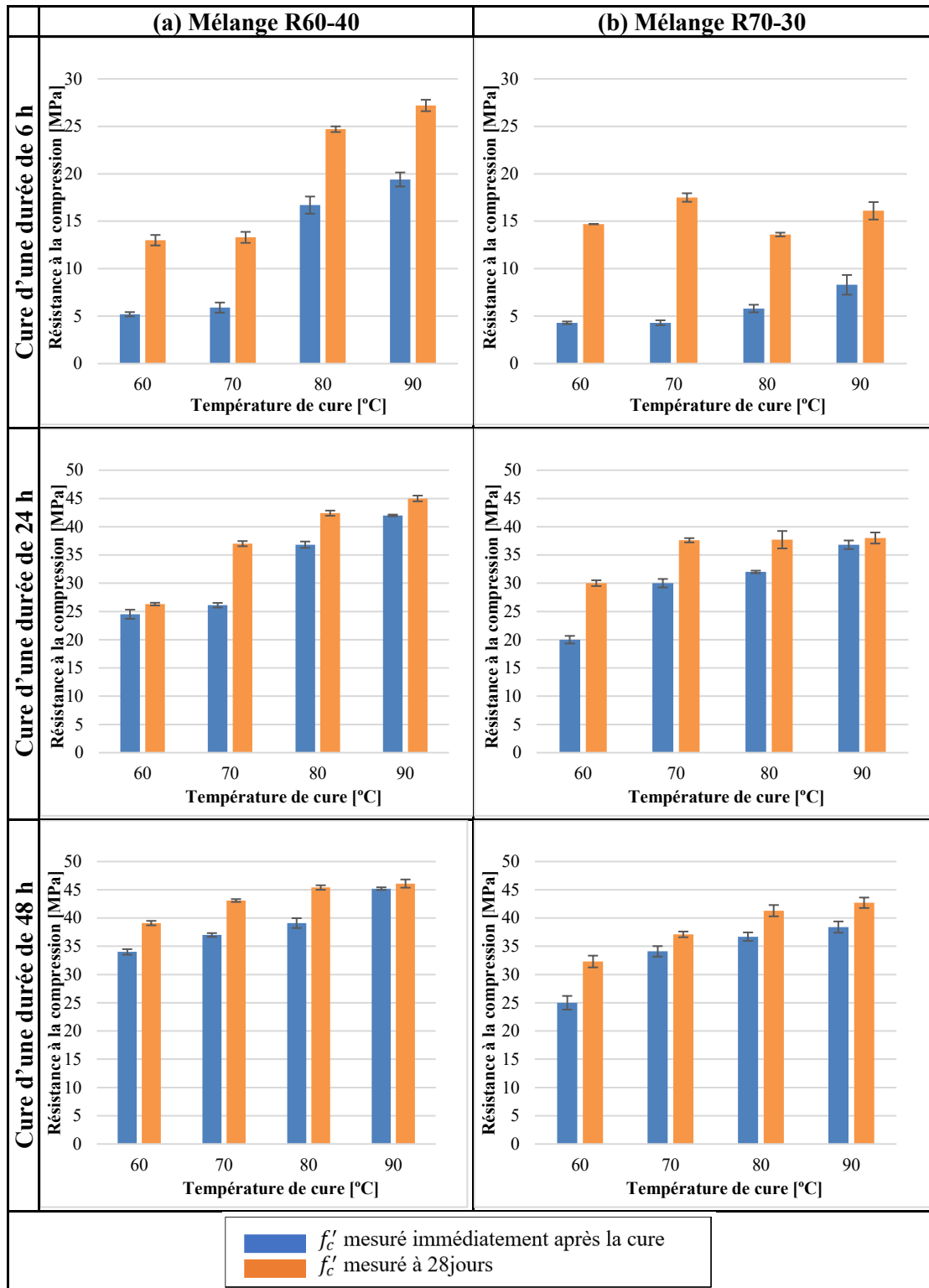


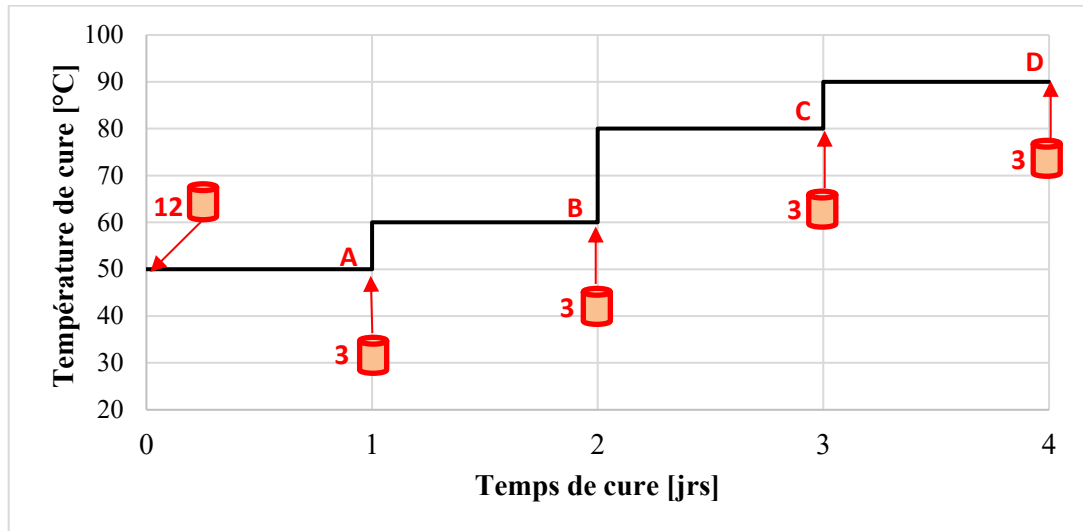
Figure 4.11 : Résistance à la compression des mélanges de mortier (a) R60-40 et (b) R70-30 en fonction de la durée de maturation à certaines conditions de cure (60 à 90°C et une durée de 6 h, 24 h et 48 h)

Il est possible de constater que la résistance à la compression mesurée des mélanges de mortier géopolymère augmente après la cure à haute température lorsque les éprouvettes sont entreposées à condition ambiante. Ceci suggère que la réaction de géopolymérisation se poursuit après la cure à haute température sous condition ambiante, mais à une vitesse réactionnelle plus lente.

4.1.6 Cure au four à température croissante

En constatant l'effet de la température et de la durée de cure sur la résistance à la compression lors des essais précédents (section 4.1.5), il a été suggéré de réaliser une cure par paliers de température, comme mentionnée à la section 3.4.6. Comme la réaction ne se produit pas à la même vitesse en fonction des valeurs des facteurs sélectionnés, la prochaine série d'essais vise à obtenir des résistances à la compression satisfaisantes tout en diminuant l'énergie utilisée. Afin d'évaluer ce type de cure à température croissante, un total de 24 cylindres ont été confectionnés et placés au four. Pour chaque palier de cure, six cylindres ont été retirés du four. Trois d'entre eux ont été testés à la sortie du four alors que les trois autres ont été conservés sous condition ambiante et testés après 28 jours. La Figure 4.12 a) présente la séquence de cure pour chaque groupe d'éprouvettes testées. L'axe horizontal du graphique indique le nombre de jours de cure. La température augmente de 10 degrés lors du deuxième palier de cure, de 20 degrés lors du troisième et finalement pour compléter la dernière journée de cure, la température est portée à 90 °C. La Figure 4.12 b) présente la résistance à la compression pour chaque groupe d'éprouvettes. Ce graphique combine les résultats de résistance à la compression à la fin de la cure (1 à 4 jours) et après 28 jours.

a) Séquence de cure pour chaque groupe d'éprouvettes



b) Résistance à la compression à la fin de la cure (1 à 4 jours) et 28 jours après

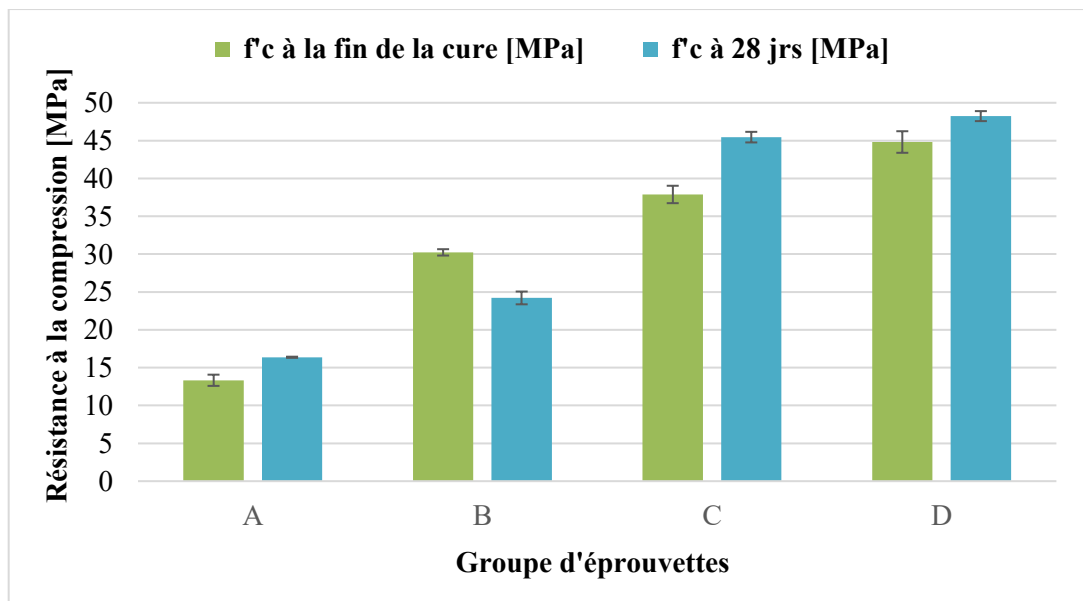


Figure 4.12 : (a) Séquence de cure pour chaque groupe d'éprouvettes (b) Résistance à la compression (f'_c) du mélange de mortier géopolymère R60-40 en fonction de chaque groupe d'éprouvettes, à la fin de la cure (1 à 4 jours) et 28 jours après

Des résultats issus de la Figure 4.12 b), il est possible de constater que la résistance à la compression augmente généralement à chaque palier de cure, avec une différence de 21,5 MPa, entre le palier initial à 50 °C et le palier final à 90 °C. De plus, après 3 jours de cure à une température croissante (de 50 °C à 80 °C), la résistance à la compression s'élève à 45,4 MPa à 28 jours, tandis qu'après une cure de 48 heures à 80 °C, la résistance à la compression est de 45,4 MPa, à 28 jours (Figure 4.11). En comparant l'écart de résistance à la compression entre un cylindre qui a été placé à une cure croissante (Figure 4.12) et un autre soumis à une cure constante (Figure 4.11), la réaction se produit à une plus grande vitesse à haute température, car l'écart entre les deux valeurs est nul. Cela signifie qu'à température constante, il suffit de 2 jours de cure pour atteindre la résistance à la compression obtenue en 3 jours de cure à température croissante.

4.2 Béton géopolymère

Le processus de fabrication pour les éléments en béton géopolymère diffère de celui du mortier géopolymère, par l'ajout de gravier. Dans cette démarche, le mélange de mortier R60-40 testé à une température de 60 °C pendant 24 heures a été utilisé pour fabriquer un béton en ajoutant du gravier, tel que présenté à la section 3.5. En s'appuyant sur les résultats obtenus dans la phase d'optimisation du mortier, les résultats de la résistance à la compression du béton géopolymère attendus devaient être supérieurs, avec l'ajout de gravier au mélange. La Figure 4.13 présente les valeurs de la résistance à la compression mesurées des mélanges de béton géopolymère, pour les différents teneurs de sable et de gravier (moyenne de 3 cylindres), testés après une cure au four de 24 heures à une température de 60 °C. À des fins de comparaison, la

valeur de résistance à la compression du mélange de mortier géopolymère R60-40 (100 % de sable et 0 % de gravier) est également présentée à la Figure 4.13. Les mélanges testés (Tableau 3.18) sont identifiés par SGX:Y, où X et Y font référence aux pourcentages de sable et de gravier respectivement.

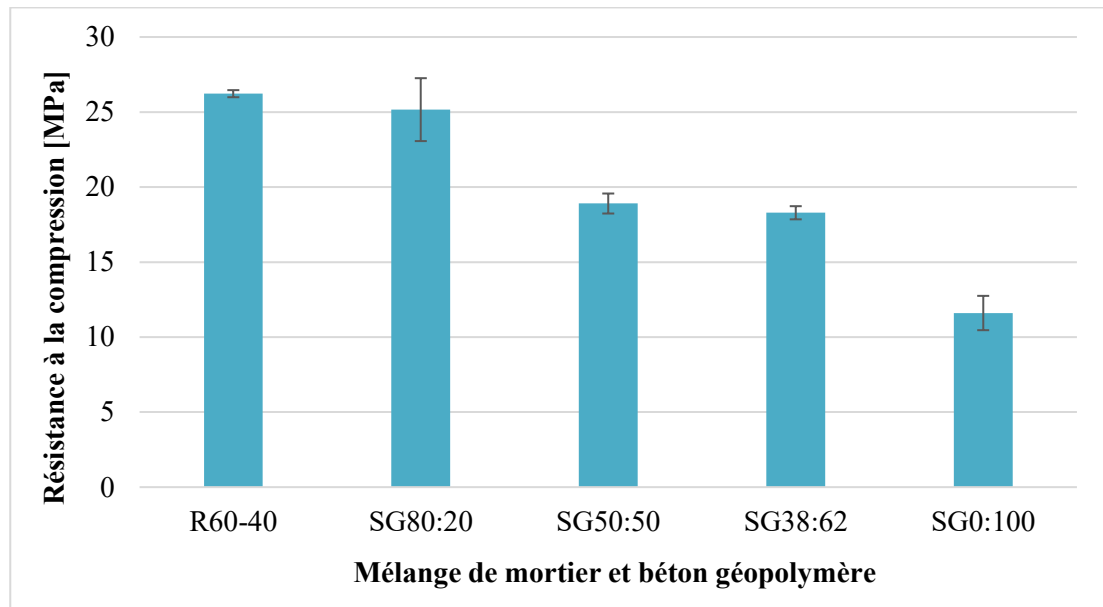


Figure 4.13 : Résistance à la compression des mélanges de mortier/béton géopolymère en fonction de la quantité de gravier dans le mélange, après 24 heures de cure au four à 60°C

Il est possible de constater que la proportion de sable et de gravier a une influence sur la résistance à la compression du béton géopolymère. D'après la référence *Dosage et contrôle des mélanges de béton de l'Association canadienne du ciment, 8e Édition*, la proportion optimale de gros et petits granulats calculée en combinant les deux granulométries correspond au mélange SG38-62 (38 % de sable et 62 % de gravier). Les valeurs de résistance obtenues avec ce mélange se situent en dessous des valeurs de résistance à la compression attendues. En comparant la résistance à la

compression du mélange R60-40 (sans gravier), mesurée à 26,2 MPa, à celle du mélange SG80:20 (80 % de sable et 20 % de gravier), mesurée à 25,2 MPa, il est possible de constater que l'incorporation de gravier n'a pas un impact significatif sur la résistance à la compression du béton géopolymère.

À la lumière des résultats obtenus au cours des phases antérieures et afin de mieux connaître les propriétés du béton géopolymère, une série d'essais de caractérisation détaillée a été réalisée. Le choix des mélanges pour cette série d'essais est basé majoritairement sur les valeurs de résistances à la compression obtenues parmi les différentes recettes et elles ont été choisies dans un contexte de collaboration avec les partenaires industriels du projet. Les mélanges testés sont fondés sur les bétons B60-40, B70-30 et B60-40SP (Tableau 3.20). Le détail des essais réalisés et des mélanges testés est présenté à la section 3.6. Chaque mélange est soumis à une cure au four de 24 heures et à une température constante de 80 °C. Certaines des éprouvettes d'essai ont été testées immédiatement après la cure, alors que d'autres ont été entreposées à condition ambiante et testées ultérieurement.

4.2.1 Propriétés physiques

Les deux mélanges de béton géopolymère testés, basés sur les formulations B60-40 et B70-30 respectivement, ont présenté des teneurs en air entre 2 % et 5 %. Les masses volumiques à l'état frais et à l'état durci variaient quant à elles entre 2100 kg/m³ et 2300 kg/m³.

4.2.1.1 Résistance à la pénétration et temps de prise

La résistance à la pénétration sur le béton frais a été mesurée et le temps de prise a été calculé sur le mélange de béton géopolymère (B60-40) et le mélange analogue contenant du superplastifiant E₃ (B60-40SP). Pour chaque mélange, trois éprouvettes ont été fabriquées et soumises à des températures différentes. L'une d'entre elles est placée à 20 °C pour simuler des conditions de température ambiante. Les deux autres sont mises au four à des températures de 40 °C et 60 °C afin de simuler des conditions de coulée plus chaudes. Les résistances de pénétration du béton géopolymère en fonction du temps sont présentées à la Figure 4.14 pour chacune des éprouvettes testées. Notez que les résultats sont présentés en unité impériale en raison de l'étalonnage de l'appareil utilisé, conformément à la norme ASTM C403 (ASTM International, 2016) qui définit la prise initiale et la prise finale à une résistance à la pénétration de 500 psi et 4000 psi, respectivement. À partir des résultats présentés à la Figure 4.14, les temps de la prise initiale et finale ont été calculés et présentés à la Figure 4.15.

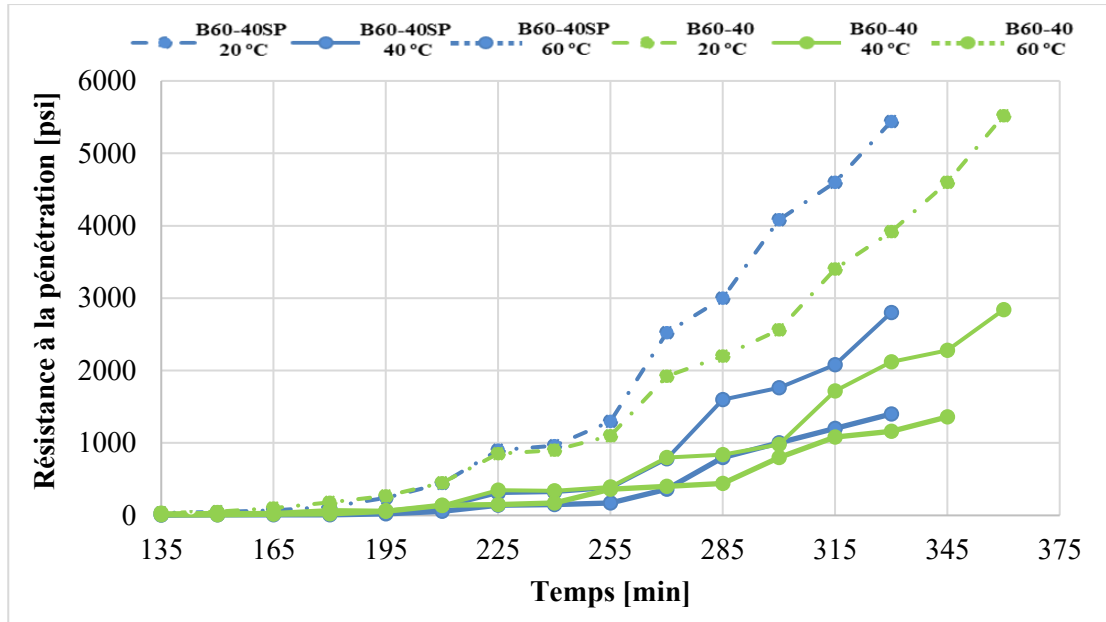


Figure 4.14 : Résistance à la pénétration des mélanges de béton géopolymère (B60-40SP et B60-40) en fonction du temps, pour différentes températures de béton géopolymère frais

Les Figure 4.14 et Figure 4.15 illustrent l'impact de la température sur la résistance à la pénétration et le temps de prise du béton géopolymère. Pour les deux mélanges testés, la résistance à la pénétration augmente plus rapidement lorsque la température du béton géopolymère frais augmente. À 20 °C, les temps de prise finale pour les bétons géopolymère sans et avec superplastifiant, B60-40 et B60-40SP, sont respectivement de 380 et 413 minutes, tandis qu'à 60 °C, les temps de prise initiale diminuent à 300 et 328 minutes pour ces mêmes mélanges. Ainsi, la résistance à la pénétration se développe plus rapidement et le temps de prise diminue lorsque la température du béton géopolymère frais augmente. Ce résultat est cohérent avec l'augmentation de la résistance à la compression constatée du mortier et du béton géopolymère durci lorsque la température de cure augmente (section 4.1.5). En comparant l'évolution de la résistance à la pénétration des deux mélanges testés, il

apparaît également que le remplacement d'une portion de l'eau par le superplastifiant (mélange B60-40SP) retarde le développement des résistances à la pénétration et retarde le temps de prise. Ce rendement supérieur indique que le superplastifiant E₃ agit non seulement comme un retardateur de la prise, mais rend également le mélange plus maniable. De façon générale, le temps de prise des mélanges B60-40SP est retardé d'approximativement 30 minutes, quelle que soit la température.

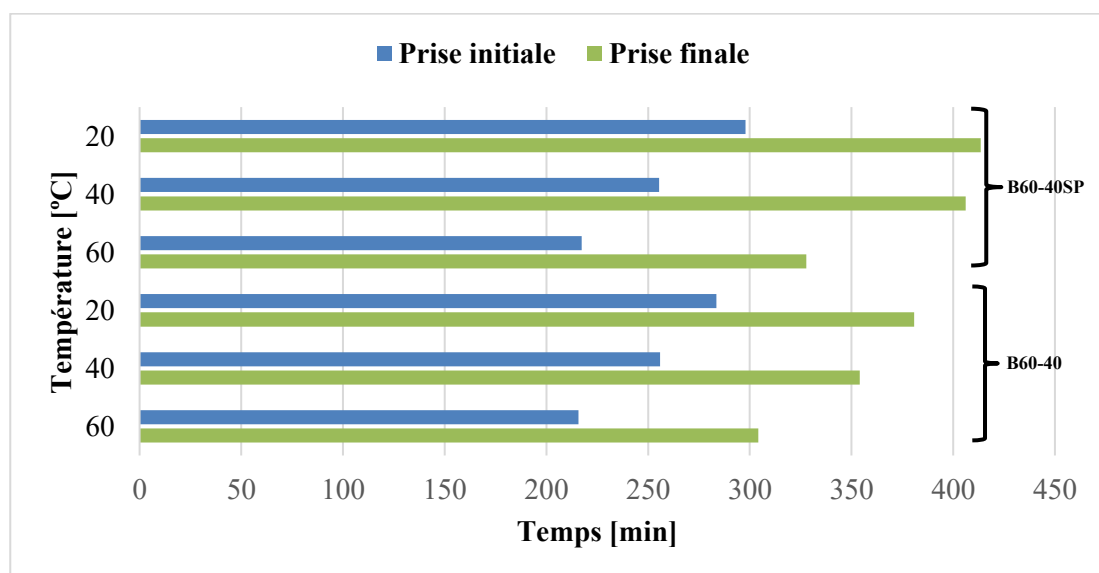


Figure 4.15 : Temps de prise des mélanges de béton géopolymère (B60-40SP et B60-40) en fonction de la température

Pour continuer, la Figure 4.15 présente les deux mélanges placés aux trois températures différentes. Il est possible de remarquer que la prise initiale arrive plus tôt pour un béton géopolymère chauffé à une plus grande température. En augmentant le paramètre de température, les temps de prise diminuent de 20 %. En moyenne (à 20, 40 et 60 °C), les temps de prise du béton géopolymère avec du superplastifiant E₃ (B60-40SP) sont retardés de 9 % comparativement à ceux du béton sans superplastifiant (R60-40).

4.2.2 Propriétés mécaniques

4.2.2.1 Comportement mécanique sous effort de compression uniaxial

La Figure 4.16 présente les courbes contrainte-déformation mesurées sous effort de compression uniaxial des mélanges de béton géopolymère B60-40 et B70-30. Les cylindres sont testés à 28 jours après avoir subi une cure de 24 heures à 80 °C.

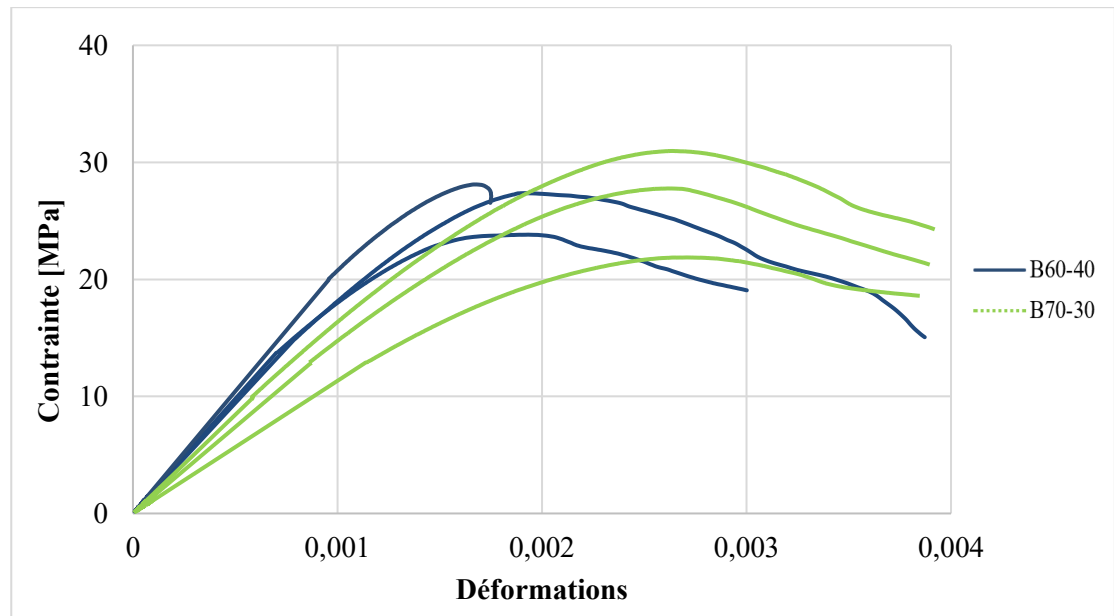


Figure 4.16 : Relation contrainte-déformation du béton géopolymère B60-40 et B70-30 sous effort de compression uniaxial

Il est possible de constater que la teneur en résidu de bauxite influence à la fois la résistance du béton, mais aussi sa déformation. En effet, les cylindres composés du mélange B70-30 présentent une plus grande flexibilité et une plus grande déformation au pic par rapport à ceux composés du mélange B60-40. Plus spécifiquement pour la résistance à la compression, f'_c , la Figure 4.17 présente la moyenne des résultats obtenus après la cure sur 3 éprouvettes des mélanges sélectionnés, ainsi que leur évolution après 28 jours et 56 jours.

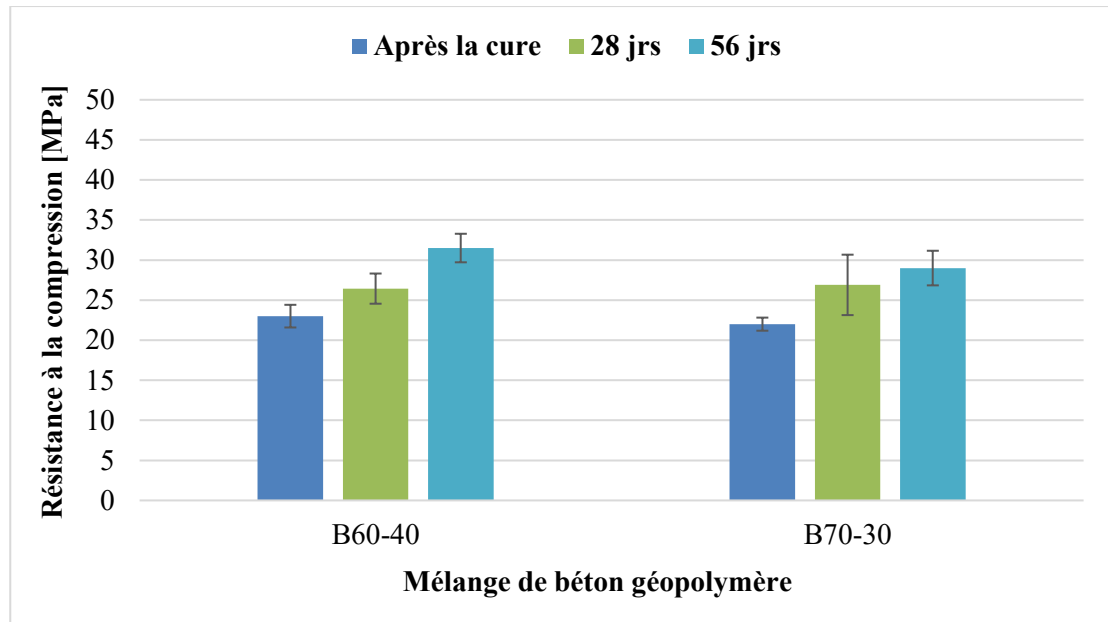


Figure 4.17 : Résistance à la compression fonction de la durée de mûrissement des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30), après 24 heures de cure au four à 80°C

La moyenne des résultats à la compression pour le mélange B60-40 est supérieure à celle du mélange B70-30. L'écart demeure peu significatif et se mesure environ à 2,5 MPa, au maximum. En effet, les valeurs de résistance à la compression mesurées pour les mélanges B60-40 et B70-30 s'établissent à 31,5 et 29,0 MPa, respectivement.

Le module d'élasticité du béton traduit sa rigidité avant le pic. Il correspond à la pente de la droite interceptant la courbe contrainte-déformation sous effort uniaxial, entre les points de contrainte nulle et de contrainte égale à $0.6 f'_c$. La relation empirique proposée dans la littérature et présentée à l'équation (3) permet de prédire le module d'élasticité du béton de ciment Portland à partir de sa résistance à la compression (CSA A23.3). Selon la norme CSA A23.3 (Canadian Standards Association, 2019), pour un

béton de densité normale dont la résistance à la compression varie entre 20 et 40 MPa, le module élastique du béton E_c est donné par l'expression suivante :

$$E_c = 4500\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

Où f'_c est la résistance à la compression du béton mesurée sur cylindre (MPa). La Figure 4.18 présente la moyenne des modules d'élasticité du béton mesurée pour les mélanges B60-40 et B70-30 (moyenne sur 3 éprouvettes) et compare aux valeurs théoriques calculées à partir de l'équation (3). Les mélanges présentés sur cette figure sont chauffés à une température de 80 °C, pour une durée de cure de 24 heures. La moyenne des valeurs de résistance à la compression des deux recettes est d'environ 27 MPa.

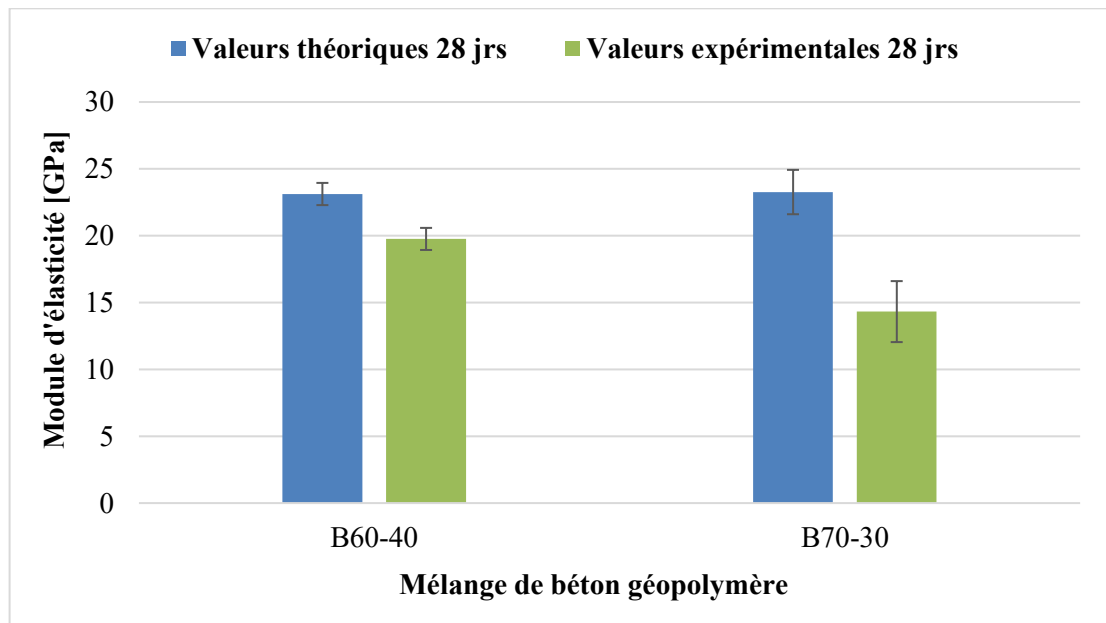


Figure 4.18 : Module d'élasticité en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) selon les valeurs théoriques et expérimentales, à 28 jours

Il est possible de constater que les valeurs théoriques sont supérieures aux valeurs expérimentales obtenues. Pour le mélange B60-40, entre la valeur théorique et la valeur expérimentale, une différence de 15 % est observée entre les deux résultats, tandis que pour le mélange B70-30 une différence de 40 % est notée. Cet écart peut s'expliquer par la constitution du mélange qui diffère entre les deux recettes (B60-40 et B70-30) et peut également s'expliquer par la non-validité de l'équation pour les bétons géopolymères. Théoriquement, pour un béton de ciment Portland ayant une résistance à la compression égale à celles des mélanges de béton géopolymère, le module d'élasticité se situe environ à 23,4 GPa. Ces résultats démontrent que le béton géopolymère est plus flexible que le béton de ciment.

De plus, la résistance à la compression influence le module d'élasticité. En effet, généralement, plus un béton est résistant, plus il est rigide. La norme CSA A23.3 (Canadian Standards Association, 2019) a établi une relation linéaire entre le module d'élasticité et la racine de la résistance à la compression ($E_c/\sqrt{f'_c}$). Cette approche permet de comparer deux bétons dont la résistance à la compression diffère. Pour le béton de ciment Portland, le coefficient de proportionnalité liant ces deux paramètres est environ de 4500. Pour le béton géopolymère de résidu de bauxite, ce coefficient est d'environ 4000 pour le mélange B60-40 et de 2800 pour le mélange B70-30. Il apparaît donc que le béton géopolymère de résidu de bauxite est plus flexible que le béton de ciment Portland. Également, l'augmentation de la teneur en résidu de bauxite semble accentuer cet effet. Cependant, cette constatation est basée sur 6 résultats et davantage

d'essais seraient requis afin de confirmer cette tendance et établir une relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression.

4.2.3 Résistance à la traction

La résistance à la traction peut être mesurée par un essai de flexion. La résistance du béton par essais de flexion, aussi appelé module de rupture f_r , est déterminée sur une poutrelle de béton sur appuis simples supportant une charge en son centre. La charge appliquée à la fissuration de la poutrelle permet d'évaluer la contrainte de traction découlant de l'effort de flexion. La relation empirique proposée dans la littérature et présentée à l'équation (4) permet d'estimer la résistance à la traction par flexion (CSA A23.3).

$$f_r = k\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

Où k est un coefficient empirique et f'_c la résistance du béton à la compression mesurée sur cylindre (MPa). Pour les bétons ordinaires de ciment Portland (f'_c d'environ de 20 à 80 MPa), l'ACI 363 (American Concrete Institute, 2014), Paultre P. (2011), et la norme CSA A23.3 (Canadian Standards Association, 2019), recommandent d'utiliser respectivement $k = 0,94$, $k = 1,20$ et $k = 0,60$. La Figure 4.19 présente la moyenne de la résistance à la traction par fendage mesurée sur 3 éprouvettes des deux différents mélanges testés et compare aux valeurs théoriques calculées à partir de l'équation proposée par la norme CSA A23.3 ($k = 0,60$). Les mélanges présentés sur cette figure sont placés à une température de 80 °C, pour une durée de cure de 24 heures. La moyenne des valeurs de résistance à la compression des deux recettes se situe autour de 25 MPa.

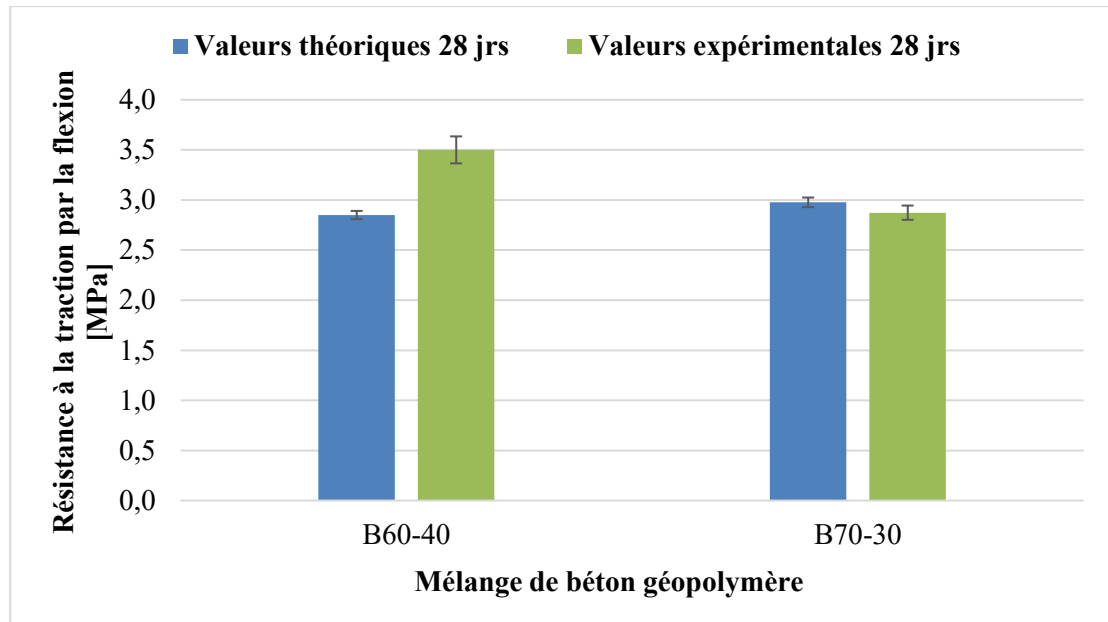


Figure 4.19 : Résistance à la traction par la flexion en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) selon les valeurs théoriques et expérimentales, à 28 jours

Il est possible de constater à la Figure 4.19 que les valeurs expérimentales obtenues pour les mélanges de béton géopolymère sont similaires ou supérieures aux valeurs théoriques prédites pour un béton de ciment par la norme CSA A23.3 (Canadian Standards Association, 2019). Le mélange R60-40 a une résistance à la traction, 20 % supérieure que celle du mélange R70-30. De plus, la valeur expérimentale du mélange contenant 60 % de résidu de bauxite (R60-40) est 20 % plus haute que la valeur théorique obtenue selon la norme CSA A23.3 (Canadian Standards Association, 2019). Théoriquement, pour un béton de ciment Portland ayant une résistance à la compression égale à celles des mélanges de béton géopolymère, la valeur de résistance à la traction par la flexion se situe environ à 3 MPa. La Figure 4.20 présente la surface de rupture observée après l'essai de flexion, pour une poutrelle du mélange B60-40.



Figure 4.20 : Poutrelle après la rupture de l'échantillon B60-40A

L'essai de traction par fendage est une autre méthode couramment utilisée pour évaluer la résistance à la traction. Tout comme pour l'essai de flexion, différentes relations présentées dans la littérature permettent d'évaluer la résistance à la traction par fendage, f_{sp} , à partir de la résistance à la compression sous effort uniaxial. Parmi celles-ci, Massicotte, B. (2017) a proposé d'utiliser la relation suivante pour un béton de ciment Portland ordinaire :

$$f_{sp} = 0,55 * \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

Où f'_c est la résistance à la compression du béton mesurée sur cylindre (MPa). La Figure 4.21 présente la moyenne de la résistance en traction par fendage mesurée sur 3 éprouvettes de chacun des mélanges B60-40 et B70-30 et compare à la résistance théorique calculée à partir de l'équation (5). Les mélanges testés ont subi une cure de 24 heures à 80 °C, puis ont été entreposés à l'air ambiant avant l'essai de fendage réalisé à 28 jours. La moyenne des valeurs de résistance à la compression des deux recettes se situe autour de 25 MPa.

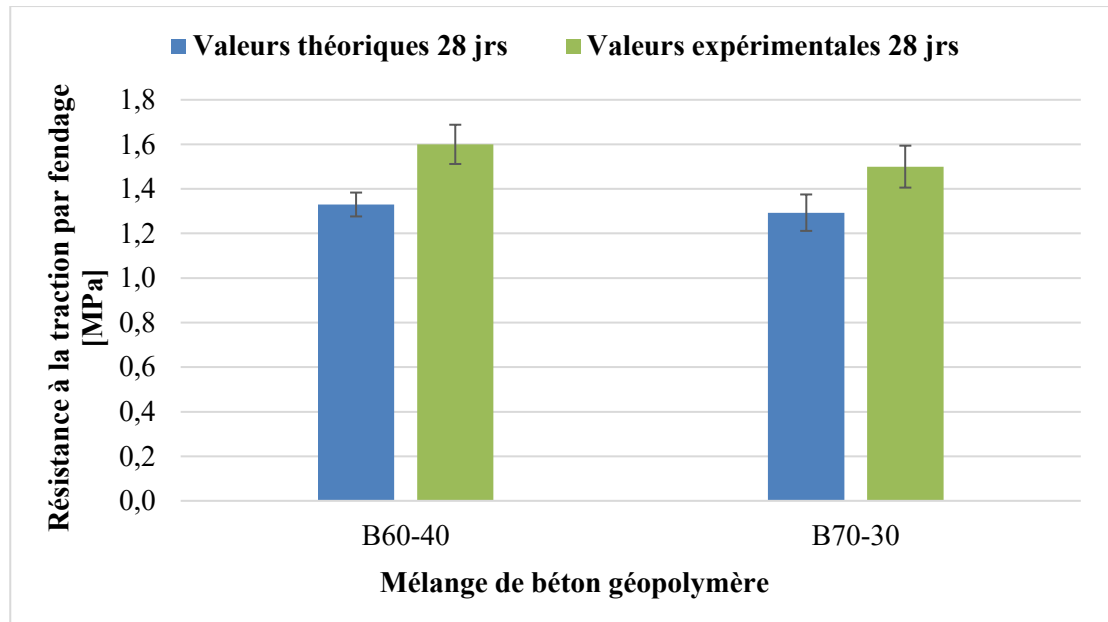


Figure 4.21 : Résistance à la traction par fendage du béton en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) selon les valeurs théoriques et expérimentales, à 28 jours

Il est possible de constater que les valeurs théoriques prédites pour un béton de ciment Portland sont inférieures aux valeurs expérimentales obtenues pour béton géopolymère. La recette B60-40 présente une résistance à la traction, 6 % supérieure à celle du mélange R70-30. De plus, la valeur expérimentale du mélange contenant 60 % de résidu de bauxite (R60-40) est 11 % plus haute que la valeur théorique obtenue selon Massicotte, B. (2017). Théoriquement, pour un béton de ciment Portland ayant une contrainte égale à celles des mélanges de béton géopolymère, la valeur de résistance à la traction se situe environ à 1,35 MPa.

4.2.4 Durabilité

4.2.4.1 Résistance à l'écaillage

La résistance à l'écaillage du béton peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que la composition du béton (type et proportions des différents matériaux utilisés), les conditions de mélange et de coulage, ainsi que les conditions d'exposition (humidité, température et environnement agressif, etc.). La résistance à l'écaillage est déterminée en mesurant la masse de la matière écaillée et en réalisant une évaluation visuelle de l'état d'une surface de béton. Pour cet essai, deux plaques tests de chacun des mélanges B60-40 et B70-30 ont été mises à l'épreuve. La Figure 4.22 présente l'état des surfaces et l'évolution de la dégradation d'une plaque représentative de chacun des mélanges de béton géopolymère B60-40 et B70-30, après avoir été exposée à des cycles de gel-dégel en présence de sel de déglacage.

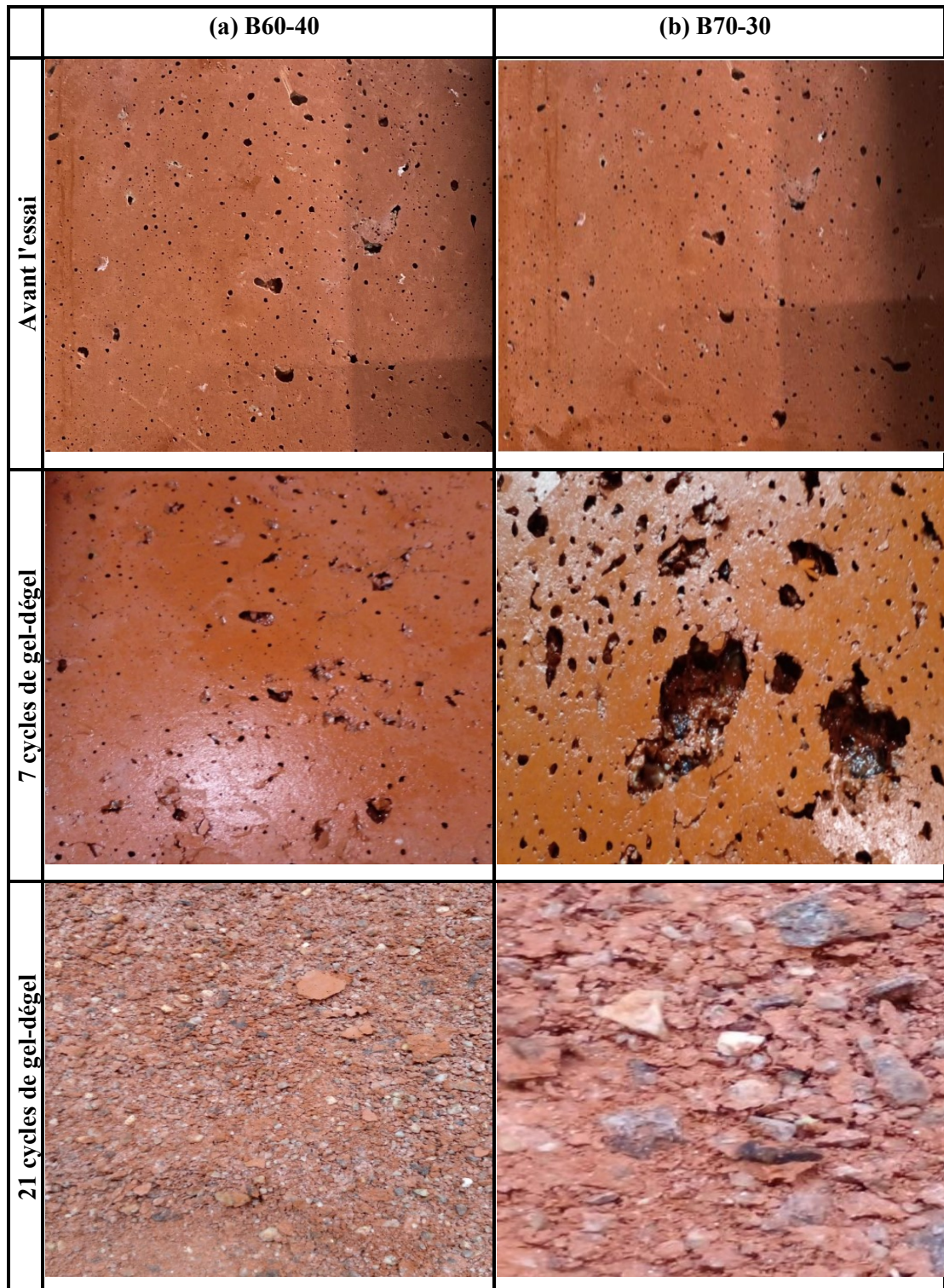


Figure 4.22 : Photos représentatives de la surface de béton géopolymère (a) B60-40 et (b) B70-30 après l'essai d'écaillage et prises à différentes périodes

Il est possible de remarquer l'importance de la dégradation des plaques de béton géopolymère causé par l'écaillage. Cette dégradation apparaît plus importante pour le béton B70-30 que le béton B60-40. Lorsque la teneur en résidu de bauxite est plus élevée, une détérioration supérieure est donc constatée. D'un point de vue quantitatif, le Tableau 4.2 et la Figure 4.23, présentent les résultats d'écaillage pour chacune des plaques et chacun des mélanges après avoir été exposés à 21 cycles de gel-dégel en présence de sels de déglacage. Cette figure compare également les résultats pour le béton géopolymère à la limite normative de 0,50 kg/m² prescrite en milieu agressif après 56 cycles par la norme CSA A23.1 (Canadian Standards Association, 2019) pour les bétons de ciment Portland.

Tableau 4.2 : Résultats des essais de la résistance à l'écaillage des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30), après 7 et 21 cycles

		B60-40		B70-30	
		Plaque A	Plaque B	Plaque A	Plaque B
7 cycles	Côte visuelle	2B	2B	5C	5C
	Résidus d'écaillage (g)	6,8	4,5	25,2	35,8
	Perte de masse [kg/m ²]	0,09	0,06	0,36	0,52
21 cycles	Côte visuelle	5C	5C	5C	5C
	Résidus d'écaillage (g)	474,1	464,4	560,7	771,1
	Perte de masse [kg/m ²]	6,0	5,9	8,1	11,1
Résultats		≤ 0,50 kg/m ² Conforme / > 0,50 kg/m ² Non-conforme			

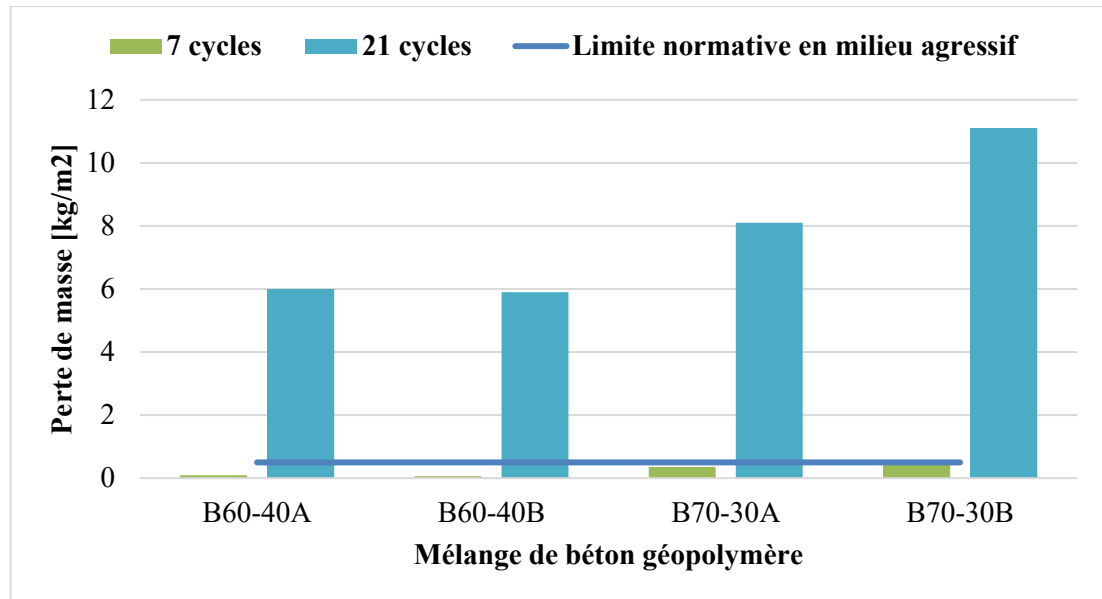


Figure 4.23 : Perte de masse (kg/m^2) des plaques lors de l'essai de résistance à l'écaillage en fonction des mélanges de béton géopolymère (B60-40 et B70-30), après 7 et 21 cycles

Il est possible de constater qu'après 21 cycles, la perte de masse du béton géopolymère testé dépasse largement la limite à l'écaillage de $0,5 \text{ kg/m}^2$, prescrite à 56 cycles par la norme CSA A23.1 (Canadian Standards Association, 2019). Pour cette raison, les essais ont été interrompus à 21 cycles. Il est possible de constater que le mélange B60-40 dépasse d'un facteur 12 la limite normative de perte de masse. Avec une teneur en résidu de bauxite plus élevée, la perte de masse des plaques de béton B70-30 dépasse d'environ 16 à 20 fois la limite normative pour un béton de ciment Portland. Ces résultats sont cohérents avec les constatations visuelles de la Figure 4.22. Il apparaît donc que le béton géopolymère à base de résidu de bauxite testé dans ce projet présente une performance en écaillage largement inférieure aux exigences normatives.

Le choix des mélanges a été fait selon les performances mécaniques obtenues dans la phase d'optimisation. Pour le même mélange, les valeurs moyennes de résistance à la compression sont environ de 35 et 31 MPa pour les mélanges B60-40 et B70-30, respectivement. Cependant, les résultats de résistance à la compression obtenus avec le même béton géopolymère utilisé pour confectionner les plaques de l'essai de résistance à l'écaillage divergent des résultats habituels avec les mêmes conditions. Il y a un écart entre 8 et 12 MPa. La variation constatée peut être attribuée au vieillissement du silicate de sodium au fil du temps, ce qui a causé un impact défavorable lors de la coulée du mélange de béton géopolymère utilisé pour la fabrication des cylindres et des plaques. Il est probable que la géopolymérisation n'était pas optimale à ce moment, entraînant une dégradation accélérée du béton géopolymère.

4.2.4.2 Essai de lixiviation

Le Tableau 4.3 présente les résultats de l'essai de lixiviation. Les mélanges de béton géopolymère B60-40 et B70-30 (sans superplastifiant) sont testés et comparés au béton de ciment Portland ordinaire. Les résultats présentés ont été obtenus avec l'essai permettant de déterminer les concentrations en métaux, selon la méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon (MA.200- Mét 1.2, 2020). Ensuite, le tableau présente les résultats de l'essai des fluorures selon la méthode colorimétrique après distillation (MA.300 – F 1.2, 2014), les résultats de l'essai de détermination des anions par la méthode chromatographie ionique (MA. 300 – Ions 1.3, 2020) et finalement il présente, l'essai de détermination des cyanures selon la méthode colorimétrique automatisée avec l'acide isonicotinique et l'acide barbiturique

(MA. 300 – CN 1.2, 2016). La dernière colonne du tableau inscrit les concentrations maximales acceptables d'un contaminant dans une matière liquide ou dans le lixiviat d'une matière solide pour une matière lixiviable selon les règlements sur les matières dangereuses. (Gouvernement du Québec, 2023)

Tableau 4.3 : Concentration en métaux et matière dangereuse du lixiviat de béton géopolymère (B60-40 et B70-30) et de béton de ciment Portland

Métaux lixiviés					
	Unités	Béton géopolymère B60-40	Béton géopolymère B70-30	Béton de ciment	Normes
Méthode d'analyse 200- Mét 1.2					
Arsenic (As)	mg/L	0.22	0.033	<0.0020	5
Baryum (Ba)	mg/L	0.35	1.0	0.30	100
Bore (B)	mg/L	3.7	4.1	<0.050	500
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0,5
Chrome (Cr)	mg/L	0.0072	0.021	0.039	5
Mercure (Hg)	mg/L	<0.00050	<0.00050	<0.00050	0,1
Plomb (Pb)	mg/L	<0.0010	<0.0010	<0.0010	5
Sélénium (Se)	mg/L	0.037	0.015	<0.0010	1
Uranium (U)	mg/L	0.0076	0.021	<0.00060	2
Paramètres conventionnels					
	Unités	Béton géopolymère B60-40	Béton géopolymère B70-30	Béton de ciment	Normes
Méthode d'analyse 300 – CN 1.2					
Cyanures totaux (CN)	mg/L	<0.10	<0.10	<0.10	20
Méthode d'analyse 300 – F 1.2					
Fluorure (F)	mg/L	3.4	4.2	1.0	150
Méthode d'analyse 300 – Ions 1.3					
Nitrites (N-NO₂-)	mg/L	<0.20	<0.20	<0.20	100
Nitrate(N) et Nitrite(N)	mg/L	<0.20	<0.20	<0.20	1000

Du Tableau 4.3 il est possible de constater que le lixiviat du béton géopolymère présente des concentrations de métaux et matière dangereuse largement inférieures aux

limites acceptées par les normes. La concentration du lixiviat du béton géopolymère contient légèrement plus de Baryum, Bore, Sélénium, Uranium et Fluor que le lixiviat du béton de ciment Portland de référence, mais cette concentration demeure approximativement 100 fois inférieure aux limites acceptées comme matière dangereuse. La concentration des autres métaux dans le lixiviat du béton géopolymère est comparable, voire inférieure au béton de ciment Portland (Cd, Cr, Hg, Pb, CN, N). Il apparaît donc que le béton géopolymère de résidu de bauxite peut être considéré comme une matière non dangereuse, présentant un niveau de relargage comparable au béton de ciment Portland. Le Tableau 4.4 présente les résultats de pH obtenus par les essais de lixiviation.

Tableau 4.4 : pH du lixiviat du béton géopolymère (B60-40 et B70-30) et de ciment Portland

pH				
	Béton géopolymère B60-40	Béton géopolymère B70-30	Béton de ciment	Normes
pH après 18 heures de mélange (TCLP-EPA 1311)	7.84	4.78	10.1	12.5
pH après 7 jours de mélange (CTEU-9)	12.5	12.4	12.4	12.5

Il est possible de constater que le lixiviat des bétons géopolymères B60-40 et B70-30 présentent un pH de 12.5 et 12.4 respectivement après 7 jours, soit des valeurs s’approchant de la limite acceptable. Néanmoins, il est intéressant de constater que le lixiviat du béton de ciment Portland atteint également un pH de 12.4 après 7 jours. Bien que ce pH soit significativement près de la limite acceptable d’un point de vue normatif, le béton géopolymère de résidu de bauxite est donc très similaire au béton de ciment

Portland. De plus, bien que cela respecte les normes, la valeur obtenue du pH de 4.78 pour le mélange B70-30 semble différente des autres résultats et il serait intéressant de répéter l'essai pour validation.

4.3 Prototype à échelle réelle et validation

Le mélange de béton géopolymère de résidu de bauxite choisi pour le prototype à échelle réelle du banc de parc diffère du mélange principalement caractérisé de façon détaillée en raison des considérations industrielles de fabrication d'un prototype à échelle réelle. En effet, la maniabilité est une propriété à prioriser et le besoin d'ajouter du superplastifiant est important afin d'avoir un mélange fluide et facile à manipuler. Ainsi, bien que le béton B60-40 et B70-30 aient été plus largement caractérisés, c'est le mélange B60-40SP contenant du superplastifiant E₃ qui a été utilisé pour la fabrication du banc de parc. La Figure 4.24 présente le mélange de béton géopolymère B60-40SP à l'état frais lors de la fabrication du prototype à échelle réelle.



Figure 4.24 : Béton géopolymère B60-40SP lors du malaxage

Le malaxage du béton géopolymère a duré environ une heure. Simultanément à la coulée du banc de parc, des éprouvettes ont été confectionnées afin de mesurer la résistance à la compression à trois âges différents (1 jour, 7 jours et 28 jours) et un essai d'affaissement a été effectué. La surface arasée du banc de parc une fois coulé est présentée à la Figure 4.25.



Figure 4.25 : Surface arasée du béton géopolymère du banc de parc

Au moyen d'une trémie, la mise en place du béton s'est effectuée de manière très fluide. La texture du géopolymère est uniforme et il est facile à manipuler. Il a été observé que le géopolymère se place par lui-même lors de la première levée, nul besoin de l'étendre manuellement. Malgré tout, une aiguille vibrante a servi à le consolider. Comme illustré sur la Figure 4.25, la finition de surface s'est réalisée à l'aide d'un bourroir et d'une règle d'arasement. Dix minutes après la fin du malaxage du béton,

l'essai d'affaissement est effectué. Un affaissement de 210 mm est obtenu. L'allure du béton à l'essai d'affaissement est présentée à la Figure 4.26.



Figure 4.26 : Allure de l'affaissement du béton B60-40SP utilisé pour le banc de parc (affaissement mesuré de 210 mm)

Il est possible de constater visuellement que le mélange est homogène et présente une texture maniable. Il a été observé que le béton est légèrement collant à cette étape-ci. Afin de procéder à la cure à température élevée, des couvertures chauffantes ont été utilisées pour envelopper le prototype de banc de parc ainsi que les cylindres d'essai, afin que ces cylindres curent dans les mêmes conditions que le banc de parc. La cure a été réalisée à une température de 60 °C constante durant 24 heures. Le lendemain de la coulée, le banc a été décoffré en utilisant des élingues à l'aide du pont roulant. La Figure 4.27 présente le banc de parc après son décoffrage. Il est possible de constater que la surface est bien lisse et que le béton a été coulé

uniformément. Par la suite, le banc de parc ainsi que les cylindres ont été entreposés sous condition ambiante.



Figure 4.27 : Section de banc de parc

À la suite de la fabrication du banc de parc, les cylindres de béton géopolymère ont été testés en compression afin d'évaluer la résistance à la compression du béton du banc de parc. La Figure 4.28 présente la résistance à la compression des cylindres mesurée immédiatement après la cure de 24 heures, ainsi qu'à 7 jours et 28 jours. De l'analyse de cette figure, il est possible de constater que la résistance à la compression augmente avec le temps. Cela confirme que l'effet du superplastifiant sur le géopolymère n'affecte pas négativement la résistance, et ce, même avec des volumes plus importants. Après 7 jours, les cylindres subissent une augmentation de résistance d'environ 20 % (entre 1 et 7 jours), tandis qu'entre 7 et 28 jours, seulement une augmentation de 10 % est observée. De plus, un thermocouple est placé à l'intérieur du banc de parc pour suivre la température dans le temps, afin de s'assurer que le temps

et la température de cure que subiront le banc et les cylindres sont les bonnes. En comparant la résistance mesurée sur cylindres placés dans le four (Figure 4.9) à la résistance de cylindres placés dans les conditions de cure du banc de parc, sous les couvertures chauffantes (Figure 4.28), il peut être constaté que la résistance des éprouvettes sous ces couvertures est moins élevée d'environ 6 MPa (Figure 4.9) que lors d'une cure au four. Cette différence peut cependant s'expliquer par une distribution moins efficace de la chaleur à l'intérieur des couvertures chauffantes, qui chauffent un grand volume, par rapport à un four préchauffé qui chauffe un petit volume.

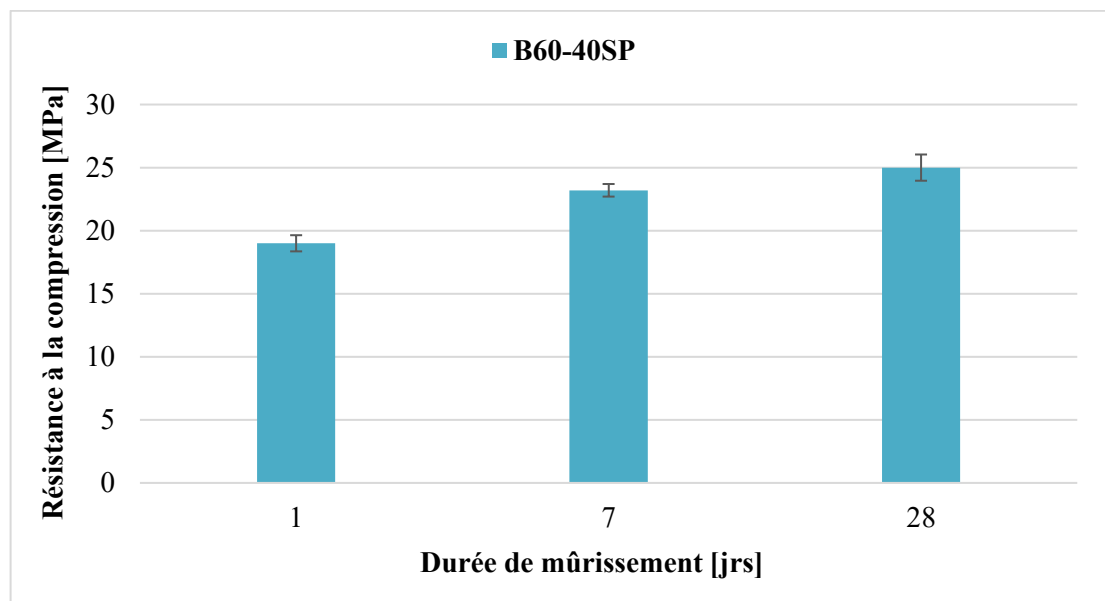


Figure 4.28 : Résistance à la compression du mélange de béton géopolymère (B60-40SP) en fonction de la durée de mûrissement (1 à 28 jours), après une cure de 24 heures à 60 °C

5 Discussion

5.1 Effet du résidu de bauxite

Initialement, la proportion de résidu de bauxite dans le liant, en substitution de la cendre volante, est le premier paramètre de base à l'étude dans ce projet. Les proportions de 60 % et 70 % de résidu de bauxite ont montré le meilleur équilibre entre le taux de valorisation du résidu et les propriétés à l'état frais et durci des mélanges. Ces deux proportions ont été sélectionnées pour l'étude des propriétés des mélanges tout au long du projet. Les résultats obtenus démontrent que l'ajout de résidu de bauxite dans le mélange a un impact significatif sur la résistance à la compression et la maniabilité du mortier et du béton géopolymère. La Figure 5.1 présente la résistance à la compression en fonction du pourcentage du résidu de bauxite pour des mélanges de mortier ayant fait l'objet d'une cure de 24 heures à 60 °C, tout en comparant aux résultats obtenus par El-Gass (2020). Il est notable que les résultats obtenus dans le cadre de ce projet soient en adéquation avec ceux rapportés par El-Gass (2020), démontrant des tendances similaires. En effet, les mélanges contenant un pourcentage de résidu de bauxite situé entre 50 % et 70 % manifestent des performances comparables. À titre d'exemple, la résistance en compression des mélanges R60-40 et R70-30 affiche une plage allant de 22 à 32 MPa. Toutefois, il convient de noter que pour les mélanges renfermant un pourcentage de 80 % ou 90 % de résidu de bauxite, une diminution substantielle de la résistance à la compression est observée. Plus précisément, une réduction d'environ 10 MPa est constatée pour le mélange contenant 80 % de résidu de bauxite. En ce qui concerne le mélange contenant 90 % de résidu de

bauxite, tel qu'étudié par El-Gass (2020), ne présente qu'une résistance à la compression de moins de 5 MPa.

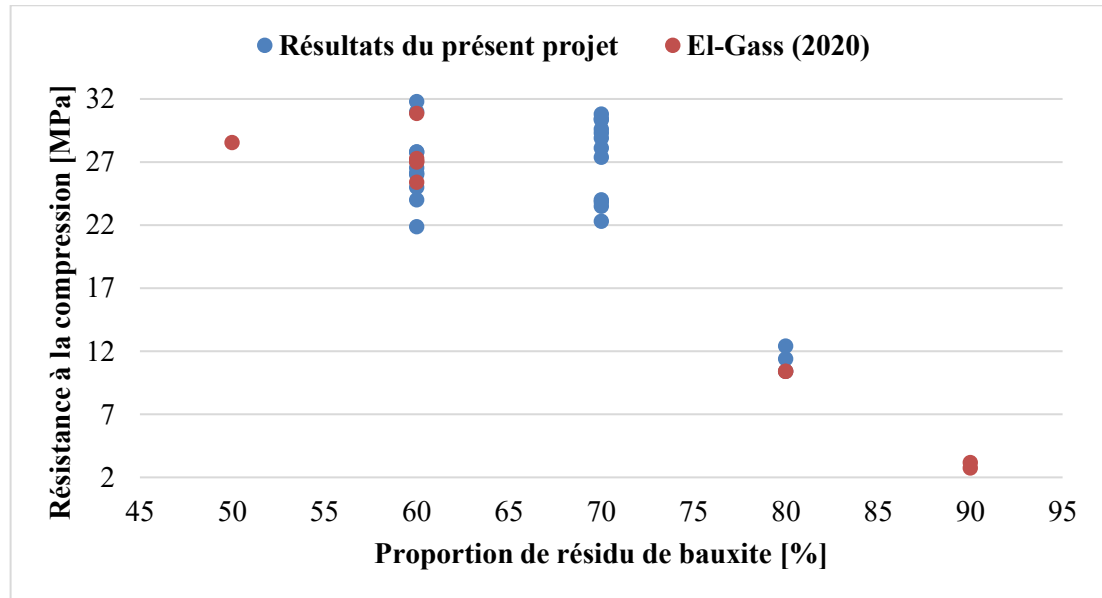


Figure 5.1 : Variation de la résistance à la compression du mortier géopolymère en fonction de la proportion de résidu de bauxite pour différentes références, après une cure de 24 heures à 60 °C

Comme abordé au chapitre 2, le résidu de bauxite est composé en partie de SiO_2 et Al_2O_3 sous forme d'aluminosilicates stables. Cela étant dit, la résistance mécanique est reflétée par la qualité du liant et de la réaction de géopolymérisation. L'absence de linéarité entre la résistance à la compression et le taux de résidu de bauxite peut s'expliquer par d'autres facteurs, tels que la compacité de la pâte et le rapport eau/liant. En effet, le résidu de bauxite utilisé sous forme séchée et broyée présente une granulométrie très fine (entre 8 et 80 μm). Il est probable que le résidu de bauxite contribue à augmenter la densité de la pâte en comblant les vides de la matrice géopolymère, partiellement, compensant ainsi la perte de cendre volante disponible pour la géopolymérisation. De plus, le résidu de bauxite séché et broyé accapare une

quantité significative d'eau en raison de sa neutralité hygroscopique d'environ 26 %. De ce fait, bien que la teneur en cendre volante diminue, la quantité d'eau disponible pour cette cendre volante diminue également, ce qui contribue à maintenir, voire, réduire le rapport eau/liant. Néanmoins, cette diminution de l'eau disponible, due à l'absorption par le résidu de bauxite, peut affecter négativement la maniabilité. Par conséquent pour des pourcentages élevés en résidu de bauxite, cela peut contribuer à la formation de vides lors de la coulée et ainsi conduire à une diminution de la résistance à la compression.

5.2 Effet du ratio eau/liant

Le rapport eau/liant (e/l) apparaît comme un paramètre qui exerce une influence significative à la fois sur la résistance à la compression et sur la maniabilité du mélange. En moyenne, les mélanges de mortier géopolymère testés présentent des rapports e/l variant de 0,12 à 0,28. Lorsque le rapport e/l passe de 0,12 à 0,28, la résistance à la compression du mortier géopolymère diminue. Ce phénomène est également observé dans le contexte des mortiers à base de ciment Portland. De plus, les performances mécaniques du béton géopolymère montrent une diminution à mesure que du liquide est introduit dans le mélange. Cette diminution s'explique par l'augmentation de la distance entre les grains de liants, ce qui rend le mortier moins dense. Pour atteindre la résistance à la compression souhaitée, il est nécessaire de maintenir un faible rapport eau/liant. Cependant, plus la quantité d'eau diminue, plus le mélange perd sa maniabilité. Ainsi, ce paramètre constitue un facteur déterminant qui influe de manière opposée sur les paramètres clés du projet, à savoir la résistance à la compression et la

maniabilité. Autrement dit, un rapport eau/liant plus élevé se traduira par une résistance à la compression réduite, tandis que la fluidité du mélange sera améliorée.

5.3 Effet des conditions d'activation (température et durée de cure)

La nature des conditions d'activation est importante à considérer dans le processus de synthèse du géopolymère. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence significative de la durée et la température sur la résistance à la compression. En modifiant les conditions de la cure, notamment la température et la durée, il a été possible d'obtenir des résistances à la compression moyennes allant de 5,2 MPa à 46,1 MPa et de 4,3 à 38,4 MPa, pour les mélanges comportant un liant constitué de 60 % et 70 % de résidu de bauxite, respectivement, après une période de 28 jours. En effet, ces résistances ont été obtenues à la suite des cures thermiques d'une durée de 6, 24 ou 48 heures et à une température constante comprise entre 60 °C et 90 °C. Ces résultats ont démontré que la cure thermique est un élément essentiel pour accélérer la réaction de géopolymérisation. Par exemple, le mélange R60-40 a atteint une résistance à la compression de 5,2 MPa après une cure de 6 heures à 60 °C, alors que pour le même mélange, une résistance à la compression de 5,5 MPa a été obtenue après 7 jours de cure à température ambiante. Cette différence s'explique par la vitesse de prise considérablement plus lente lorsqu'une cure est effectuée à basse température. De plus, il est à noter qu'une température de cure plus élevée, maintenue sur une période prolongée, permet de développer rapidement des résistances à la compression élevées. En effet, une activation thermique plus importante cause une accélération de la réaction de géopolymérisation, favorisant ainsi l'obtention de performances optimales à un stade précoce. À titre d'exemple, le même mélange R60-40 a atteint une résistance à la

compression de 44,2 MPa après 24 heures de cure à 90 °C (Figure 4.10). Cependant, les essais ont démontré que prolonger la cure au-delà de 48 heures n'améliore que marginalement la résistance à la compression, la majeure partie de la maturation se produisant au cours des 24 premières heures de cure.

5.4 Effet des conditions de mûrissement

La Figure 5.2 présente les résultats de la résistance à la compression des mortiers géopolymères en fonction de la durée de mûrissement des deux mélanges, R60-40 et R70-30. Ces mélanges sont placés au four 80 °C pendant 24 ou 48 heures, puis entreposés à température et humidité ambiante pour une période supplémentaire allant de 0 à 90 jours, avant d'être soumis à des essais de compression uniaxiale. De plus, la durée de la cure à 80 °C est associée aux noms des mélanges dans la légende (par exemple, R60-40 – 24 h pour le mélange R60-40 soumis à une cure de 24 heures), tandis que la période de maturation en conditions ambiantes est représentée sur l'axe horizontal de la Figure 5.2.

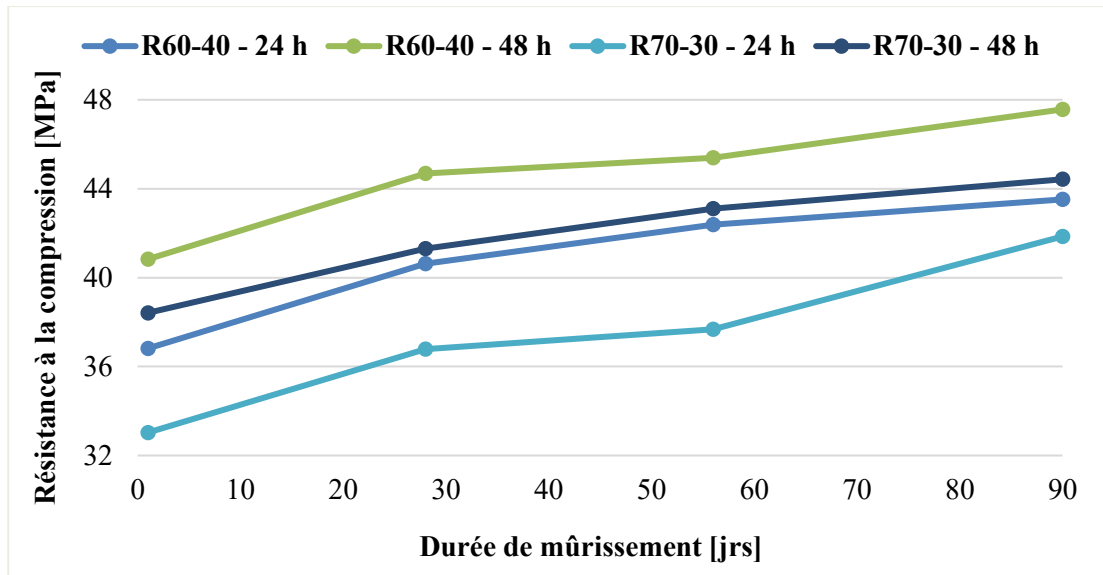


Figure 5.2 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée de mûrissement des mélanges de mortier géopolymère (R60-40 et R70-30), après 24 ou 48 heures de cure au four à 80 °C

L'influence du temps et de la température de mûrissement sur le béton géopolymère est un facteur important à prendre en compte. Après une cure à haute température de 24 ou 48 heures, le mortier géopolymère développe une résistance à la compression comprise entre 75 et 85 % de celle mesurée après 90 jours. D'une part, en exposant le mélange à une température de 80 °C, la résistance à la compression atteint 36,8 MPa après 24 heures, puis augmente à 43,5 MPa après 90 jours. Dans des conditions d'activation et de mûrissement similaires, le mélange R70-30 présente une résistance à la compression de 33,1 MPa après 24 heures, progressant à 41,9 MPa après 90 jours. D'autre part, toujours en chauffant le mélange R60-40 à une température de 80 °C, mais pendant 48 heures cette fois, il obtient une résistance à la compression de 40,8 MPa après 48 heures, puis augmente à 47,6 MPa après 90 jours. Dans des conditions d'activation équivalentes, le mélange R70-30 affiche une résistance à la

compression de 38,4 MPa après 48 heures, évoluant à 44,4 MPa après 90 jours. La Figure 5.2 montre que le mortier géopolymère performe à jeune âge et qu'une période de cure plus longue améliore sa performance. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse dans l'industrie de la construction préfabriquée, où des temps de coffrage de moins longue durée permettent une production plus rapide. Lors de la phase d'optimisation, les résultats obtenus à 28 jours, 56 jours et 90 jours indiquent que la résistance à la compression continue d'augmenter en dehors du four, bien que la progression soit beaucoup plus lente. Après la cure dans le four, les cylindres sont transférés au laboratoire pour mûrir à température ambiante. Le terme « mûrissement » est utilisé pour définir la période de repos d'un cylindre entre sa sortie du four et les essais mécaniques. Des observations ont mis en évidence que les cylindres mûris à des températures plus basses que la température ambiante ont présenté des résistances à la compression plus faibles en hiver par rapport à ceux mûris en été, lorsque la température minimale spécifiée dans le laboratoire est de 22 °C. En résumé, une différence d'environ 7 MPa a été notée entre les valeurs de résistance à la compression obtenues en été et celles obtenues en hiver pour les mélanges R60-40 et R70-30. Cette disparité pourrait être attribuée aux variations de température au sein du laboratoire. En effet, la température ambiante baisse durant la nuit en hiver, autant qu'en été, la température ambiante demeure au-dessus de 22 °C. Il serait pertinent d'étudier l'impact d'une température de mûrissement supérieure à la température ambiante du laboratoire (22 °C) pendant la période estivale.

5.5 Effet des superplastifiants

L'ajout de superplastifiant dans le mélange de mortier/béton géopolymère, conformément aux doses recommandées, entraîne une réduction significative de la résistance à la compression et de la maniabilité. En particulier, les superplastifiants de type polycarboxylate (V_6 et V_2) se sont révélés peu efficaces dans les mélanges géopolymères aux doses utilisées, ne permettant pas d'atteindre une maniabilité satisfaisante des résistances à la compression élevées. De même, les superplastifiants de type naphthalène (E_3 et N_3) utilisés conformément aux recommandations du fabricant n'ont pas atteint les niveaux de performance requis. En effet, en respectant les dosages recommandés pour un béton de ciment Portland, ces superplastifiants ont une tendance à rigidifier le mélange et à réduire la maniabilité à l'état frais. Cependant, en raison des différences de composition entre le mélange de béton de ciment Portland et le béton géopolymère à base de cendre volante et de résidu de bauxite, la réaction de ces mélanges avec les superplastifiants peut varier. Pour cette raison, des quantités plus grandes de superplastifiant E_3 ont été testées pour analyser plus en détail la réaction générée avec le mortier géopolymère. Ainsi, il a été observé que le superplastifiant E_3 a un impact important à la fois sur la résistance à la compression et la maniabilité du mortier géopolymère à base de résidu de bauxite, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Les mélanges contenant ce type de superplastifiant à base de naphthalène ont présenté une légère amélioration de la résistance à la compression et une nette augmentation de la maniabilité. De plus, le superplastifiant agit comme un retardateur de prise, prolongeant la période pendant laquelle le béton présente un état plastique.

5.6 Fabrication d'un prototype de banc de parc

La Figure 5.3 présente les compositions massiques des différents composants des mélanges de béton, utilisés à la fois pour le banc de parc en béton de ciment et le banc de parc en béton géopolymère. La recette utilisée pour la fabrication du banc en béton de ciment Portland correspond à la formulation typiquement utilisée par Béton Préfabriqué du Lac (BPDL, 2019) pour ce type d'élément. Quant au mélange de béton géopolymère B60-40SP développé dans le cadre cette étude, il est utilisé pour la convection d'un second banc de parc.

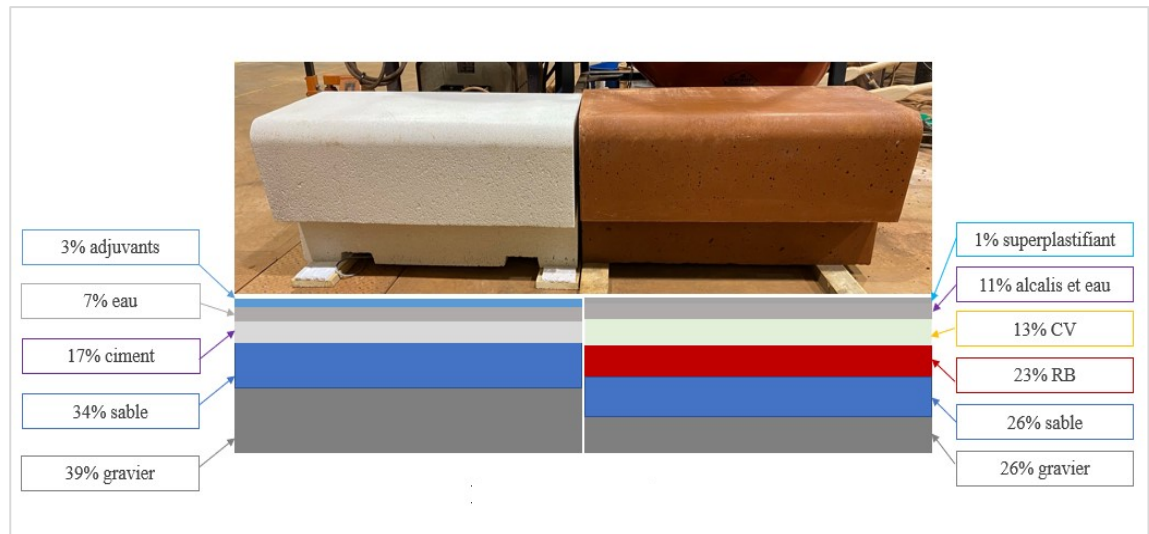


Figure 5.3 : Comparaison des proportions massiques entre le banc de parc en béton de ciment et le banc de parc en béton géopolymère

En observant la Figure 5.3, il est possible de constater que le mélange de référence en béton de ciment Portland est constitué de 3 % d'adjuvants (entraîneurs d'air et superplastifiants), contrairement au banc en béton géopolymère qui ne contient que 1 % de superplastifiant (E₃). De plus, le banc de référence comporte 17 % de matériaux liants, alors que le banc de géopolymère présente plus du double de cette

proportion, soit 13 % de cendre volante et 23 % de résidu de bauxite, totalisant ainsi 36 % de liant au total. De plus, le béton géopolymère nécessite une moins grande quantité de granulats. En comparaison avec la formulation de référence du béton de ciment Portland, une réduction de 13 % des granulats grossiers et de 8 % des granulats fins est observée dans la composition du banc de parc en béton géopolymère.

6 Conclusion

6.1 Synthèse des résultats

Ce projet avait pour objectif principal de mieux comprendre l'effet des paramètres de confection d'un mélange de béton géopolymère à base de résidu de bauxite et de cendre volante de classe F sur ses principales propriétés à l'état frais, pour la fabrication d'un élément en béton géopolymère architectural. Dans cette optique, le matériau de géopolymère a été caractérisé et optimisé afin d'atteindre les standards requis en termes de maniabilité, de résistance et de durabilité. Plusieurs paramètres ont été étudiés ainsi que leur influence sur les propriétés mécaniques sur le mortier et le béton géopolymère. Le projet était divisé en cinq grandes étapes interreliées.

La phase 1 se caractérisait par le développement et la fabrication du mortier géopolymère. Cette phase a confirmé que :

- La durée de malaxage est un paramètre important à considérer ;
- L'ordre de l'introduction des matériaux est important pour la maniabilité et l'homogénéité du mélange. Cette particularité est étudiée tout au long du projet.

Les phases 2 et 3 avaient pour but de caractériser et d'optimiser le mortier et le béton géopolymère afin de s'assurer qu'ils respectent bien les standards requis à l'état durci et à l'état frais, en terme essentiellement de résistance mécanique et de maniabilité mesurés par des essais de compression et des essais d'affaissement. Les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'ajout de résidu de bauxite à l'état sec conduit à une réduction progressive de la résistance à la compression et de la maniabilité ;
- Le rapport eau/liant a un effet important sur la résistance en compression. Une augmentation de ce rapport conduit à une réduction de la résistance à la compression, mais à une augmentation de la maniabilité ;
- La résistance à la compression est fortement influencée par la température de cure. Une cure à température plus élevée favorise une résistance à la compression plus importante. Cette constatation suggère également que la réaction de géopolymérisation, dont dépendent les performances mécaniques, est plus rapide et plus efficace à température élevée ;
- De façon analogue, l'augmentation du temps de cure a un effet important sur l'augmentation de la résistance en compression à tous les âges ;
- Après une cure à haute température, un mûrissement à condition ambiante permet au béton géopolymère de continuer à gagner de la résistance, mais plus lentement ;
- Les doses de superplastifiant recommandées pour un béton de ciment Portland ne permettent pas d'améliorer significativement la maniabilité des mortiers de géopolymères testés dans cette étude ;
- L'utilisation de superplastifiant (E₃) au-dessus de la dose recommandée pour un béton de ciment Portland améliore significativement la maniabilité des mélanges.

La quatrième phase avait pour objectif de caractériser et d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques du béton géopolymère. Les résultats montrent que :

- La résistance à la pénétration du béton géopolymère est plus grande et s'accroît plus rapidement lorsque la température des mélanges frais augmente. Le temps de prise est donc plus court lorsque le béton géopolymère frais est plus chaud ;
- Le superplastifiant permet de fluidifier le béton géopolymère à l'état frais, de réduire sa résistance à la pénétration et de retarder sa prise ;
- La résistance à la traction du béton géopolymère est similaire à la résistance à la traction typique d'un béton de ciment Portland ;
- De façon générale, le béton géopolymère testé dans ce projet est plus flexible lorsque soumis à un essai de compression uniaxiale qu'un mélange de béton de ciment Portland typique de résistance similaire. Le module d'élasticité du béton géopolymère est donc inférieur à celui d'un béton de ciment Portland de résistance similaire ;
- Le béton géopolymère testé dans cette étude a présenté une performance à l'écaillage largement inférieure à la limite établie en condition agressive pour un béton de ciment Portland. Le béton géopolymère testé dans ce projet n'est donc pas adapté pour une utilisation sans protection en milieu agressif sujet à l'écaillage ;
- Les résultats des essais de lixiviation confirment que le béton géopolymère est généralement comparable au béton de ciment pour la majorité des métaux et pour le pH. De façon générale, les concentrations sont très largement (environ plus de 100 fois) inférieures aux seuils de matière dangereuse.

La cinquième phase a permis de confirmer la méthode de fabrication d'un prototype. Les conclusions suivantes en sont ressorties :

- L'utilisation de résidu de bauxite dans le béton représente une avenue intéressante pour produire des éléments architecturaux.

6.2 Contributions originales

L'ensemble des travaux effectués dans ce projet de recherche aura permis d'avancer l'industrie des bétons géopolymères. De plus, selon les connaissances acquises, il s'agit de la première étude détaillée sur les bétons géopolymères à base de résidu de bauxite produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Ce projet a permis de :

- Développer et caractériser un nouveau type de béton géopolymère à base de résidu de bauxite du Saguenay-Lac-Saint-Jean. En effet, les bétons géopolymères sont relativement nouveaux comparativement au béton de ciment Portland et l'ajout de résidu de bauxite du Saguenay-Lac-Saint-Jean représente un caractère novateur important ;
- Connaître et mieux comprendre l'effet des principaux paramètres qui affectent le comportement et les propriétés du béton géopolymère à base de résidu de bauxite ;
- Proposer différents mélanges et méthodes de cure potentiellement utilisables pour la fabrication et la construction d'éléments architecturaux et structuraux.

6.3 Perspectives de recherche

Cette étude est axée sur le développement d'une méthode de fabrication d'un élément en béton géopolymère architectural et sur l'optimisation de ses formulations de mélange. Toutefois, il y a une multitude de paramètres à étudier et d'autres essais à réaliser sur les géopolymères à base de résidu de bauxite. Les points suivants présentent des avenues intéressantes pour de futures recherches :

- Les résultats obtenus à ce jour suggèrent qu'il sera nécessaire d'ajouter des entraîneurs d'air afin d'améliorer la durabilité à l'écaillage et au gel-dégel. Il est fortement suggéré qu'une prochaine étude se penche sur les moyens d'améliorer la durabilité au gel-dégel des bétons de géopolymère à base de résidu de bauxite ;
- Utiliser d'autres ajouts cimentaires, en remplacement à la cendre volante de classe F. En effet, ce précurseur solide est en forte demande et la réduction constante de la quantité produite en Amérique du Nord engendre une rareté ;
- La présente étude n'a pas été en mesure d'observer les mécanismes de production du béton géopolymère. Il est proposé d'effectuer des observations au microscope électronique à balayage (MEB), afin de mieux comprendre les paramètres qui affectent directement cette réaction, principalement en ce qui a trait au rôle joué par le résidu de bauxite ;
- Étudier le comportement d'éléments structuraux du béton géopolymère de résidu de bauxite armé et précontraint afin d'utiliser les mélanges développés pour des applications structurales ;

- Explorer des méthodes de pigmentation pour le béton géopolymère afin d'améliorer les attraits architecturaux ;
- Afin de maximiser la valorisation du résidu de bauxite dans le béton en général, il est finalement proposé d'étudier l'incorporation de ce résidu dans un mélange de béton de ciment Portland ;
- Procéder à un test de vieillissement accéléré en laboratoire sur le béton géopolymère (par exemple, exposition aux rayons UV), afin de suivre son mûrissement ;
- Une estimation sommaire pour la valorisation des résidus de bauxite pourra être effectuée pour voir le gain économique (s'il y a lieu) de l'utilisation des résidus de bauxite.

Ce projet est innovateur, d'impact scientifique important et de forte incidence industrielle en raison de l'aspect environnemental, régional et distinctif du matériau investigué.

Bibliographie

- ASTM International (2022). ASTM C642-21. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM International (2022). ASTM C469 / C469M-22. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM International (2023). ASTM C617 / ASTM C617M. Standard Practice for capping cylindrical concrete specimens, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM International (2023). ASTM C403/C403M-23. Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- Azad, N. M., & Samarakoon, S. M. S. M. K. (2021). Utilization of Industrial By-Products/Waste to Manufacture Geopolymer Cement/Concrete. *Sustainability*, 13(2).
- Balaguer, Pascual., (2014). Élaboration de nouveaux liants minéraux pour la formulation de bétons écologiques et durables. Mémoire de maîtrise, Génie civil, Université de Sherbrooke, 158 pages.
- Bergeron, Simon. (2017). Un pas de plus vers la valorisation des résidus de bauxite, Rio Tinto. Repéré à PowerPoint Présentation (ehq-production-canada.s3.ca-central-1.amazonaws.com)
- Blais, Raphaëlle. (2016). La bauxite et ses résidus. Centre de recherche sur le développement territorial.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Affaissement du béton, CSA.A23.2-5C, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Analyse granulométrique du granulat fin et du gros granulat, CSA.A23.2-2A, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Calcul de la résistance à l'écaillage des surfaces de béton exposées à des produits chimiques de déglacage utilisant la perte de masse, CSA.A23.2-22C, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.

- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Confection et cure des éprouvettes de béton destinées aux essais de compression et de flexion, CSA.A23.2-3C, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Densité relative et absorption du gros granulat, CSA.A23.2-12A, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Détermination de la densité relative et de l'absorption du granulat fin, CSA.A23.2-6A, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Détermination de la résistance à la compression d'éprouvettes de béton cylindriques, CSA.A23.2-9C, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Détermination de la résistance à la flexion du béton (au moyen d'une poutre simple chargée au tiers), CSA.A23.2-8C, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Détermination de la résistance à la traction par écrasement latéral d'éprouvettes de béton cylindres, CSA.A23.2-13C, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Détermination de la teneur en air du béton plastique par la procédure de pression d'air, CSA.A23.2-4C, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Humidité superficielle du granulat fin et du gros granulat, CSA.A23.2-11A, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario.
- Canadian Standards Association (CSA) (2019). Mississauga, Ontario.
- Canadian Tire – Bétonnière électrique 5 A portative 74013 (2023). Bétonnières non tractables. Repéré à <https://www.canadiantire.ca/fr/pdp/betonniere-electrique-5-a-portative-74013-115-l-4-pi3-0604050p.html>
- Canadian Tire. (2012). Guide d'utilisation et d'entretien, Bétonnière. Repéré à <https://media-www.canadiantire.ca/manuals/product/0604050/0604050-fr-c96c6630-3c23-4b96-9b5f-5396afbc902a.pdf>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Détermination des anions : méthode par chromatographie ionique MA. 300 – Ions 1.3, révision 6, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2020, 14 p. [En ligne]. Méthode d'analyse, MA. 300 – Ions 1.3, 2020-05-21 (révision 6) (gouv.qc.ca)

- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Détermination des cyanures : méthode colorimétrique automatisée avec l'acide isonicotinique et l'acide barbiturique – distillation manuelle, MA. 300 – CN 1.2, Rév. 4, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2016, 26 p.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Détermination des fluorures : méthode colorimétrique après distillation, MA. 300 – F 1.2, Rév. 3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2014, 20 p. Repéré à MA. 300 - F. 1.2 (gouv.qc.ca)
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Détermination des métaux : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon, MA. 200 – Mét. 1.2, révision 7, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2020, 35 p. [En ligne]. Méthode d'analyse, MA. 200 – Mét. 1.2, 2020-05-21 (révision 7) (gouv.qc.ca)
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques, MA. 100 – Lix.com.1.1, Rév. 1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, 2012, 17 p. Repéré à MA. 100 - Lix.com 1.1 (gouv.qc.ca)
- Chen, X., Guo, Y., Ding, S., Zhang, H., Xia, F., Wang, J., Zhou, M. (2019) Utilization of Red Mud in Geopolymer-Based Pervious Concrete with Function of Adsorption of Heavy Metal Ions. *Journal of a Cleaner Production*, V. 207, p. 789-800.
- Cherki El Idrissi, A. (2016). Géopolymérisation et activation alcaline des coulis d'injection : structuration, micromécanique et résistance aux sollicitations physico-chimiques. Génie civil. École centrale de Nantes, 181 pages.
- Controls. (2022). ASTM – Automatic Compression Testers for Cylinders Pilot Pro. Repéré à <https://www.controls-group.com/es/product/pdf/4642/>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2006). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
- El-Gass, H., Fiset, M., Simard, G. (2020) : Formulation d'un mortier géopolymère conducteur à base de résidus de bauxite. Rapport de recherche, Université du Québec à Chicoutimi, 28 pages.

- Fahim Huseien, G., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Abdulameer Hussein, A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.
- Hardjito D., Rangan B.V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 103 pages.
- Hassan, A., Arif, M., Shariq, M. (2019) Use of Geopolymer Concrete for Cleaner and Sustainable Environment - A Review of Mechanical Properties and Microstructure. *Journal of Cleaner Production*, V. 223, p. 704-728.
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2020). A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements- A clean technology option for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 245.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 37, 108-118.
- He, J., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G. (2013) The Strength and Microstructure of Two Geopolymers Derived from Metakaolin and Red Mud-Fly Ash Admixture: A Comparative Study. *Construction and Building Materials*, V. 30, p. 80-91.
- Hu, W., Nie, Q., Huang, B., Shu, X., He, Q. (2018) Mechanical and Microstructural Characterization of Geopolymers Derives from Red Mud and Fly Ashes. *Journal of Cleaner Production*, V. 186, p. 799-806
- Humboldt. (2009). Acme Penetrometer, product manual H-4133. Repéré à https://www.humboldtmg.com/manuals/H-4133_man_0609.pdf
- Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., Hussein, A.A. (2017) Geopolymer Mortars as Sustainable Repair Material: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 80, p. 54-74.
- Imer - Together we build (2023). Bétonnières non tractables. Repéré à <https://www.imer.fr/fr/nos-produits/betonniere/non-tractables/254-s-190-s-250-s-350>

- J. Deschamps, B. Simon, A. Tagnit-Hamou, and B. Amor, "Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 185, pp. 14–22, 2018.
- Kamseu, E., Alzari, V., Nuvoli, D., Sanna, D., Lancellotti, I., Mariani, A., & Leonelli, C. (2021). Dependence of the geopolymerization process and end-products to the nature of solid precursors: Challenge of the sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 278.
- Kosmatka S.H., Kerkhoff B., Hooton D., McGrath R.J. (2011). *Dosage et contrôle des mélanges de béton, EB101, 8e édition*, Association Canadienne du Ciment, Ottawa, Ontario, Canada: 421p.
- Lafrenière, C. (2017). *Évaluation du comportement en durabilité de nouvelles matrices cimentaires pour l'obtention de bétons respectueux de l'environnement. Maîtrise interuniversitaire en sciences de la Terre*, Université Laval, 242 pages.
- Gouvernement du Québec – Chapitre Q-2, r. 32 – Règlement sur les matières dangereuses (2023) Repéré à Q-2, r. 32 - Règlement sur les matières dangereuses (gouv.qc.ca)
- Li, Y., Liu, X., Li, Z., Ren, Y., Wang, Y., & Zhang, W. (2021). Preparation, characterization and application of red mud, fly ash and desulfurized gypsum based eco-friendly road base materials. *Journal of Cleaner Production*, 284.
- Li, Y., Min, X., Ke, Y., Liu, D., Tang, C. (2019) Preparation of Red Mud-Based Geopolymer Materials from MSWI Fly Ash and Red Mud by Mechanical Activation. *Waste Management*, V. 83, p. 202-208.
- MTS Criterion. (2016). Series 60 Static-Hydraulic Universal Test Systems. Repéré à <https://irp-cdn.multiscreensite.com/46de5e3a/files/uploaded/MTSSeries60.pdf>
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement and Concrete Composites*, 55, 205-214.
- Paultre, P. (2011). *Structures en béton armé: analyse et dimensionnement*. Presses internationales Polytechnique.
- Rasaki, S. A., Bingxue, Z., Guarecuco, R., Thomas, T., & Minghui, Y. (2019). Geopolymer for use in heavy metals adsorption, and advanced oxidative processes: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 213, 42-58.

- Rio Tinto. (2014). Composition des résidus de bauxite. Repéré à SchémaResidusBauxite_07(ehq-production-canada.s3.ca-central-1.amazonaws.com)
- Syntesis – Bétonnière, Manuel d'utilisation entretien pièces de rechanges (2016) Repéré à :https://www.imerusa.com/uploads/1/2/6/2/126204803/3228768_r12_02_2019.pdf
- Test mark industries. (2023). Concrete Pressure Meter. Repéré à <https://www.testmark.net/concrete-pressure-meter.html>
- Toufigh, V., & Jafari, A. (2021). Developing a comprehensive prediction model for compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete (FAGC). *Construction and Building Materials*, 277.
- Wang, S., Jin, H., Deng, Y., & Xiao, Y. (2021). Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 289.
- Watts, Jonathan. (2019). Concrete : Concrete: the most destructive material on Earth. Repéré à Concrete: the most destructive material on Earth | Cities | The Guardian
- World Aluminium (2020). Opportunities for Use of Bauxite Residue in Special Cements. 46 pages.
- Xu H., Van Deventer J.S.J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate mineralas, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 59: 247-266p.
- Yi, C., Boluk, Y., & Bindiganavile, V. (2020). Enhancing alkali-activation of metakaolin-based geopolymers using dry water. *Journal of Cleaner Production*, 258.
- Zhang, J., Li, S., Li, Z., Liu, C., Gao, Y. (2020) Feasibility Study of Red Mud for Geopolymer Preparation: Effect of Particle Size Fraction. *Journal of Materials Cycles and Waste Management*, V. 22, p. 1328-1338.
- Zhang, M., El-Korchi, T., Zhang, G., Liang, J., & Tao, M. (2014). Synthesis factors affecting mechanical properties, microstructure, and chemical composition of red mud–fly ash based geopolymers. *Fuel*, 134, 315-325.
- Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Mann, D., Lumsden, K., Tao, M. (2016) Durability of Red Mud-Fly Ash Based Geopolymer and Leaching Behavior of Heavy Metals in Sulfuric Acid Solution and Deionized Water. *Construction and Building Materials*, 124, p. 373-382.

Annexe A : Fiche technique de la cendre volante de classe

F

TECHNICAL REPORT

CCL CERTIFIED CONCRETE TESTING LABORATORY
IN ACCORDANCE WITH CSA A888-06



FLY ASH ANALYSIS

To: **Lehigh Cement**
#222, 885 42 Avenue SE
Calgary, AB. T2G 1Y8

Office: **Calgary**
Project No: **CA18620**
Email: **equagraine@saskpower.com**
flyash@saskpower.com
gmilbrandt@saskpower.com
ktytlandsvik@saskpower.com
sbengert@saskpower.com

Attn: **Walter Dobslaw**
Project: **2020 Quality Assurance Testing**

Subject **Chemical and Physical Analysis of Fly Ash**

SAMPLE IDENTIFICATION: **Unclassified Fly Ash** SOURCE: **Shand Power Station**
DATE SAMPLED: **Dec 1-31, 2020** DATE RECEIVED: **12-Jan-21** DATE REPORTED: **6-Apr-21**
SAMPLED BY: **Client** TEST NO.: **205H23**

CHEMICAL ANALYSIS

TEST DESCRIPTION	TEST RESULTS	UNITS	SPECIFICATIONS						
			ASTM C618-19		CSA A3001-18				
			CLASS F	CLASS C	TYPE F	TYPE CI	TYPE CH		
- Silicon Dioxide (SiO ₂)	53.7	%							
- Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	19.0	%							
- Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	4.4	%							
- Total (SiO ₂)+(Al ₂ O ₃)+(Fe ₂ O ₃)	77.2	%	50 min.	50 min.					
- Sulphur Trioxide (SO ₃)	1.27	%		5 max			5 max		
- Calcium Oxide (CaO)	7.8	%	18 max	> 18		≤ 15	> 15 - ≤ 20	> 20	
- Moisture Content †	0.04	%		3 max			3 max		
- Loss on Ignition	0.46	%		6 max		8 max	6 max	6 max	

PHYSICAL ANALYSIS

- Fineness Retained on 45µm (No. 325 Sieve)	15.7	%		34 max		34 max
- Strength Activity Index with Cement Percent of Control at 7 Days	84.7	%		75 min		
- Percent of Control at 28 Days †	88.4	%		75 min		75 min
- Water Requirement, % of Control	93.0	%		105 max		
- Soundness, Autoclave Expansion		%		0.8 max		0.8 max
- Density	2.31	g/cm ³				
- Increase of Drying Shrinkage at 28 D. ‡		%		0.03 max		
- Quantity of Air Entraining Agent	0.350	%				
- Control of Alkali (Si) Agg. Reactivity Mortar Expansion at 14 Days † ‡		%		100 max		0.10 max
- Sulphate Resistance at 6 Months † ‡		%		Moderate Exposure = 0.10 max; High Exposure = 0.05 max		Moderate Exposure = 0.10 max; High Exposure = 0.05 max
UNIFORMITY REQUIREMENTS:						
- Density, Variation from Ave.	-0.6	%		± 5		
- Fineness, 45µm Sieve Variation from Ave.	-3.8	%		± 5		
- A.E.A., Variation from Ave. † ‡	7.6	%		± 20		± 20

COMMENTS: Air Foam Index = 3
† Optional Requirement CSA A3001 - Table A.3
‡ Optional Requirement ASTM C618 - Table 3

(Final Report)

Wood Environment and Infrastructure Solutions

Materials Laboratory Technician

Associate Materials Engineer

TECHNICAL REPORT

CCL CERTIFIED CONCRETE TESTING LABORATORY
 IN ACCORDANCE WITH CSA A283-19

**Supplementary Cementing Material Analysis**

To: **Lehigh Cement**
 #222, 885 42 Avenue SE
 Calgary, AB. T2G 1Y8

Office: **Calgary**
 Project No: **CA18620**
 Email: **equagraine@saskpower.com**
flyash@saskpower.com
gmilbrandt@saskpower.com
ktytlandsvik@saskpower.com
sbengert@saskpower.com

Attn: **Walter Dobslaw**
 Project: **2020 Quality Assurance Testing**

Subject **Chemistry - Alkali Analysis - Summary**

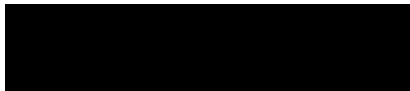
Source: **Shand Power Station**
 Date Sampled: **Dec 1-31, 2020**
 Sample Description: **Unclassified Fly Ash**
 Sample Test No.: **20SH23**

Test Identification	Analytical Parameters	Reporting Unit (%)
Total (Acid Soluble) Alkalies	Total Sodium Oxide (Na ₂ O)	6.41
	Total Potassium Oxide (K ₂ O)	1.93
	Corrected Potassium (K ₂ O x 0.658)	1.27
	Total (Acid Soluble) Alkalies as Na ₂ O	7.68
Water Soluble Alkalies	Water Soluble Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.64
	Water Soluble Potassium Oxide (K ₂ O)	0.03
	Corrected Potassium (K ₂ O x 0.658)	0.02
	Water Soluble Alkalies as Na ₂ O	0.66
Available Alkalies	Available Sodium Oxide (Na ₂ O)	1.95
	Available Potassium (K ₂ O)	0.27
	Corrected Potassium (K ₂ O x 0.658)	0.18
	Available Alkalies as Na ₂ O	2.12

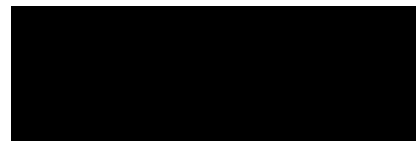
COMMENTS:

- Test Methods CSA A3003-18 and ASTM C114
- CSA Reference Standard A23.2-19-27A, Table 6
- ASTM Reference Standard C 618-19

Wood Environment and Infrastructure Solutions



Materials Laboratory Technician



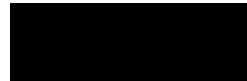
Associate Materials Engineer

Annexe B : Fiche technique du résidu de bauxite

**RAPPORT D'ANALYSE version 1**Votre référence ...: **T0002993****ANDREIA CAROLIN ROSA
COREM**Date de réception: **2021-07-06**Certificat émis le: **2021-07-13**

Numéro COREM :	130934- 1
Nature :	SOLIDES
Désignation :	Souche
<hr/>	
A25- 2 Analyse	2021-07-07
A25- 2 SiO2	11.1 %
A25- 2 Al2O3	17.2 %
A25- 2 Fe2O3	44.4 %
A25- 2 MgO	0.05 %
A25- 2 CaO	2.61 %
A25- 2 Na2O	6.44 %
A25- 2 K2O	0.06 %
A25- 2 TiO2	4.74 %
A25- 2 MnO	0.01 %
A25- 2 P2O5	0.130 %
A25- 2 Cr2O3	0.10 %
A25- 2 V2O5	0.18 %
A25- 2 ZrO2	0.24 %
A25- 2 ZnO	< 0.010 %
A25- 2 PAF	11.9 %
<hr/>	
DEN120- 1 Analyse	2021-07-06
DEN120- 1 Dens. sp.	3.244 g/cm ³
<hr/>	
FRP05- 1 Préparation	2021-07-06
FRP05- 1 Pulv. W	Terminée
<hr/>	
TH-MS-S- 1 Analyse	2021-07-07
TH-MS-S- 1 Th	92.4 mg/kg
<hr/>	
U-MS-S- 1 Analyse	2021-07-07
U-MS-S- 1 U	9.1 mg/kg

Approuvé par :



Ce rapport contient des renseignements protégés et confidentiels à l'intention du destinataire. Les résultats ne se rapportent qu'aux échantillons soumis à l'analyse. Ce rapport ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.

Si le dosage P15, P20 ou P21 sont inscrits au certificat, les essais ont été effectués sur la fraction passante.

Si le dosage B73 est inscrit au certificat, l'analyse FX (A02, A21A, A25 ou A32) a été effectuée sur les cendres.

Cette version remplace et annule toute version antérieure, le cas échéant. * Analyse faite par un sous-traitant.

COREM

1180, rue de la Minéralogie, Québec (Québec) Canada G1N 1X7

Téléphone : (418) 527-8211

Télécopieur : (418) 527-9188

F-GEN-53 (2019-09-10)

Page : 2 de 2

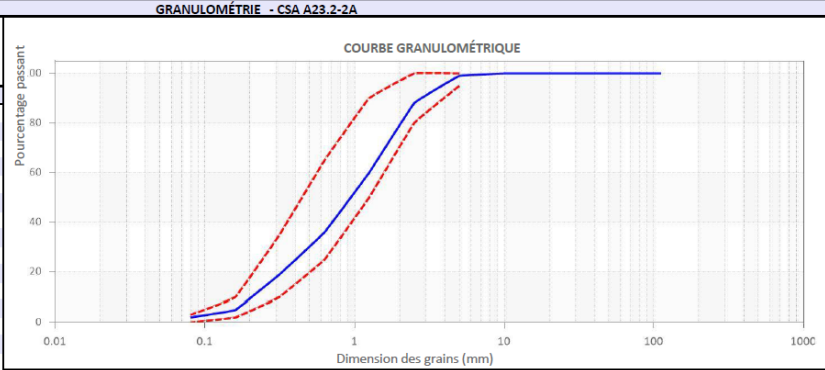
**Annexe C : Propriétés physiques des matériaux (granulat
fin)**



Projet : **B25-20** Fournisseur : **St-Henri** No. Réserve : **1**
 Contrat : **Contrôle 2020** Client : **Béton Préfabriqués du Lac inc.** Calibre : **BC 5-80 µm**
 Lot : Usage : **Béton de ciment** Catégorie : **-**

Échantillon : **D20G7568**
 Date : **2020-12-07**
 Endroit prélevé : **Pile de réserve**
 Pallier : **-**

Tamis	% passant	Min	Max
112 mm	100		
80 mm	100		
56 mm	100		
40 mm	100		
31.5 mm	100		
20 mm	100		
14 mm	100		
10 mm	100		
5.0 mm	99	95	100
2.5 mm	88	80	100
1.25 mm	60	50	90
630 µm	36	25	65
315 µm	19	10	35
160 µm	5	2	10
80 µm	1,7	0,0	3,0



AUTRES CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES

Description	Méthode	Effectué par	Date	Résultat	Min	Max
Retenu individuel - Gravier	CSA A23.2-2A	SCT inc.	2020-12-07	1 %		
Retenu individuel - Sable	CSA A23.2-2A	SCT inc.	2020-12-07	97 %		
Retenu individuel - Silt	CSA A23.2-2A	SCT inc.	2020-12-07	1,7 %		
Colorimétrie	A23.2-7A	SCT inc.	2020-12-15	2		3

Remarques : Les résultats sont représentatifs de l'échantillon fourni par le client.

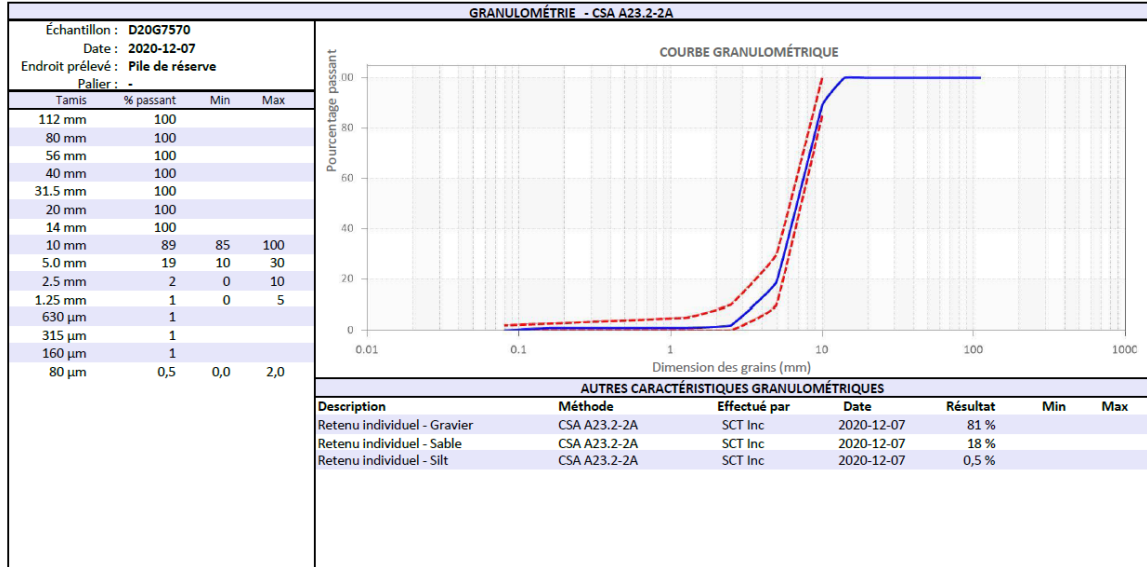
**Annexe D : Propriétés physiques des matériaux (granulat
grossier)**



Projet : **B25-20**
Contrat : **Contrôle 2020**
Lot :

Fournisseur : **Bergeronnes**
Client : **Béton Préfabriqués du Lac inc.**
Usage : **Béton de ciment**

No. Réserve : **1**
Calibre : **2.5-10 mm**
Catégorie : **-**



Remarques : Les résultats sont représentatifs de l'échantillon fourni par le client.

Annexe E : Fiches techniques des superplastifiants

Sika® ViscoCrete® 6100 (V6) Adjuvant réducteur d'eau de grande portée

Construction

Description	Le Sika® ViscoCrete® 6100 est un adjuvant réducteur d'eau et un superplastifiant de grande qualité, utilisant la technologie du polymère polycarboxylate des ViscoCrete® Sika.
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none">■ Le Sika® ViscoCrete® 6100 est conçu pour être utilisé dans des applications de béton préfabriqué/précontraint et peut également être utilisé dans la production de béton auto-plaçant (BAP).■ Le Sika® ViscoCrete® 6100 est un réducteur d'eau de haute qualité fournissant une excellente plasticité et pouvant être combiné à d'autres accélérateurs ou retardateurs de prise afin de contrôler les temps de prise et l'affaissement.
Avantages	<p>Réduction d'eau : Le Sika® ViscoCrete® 6100 peut s'utiliser en petites doses pour obtenir une réduction d'eau de 10 à 15 %. À dosage plus élevé, il est possible d'atteindre une réduction d'eau de 45 %. Le Sika® ViscoCrete® 6100 convient à tous les niveaux de réduction d'eau.</p> <p>Grande plasticité et cohésion : L'action superplastifiante du Sika® ViscoCrete® 6100 produit un béton fluide, à haut affaissement, qui maintient son ouvrabilité et peut être mis en place avec un minimum ou sans vibration et cela même à des ratios eau/ciment aussi bas que 0,25.</p> <p>Le béton plastifié au Sika® ViscoCrete® 6100 conservera une excellente cohésion à l'intérieur du moule, ce qui éliminera les ressurgences excessifs ou la ségrégation. L'effet plastifiant unique du Sika® ViscoCrete® 6100 procure une excellente finition de la surface.</p> <p>L'action combinée de réduction d'eau et de superplastifiant du Sika® ViscoCrete® 6100 procure au béton durci les avantages suivants:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Développement rapide de la résistance à la compression permettant un décoffrage plus rapide et une accélération de la mise en service.■ Une plus grande résistance à la rupture permettant des conceptions d'ingénierie plus flexibles et des économies structurelles.■ Un ratio eau/ciment réduit produira un béton plus durable, plus dense à perméabilité réduite.■ Le plastifiant de haute efficacité réduit les défauts de surface des éléments de béton et améliore son apparence.■ Idéal pour la production de BAP.■ Idéal pour les camions-malaxeurs. <p>Il a été conçu pour fournir une réduction d'eau maximale, accélérer l'atteinte à la résistance et pour améliorer les caractéristiques de finition, spécialement pour un fini au balai.</p> <p>Le Sika® ViscoCrete® 6100 ne contient aucun formaldéhyde, chlorure de calcium ou tout autres chlorures ajoutés, n'amorcera ni ne répandra la rouille aux armatures d'acier présentes dans le béton.</p> <ul style="list-style-type: none">■ Approuvé par le Ministère des Transports de l'Ontario.■ Agréé par le Ministère des Transports du Québec.
Normes	Le Sika® ViscoCrete® 6100 rencontre la norme ASTM C494 Types A et F.

Caractéristiques

Conditionnement	Fût de 205 L (54 gal US) GRV de 1040 L (275 gal US) En vrac
Couleur et aspect	Liquide ambre
Conservation et entreposage	1 an lorsqu'entreposé dans un endroit sec, à des températures se situant entre 10 - 27 °C (50 - 80 °F). Entreposer à des températures au-dessus de 5 °C (40 °F). En cas de gel, dégeler et agiter jusqu'à ce que le produit retrouve son état initial.
Propriétés	
Densité relative	Environ 1.09



Mode d'emploi**Dosage**

Les dosages varieront selon les matériaux utilisés, les conditions ambiantes et les besoins spécifiques de chaque projet. Sika recommande un dosage de 195 - 520 mL/100 kg de matériel cimentaire pour une application de béton conventionnelle. Si une réduction d'eau plus élevée est nécessaire, le dosage recommandé sera de 780 mL/100 kg de produit cimentaire.

Des dosages autres que ceux recommandés ici peuvent être nécessaires lorsque l'utilisation de matériaux spécifiques tels que la microsilice est requise, lorsque l'on rencontre des conditions ambiantes extrêmes ou lorsque des conditions de projet nécessitent une attention particulière. Dans ce cas, contacter votre représentant technique des ventes Sika Canada pour plus d'informations.

Mûrissement

Procéder au mûrissement selon les normes ASTM C31/C31M ou autre spécification applicable.

Malaxage

Pour obtenir de meilleurs résultats, ajouter le Sika® ViscoCrete® 6100 au malaxeur, à la fin du cycle de gâchage.

Le Sika® ViscoCrete® 6100 peut être également distribué dans le mélange lors de l'ajout habituel des adjuvants au moment du gâchage ou ajouté au béton dans le camion-malaxeur, au départ de la centrale.

Afin d'obtenir l'effet superplastifiant maximal, il est recommandé, une fois le Sika® ViscoCrete® 6100 ajouté, de mélanger les matériaux pendant 60 à 80 tours dans le malaxeur de la centrale ou de celui du camion.

Compatibilité avec d'autres adjuvants : Le Sika® ViscoCrete® 6100 est un adjuvant de haute efficacité pouvant être utilisé individuellement ou en association avec d'autres adjuvants du système Sika. Utilisé en combinaison avec certain réducteur d'eau Sikament®, il est possible que les propriétés plastifiantes du béton frais soient affectées. Contacter votre représentant technique des ventes Sika Canada pour plus d'informations.

Compatibilité avec la microsilice : Le Sika® ViscoCrete® 6100 est particulièrement bien adapté pour l'utilisation avec la microsilice étant donné sa capacité supérieure de réduction d'eau. Veiller cependant à ne pas incorporer Sika® ViscoCrete® 2110 directement dans les matériaux cimentaires secs.

Nettoyage

Porter les équipements de protection individuelle appropriés (lunettes/gants/vêtements résistants aux produits chimiques). En évitant tout contact direct, retirer tout déversement ou excédent de produit et le placer dans un contenant hermétique. Éliminer en conformité des lois environnementales applicables.

Santé et sécurité

Pour plus de renseignements et conseils relatifs à la manipulation, l'entreposage et l'élimination des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter les **fiches signalétiques les plus récentes** du produit contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données portant sur la sécurité.

**GARDER HORS DE LA PORTÉE DES ENFANTS
POUR USAGE INDUSTRIEL SEULEMENT**

Les renseignements et, notamment, les recommandations touchant l'application et l'utilisation ultime des produits Sika sont communiqués de bonne foi, sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika, et concernent les produits entreposés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, dans le délai d'utilisation prescrit. Dans la pratique, les matériaux, les substrats et les conditions réelles du site peuvent varier de manière substantielle. Par conséquent, Sika n'offre aucune garantie quant à la qualité marchande ou à la convenance à un usage particulier et décline toute responsabilité relativement aux renseignements, aux recommandations et aux conseils fournis. Les droits exclusifs des tiers doivent être respectés. Sika accepte toutes les commandes sous réserve de ses modalités de paiement et de livraison courantes. Les utilisateurs doivent toujours consulter la plus récente version de la Fiche technique du produit qu'ils peuvent obtenir sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Sika Canada Inc.
Siège social
601, avenue Delmar
Pointe-Claire, Québec
H9R 4A9

Autres sites
Toronto
Edmonton
Vancouver

1-800-933-SIKA
www.sika.ca

Une compagnie certifiée ISO 9001
Pointe-Claire : OME certifié ISO 14001



Réducteurs d'eau de grande portée
Sika® ViscoCrete® 6100

Sika® ViscoCrete®-2100 (V2)

Adjuvant réducteur d'eau de grande portée

Description	Le Sika® ViscoCrete®-2100 est un adjuvant réducteur d'eau et un superplastifiant de grande qualité, utilisant la technologie du polymère polycarboxylate des ViscoCrete® Sika.
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ En préfabrication ou en béton prêt à l'emploi, Le Sika® ViscoCrete®-2100 peut-être ajouté à l'usine pour procurer une grande plasticité et une fluidité qui se conservera jusqu'à 90 minutes. Son temps de prise contrôlé, fait de Sika® ViscoCrete® 2100 un adjuvant idéal pour des applications horizontales ou verticales. ■ Le Sika® ViscoCrete® -2100 est idéal pour la production de béton autoplaçant (BAP).
Avantages	<p>Réduction d'eau : Le Sika® ViscoCrete®-2100 peut s'utiliser à dosage plus faible pour obtenir une réduction d'eau de 10 % à 15 % et pourra atteindre une réduction d'eau de 45 % à dosage plus élevé. Le Sika® ViscoCrete®-2100 convient à tous les niveaux de réduction d'eau.</p> <p>Grande plasticité : L'action superplastifiante du Sika® ViscoCrete®-2100 produit un béton fluide, à haut affaissement, qui maintient son ouvrabilité et peut être mis en place avec un minimum de vibration et cela même à des ratios eau/ciment aussi bas que 0,25.</p> <p>Le béton plastifié au Sika® ViscoCrete®-2100 sera d'une grande fluidité tout en conservant sa totale cohésion à l'intérieur du moule, ce qui éliminera les ressues excessifs ou la ségrégation.</p> <p>Durée d'affaissement accrue et prise contrôlée : Sika® ViscoCrete®-2100 a été conçu afin de fournir une durée d'affaissement contrôlable et prévisible pour des périodes allant de 60 à 90 minutes, à temps de prise normal.</p> <p>L'effet de réduction d'eau de grande portée et l'action superplastifiante du Sika® ViscoCrete®-2100 présente les avantages suivants pour le béton durci :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Les résistances ultimes plus élevées permettent des conceptions d'ingénierie flexibles ainsi que des économies structurelles. ■ Un ratio eau/ciment réduit produira un béton plus durable, plus dense à perméabilité réduite. ■ Le plastifiant de haute efficacité réduit les défauts de surface des éléments de béton et améliore son apparence. <p>Il a été formulé pour fournir une réduction d'eau maximale et une durée d'affaissement prolongée à faibles dosages.</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Agréé par le Ministère des Transports de l'Ontario (MTO). ■ Agréé par le Ministère des Transports du Québec (MTQ).
Normes	<ul style="list-style-type: none"> ■ ASTM C494 Types A et F ■ AASHTO M-194 Type A et F
Caractéristiques	
Conditionnement	Fût de 205 L (54 gal US) GRV de 1040 L (275 gal US) En vrac
Couleur et aspect	Liquide bleu clair
Conservation et entreposage	1 an lorsqu'entreposé dans un endroit sec, à des températures se situant entre 10 - 27 °C (50 - 80 °F). Entreposer à des températures au-dessus de 2 °C (35 °F). En cas de gel, dégeler et agiter jusqu'à ce que le produit retrouve son état initial.
Propriétés	
Densité relative	Environ 1,08



Mode d'emploi

Dosage

Les dosages varieront selon les matériaux utilisés, les conditions ambiantes et les besoins spécifiques de chaque projet. Sika recommande un dosage de 130 - 390 mL/100 kg de matériel cimentaire pour une application de béton conventionnelle. Si un affaissement élevé ou un béton auto-plaçant est nécessaire, le dosage recommandé sera de 390 - 780 mL/100 kg de produit cimentaire.

Des dosages autres que ceux recommandés ici peuvent être nécessaires lorsque l'utilisation de matériaux spécifiques tels que la microsilice est requise, lorsque l'on rencontre des conditions ambiantes extrêmes ou lorsque des conditions de projet nécessitent une attention particulière. Contacter votre représentant technique des ventes Sika Canada pour plus d'informations.

Mûrissement

Se référer aux recommandations de l'ACI concernant le mûrissement et afin d'obtenir une qualité optimale du béton.

Malaxage

Pour obtenir de meilleurs résultats, ajouter le Sika® ViscoCrete®-2100 au malaxeur, à la fin du cycle de gâchage. Le Sika® ViscoCrete®-2100 peut être également incorporé comme tout autre matériau faisant partie intégrale du mélange, ou ajouté au béton fraîchement malaxé dans le camion-malaxeur, à la centrale ou au chantier. Afin d'obtenir l'effet plastifiant maximal, il est recommandé de mélanger les matériaux pendant 60 à 80 tours dans le malaxeur de la centrale ou dans celui du camion.

Associé à d'autres adjuvants: Le Sika® ViscoCrete®-2100 est un adjuvant de haute efficacité pouvant être utilisé individuellement ou en association avec d'autres adjuvants du système Sika. Utilisé en combinaison avec certain réducteur d'eau Sikament®, il est possible que les propriétés plastifiantes du béton frais soient affectées. Contacter votre représentant technique des ventes Sika Canada pour de plus amples informations.

Associé à la microsilice: Le Sika® ViscoCrete®-2100 est particulièrement bien adapté pour l'utilisation avec la microsilice étant donné sa capacité de réducteur d'eau.

Remarque : Ne pas incorporer Sika® ViscoCrete®-2110 directement dans les matériaux cimentaires secs.

Nettoyage

Porter les équipements de protection individuelle appropriés (lunettes/gants/vêtements résistants aux produits chimiques). En évitant tout contact direct, retirer tout déversement ou excédent de produit et le placer dans un contenant hermétique. Éliminer en conformité des lois environnementales applicables.

Santé et sécurité

Pour plus de renseignements et conseils relatifs à la manipulation, l'entreposage et l'élimination des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ la plus récente du produit contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données portant sur la sécurité.

GARDER HORS DE LA PORTÉE DES ENFANTS
POUR USAGE INDUSTRIEL SEULEMENT

Les renseignements et, notamment, les recommandations touchant l'application et l'utilisation ultime des produits Sika sont communiqués de bonne foi, sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika, et concernent les produits entreposés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, dans le délai d'utilisation prescrit. Dans la pratique, les matériaux, les substrats et les conditions réelles du site peuvent varier de manière substantielle. Par conséquent, Sika n'offre aucune garantie quant à la qualité marchande ou à la convenance à un usage particulier et décline toute responsabilité relativement aux renseignements, aux recommandations et aux conseils fournis. Les droits exclusifs des tiers doivent être respectés. Sika accepte toutes les commandes sous réserve de ses modalités de paiement et de livraison courantes. Les utilisateurs doivent toujours consulter la plus récente version de la Fiche technique du produit qu'ils peuvent obtenir sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Sika Canada Inc.

Siège social
501, avenue Delmar
Pointe-Claire, Québec
H9R 4A9

Autres sites
Toronto & Cambridge
Edmonton
Vancouver

1-800-933-SIKA
www.sika.ca

Certifié ISO 9001 (CERT-0102780)
Certifié ISO 14001 (CERT-0102791)



Réducteurs d'eau de grande portée
Sika® ViscoCrete®-2100



EUCON 37 (E3)

RÉDUCTEUR D'EAU À HAUT DEGRÉ – SUPERPLASTIFIANT

DESCRIPTION

EUCON 37 est un adjuvant à haut degré de réduction d'eau. Il peut être ajouté au béton sur le chantier ou à l'usine de béton prémélangé. Le béton traité avec EUCON 37 conserve sa consistance plastique pendant 30 à 60 minutes après le gâchage en fonction de l'affaissement initial, du dosage et de la température ambiante. Il ne contient pas d'ions de chlorure; par conséquent, il est recommandé pour le béton précontraint. De plus, il est compatible avec les agents entraîneurs d'air, les agents imperméabilisants, le chlorure de calcium et de nombreux autres adjuvants. Toutefois, chaque produit doit être ajouté au béton séparément.

DOMAINES D'APPLICATION

- Béton à haute performance
- Béton prémélangé d'usage général
- Béton fortement armé
- Dalles et béton de masse
- Béton au contenu minimum en eau
- Béton avec un faible rapport eau/liant
- Béton fluide à affaissement élevé

CARACTÉRISTIQUES/AVANTAGES

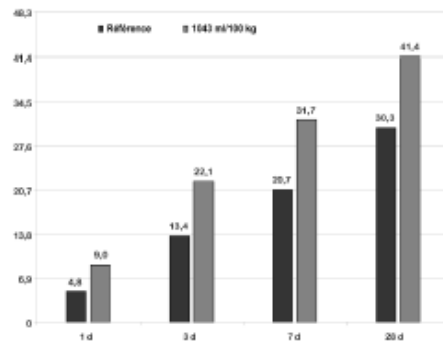
- Produit un contenu en eau faible et un béton avec un faible rapport eau/liant, ce qui génère une résistance plus élevée
- Produit un béton fluide ayant une résistance supérieure à la normale
- Aide à la mise en place du béton et réduit les coûts de la main-d'oeuvre
- Lorsqu'utilisé dans des ouvrages préfabriqués avec du ciment de type GU, le produit générera des résistances à court terme élevées

DONNÉES TECHNIQUES

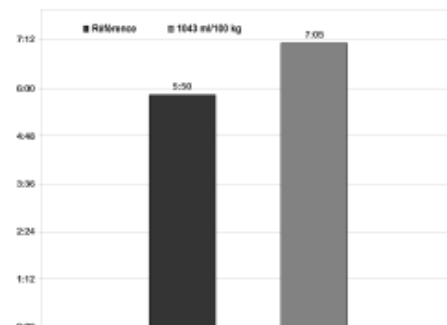
Données relatives à la performance

Les résultats d'essai suivants ont été obtenus en utilisant les exigences typiques de formulation de la norme ASTM C 494, 307 kg/m³ (517 lb/vg³) de liant et une teneur en air similaire ($\pm 0,5\%$). Ces résultats ont été obtenus en laboratoire avec des matériaux et des formulations qui satisfont aux exigences de la norme ASTM C 494. Des changements de matériaux et de formulations peuvent affecter l'efficacité des dosages d'EUCON 37.

Résistance à la compression d'Eucon 37 (MPa)



Temps de prise d'Eucon 37 (h:min)



EMBALLAGE

EUCON 37 est offert en vrac, en contenants de 1000 litres, en barils de 205 litres et en seaux de 20 litres.

DURÉE DE CONSERVATION

Deux ans dans son contenant d'origine non ouvert.

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

- Entièrement conforme aux exigences de la norme ASTM C 494, adjuvants de type A et F.
- Entièrement conforme aux exigences de la norme AASHTO M 194.
- EUCON 37 est approuvé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) et celui de l'Ontario (MTO).

MODE D'EMPLOI

EUCON 37 peut être ajouté à l'eau de gâchage initiale ou directement sur le béton fraîchement dosé, puis mélangé pendant approximativement 5 minutes ou 70 tours. Toutefois, les meilleurs résultats ont été observés lorsqu'il est ajouté directement sur le béton fraîchement dosé. Le produit ne doit pas entrer en contact avec du liant sec ou d'autres adjuvants avant que ces derniers ne soient bien mélangés à la gâchée de béton.

EUCON 37 est typiquement utilisé à des dosages de 400 à 1170 ml par 100 kg de liant. D'autres dosages sont acceptables si des essais préalables sont réalisés et que des confirmations sont obtenues quant à la performance désirée avec les matériaux précis qui seront utilisés.

Pour toutes les applications de béton, y compris le béton autoplaçant (BAP), le dosage d'EUCON 37 variera en fonction de la formulation, des matériaux locaux et des besoins particuliers du producteur de béton. Des formulations d'essai devraient être effectuées afin de vérifier la performance à l'état plastique et durci avec des matériaux locaux. Si la granulométrie des matériaux n'est pas optimale pour un BAP, un modificateur de viscosité pourrait être utilisé pour améliorer la qualité du mélange. Veuillez contacter votre représentant Euclid afin d'obtenir des recommandations relatives aux formulations d'essai et aux dosages.

EUCON 37 est compatible avec la plupart des adjuvants, y compris les agents entraîneurs d'air, les accélérateurs, la plupart des réducteurs d'eau, les retardateurs, les réducteurs de retrait, les inhibiteurs de corrosion, les modificateurs de viscosité et la silice micronisée; toutefois, chaque matériau devrait être ajouté au béton séparément.

Figure 1. Dosage recommandé d'Eucon 37 pour l'obtention d'un béton fluide (180 à 230 mm [7 à 9 po] d'affaissement)

Affaissement initial, mm (po)	Plage de dosage d'Eucon 37, ml/100 kg
100 (4)	520 à 650
75 (3)	650 à 780
65 (2 1/2)	780 à 910
50 (2)	910 à 1040
40 (1 1/2)	1040 à 1170

Mise en place

Le béton traité avec EUCON 37 doit être mis en place selon la même technique utilisée pour le béton classique.

Coffrages

Les coffrages pour murs ou sections étroites doivent être étanches, résistants et avoir de bons dispositifs de contreventement. Pendant la « période de fluidité », lorsque le béton a un affaissement de 180 à 230 mm (7 à 9 po), celui-ci exercera une pression plus élevée que le béton classique à la base du coffrage. Le coffrage pour dalles est le même que pour le béton classique.

PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- EUCON 37 doit être protégé du gel; toutefois, le gel et le dégel subséquent n'endommagent pas le matériau si ce dernier a été mélangé vigoureusement. Ne pas agiter avec de l'air ou avec une lance à air.
- Le béton doit être protégé du gel jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance minimale de 7 MPa.
- Toujours consulter la fiche de données de sécurité avant l'utilisation.

Révision : 2.15

Fiche technique du produit
Édition 08.2012/v1
DCC Master Format™
Sikament® 300N

Sikament® 300N (300N) Réducteur d'eau de grande portée

Description	Sikament® 300N est un adjuvant pour béton réducteur d'eau de grande portée et superplastifiant, à prise normale.	
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ Le Sikament® 300N est formulé afin de produire des bétonnages plus solides et plus durables. En tant que superplastifiant, le Sikament® 300N peut être ajouté à la quantité d'eau normale afin de produire un béton liquide. ■ Lorsqu'utilisé en tant que réducteur d'eau de grande portée, le Sikament® 300N réduit les exigences en eau jusqu'à 30 %, ce qui permet d'accroître la résistance à la compression du béton quelque soit son âge. Il peut également être utilisé pour obtenir une combinaison de ces caractéristiques. 	
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ■ Contrôle de l'affaissement sur chantier sans ajout d'eau. ■ Résistances initiales et ultérieures plus élevées. ■ Maniabilité améliorée sans perte de résistance. ■ Meilleure cohésion et ségrégation réduite. ■ Résistances supérieures obtenues à moindres frais. ■ Perméabilité inférieure et meilleure durabilité. ■ Facilite la mise en place du béton dans les endroits difficiles d'accès et en présence de forte densité d'acier d'armature. ■ Réduit le retrait et le fluage. ■ Permet d'obtenir de meilleures résistances à la tension. 	
Normes	Conforme à la norme ASTM C494, Type F.	
	Caractéristiques	
	Conditionnement	Fût de 205 L (54 gal US) GRV de 1040 L (275 gal US) En vrac
	Couleur et aspect	Liquide brun foncé
	Conservation et entreposage	1 an lorsqu'entreposé dans un endroit sec, à des températures se situant entre 5 - 27 °C (40 - 80 °F). Entreposer à des températures de plus de 5 °C (40 °F). En cas de gel, dégeler et agiter jusqu'à ce que le produit retrouve son état initial. Protéger des rayons directs du soleil.
	Propriétés	
	Densité relative	Environ 1,2
Mode d'emploi		
Dosage	Le Sikament® 300N est normalement ajouté à raison de 350 - 1000 mL/100 kg de matériau cimentaire. Des essais de performance sont nécessaires pour déterminer le dosage optimal..	
Malaxage	Le Sikament® 300N doit être ajouté au béton séparément, de préférence après que les autres adjuvants aient été incorporés au mélange.	
Nettoyage	Porter les équipements de protection individuelle appropriés (lunettes/gants/vêtements résistants aux produits chimiques). En évitant tout contact direct, retirer tout déversement ou excédent de produit et le placer dans un contenant hermétique. Éliminer en conformité des lois environnementales applicables.	
Santé et sécurité	Pour plus de renseignements et conseils relatifs à la manipulation, l'entreposage et l'élimination des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter les fiches signalétiques les plus récentes du produit contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données portant sur la sécurité.	

GARDER HORS DE LA PORTÉE DES ENFANTS
POUR USAGE INDUSTRIEL SEULEMENT

Les renseignements et, notamment, les recommandations touchant l'application et l'utilisation ultime des produits Sika sont communiqués de bonne foi, sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika, et concernent les produits entreposés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, dans le délai d'utilisation prescrit. Dans la pratique, les matériaux, les substrats et les conditions réelles du site peuvent varier de manière substantielle. Par conséquent, Sika n'offre aucune garantie quant à la qualité marchande ou à la convenance à un usage particulier et décline toute responsabilité relativement aux renseignements, aux recommandations et aux conseils fournis. Les droits exclusifs des tiers doivent être respectés. Sika accepte toutes les commandes sous réserve de ses modalités de paiement et de livraison courantes. Les utilisateurs doivent toujours consulter la plus récente version de la Fiche technique du produit qu'ils peuvent obtenir sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Sika Canada Inc.
Siège social
601, avenue Delmar
Pointe-Claire, Québec
H9R 4A8

Autres sites
Toronto
Edmonton
Vancouver

1-800-933-SIKA
www.sika.ca

Une compagnie certifiée ISO 9001
Pointe-Claire : OME certifié ISO 14001



Réducteurs d'eau de grande portée
Sikament® 300N

Annexe F : Plan du prototype de banc de parc

