



**Développement d'un modèle de comportement du béton en fonction de la
teneur en résidus de bauxite sous contrainte de compression uni-axiale**

**Par
Yassine Brahami**

**Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade
de Philosophiæ doctor en ingénierie**

Québec, Canada

© Yassine Brahami 2022

RÉSUMÉ

Les problèmes actuels auxquels est confronté le monde moderne tournent principalement autour des effets destructeurs du réchauffement climatique, de la réduction des émissions des gaz à effet de serre et de la gestion des ressources naturelles. Ces dernières décennies, ont connu l'émergence de nouvelles exigences et enjeux énergétiques et environnementaux donnant naissance à de multiples réflexions dans différents secteurs et plus particulièrement dans le secteur de la construction. Dans ce contexte, la réutilisation des déchets industriels pour produire des bétons et mortiers apparaît comme une solution environnementale pour leur élimination ainsi que le développement de bétons écologiques et durables. Un grand nombre d'études précédentes sont synthétisées dans cette thèse. Ces dernières se sont concentrées sur l'ajout de différents types de déchets dans le mélange de béton et de mortier sous forme d'agrégats fins, d'agrégats grossiers ou d'additifs de ciment et ont étudié les propriétés physiques et mécaniques du matériau.

Dans le cadre du travail de cette thèse, l'influence de l'incorporation des résidus de bauxite sur les propriétés physiques et mécaniques du béton a été entreprise à des pourcentage de 5%, 10%, 15% et 20% et avec chaque pourcentage, les résidus de bauxite ont été utilisés à des calibres de 300 μm , 600 μm , 2 mm et sous forme de boue. Ces investigations expérimentales ont mis en évidence que la substitution des résidus de bauxite diminue la maniabilité et la teneur en air du béton frais.

L'étude du comportement mécanique du béton de résidus de bauxite indique que la substitution massique du ciment par 5% et 10% de résidus de bauxite améliore les propriétés mécaniques du béton. Au-delà de 10% de résidus de bauxite la résistance mécanique commence à diminuer. Néanmoins, jusqu'à 20% de résidus de bauxite la résistance mécanique demeure suffisante pour une utilisation de ces types de bétons dans la construction.

Par ailleurs une évaluation de la fiabilité des modèles de prédiction du comportement mécanique a été effectuée pour les bétons développés dans cette étude afin d'apporter les modifications nécessaires pour améliorer leurs performances. En outre la prise en compte de la teneur en résidus de bauxite a été considérée.

Le comportement contrainte-déformation a également été étudié par une série d'essais de compression uniaxiale contrôlée en déplacement.

Trois modèles de contrainte-déformation les plus utilisés dans la littérature : modèle de Popovics, modèle de Collins et le modèle de Hoshikuma sont considérés pour le béton de résidus de bauxite afin de prédire le comportement contrainte-déformation. Les résultats montrent que les 3 modèles représentent le comportement pré-pic, avec une bonne corrélation. En revanche, aucun de ces modèles ne peut représenter correctement la phase post-pic de la courbe contrainte déformation.

Un modèle de prédiction de contrainte-déformation de la phase post-pic basé sur le modèle de Popovics a été développé dans cette étude. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec les mesures expérimentales.

ABSTRACT

The modern world is facing several issues which revolve mainly around the destructive effects of global warming, reducing greenhouse gas emissions and managing natural resources. These last decades have seen the emergence of new energy and environmental requirements and challenges giving rise to multiple reflections in different sectors and more particularly in the construction area. In this context, the reutilization of industrial waste to produce concretes and mortars appears as an environmental solution for their disposal as well as the development of ecological and sustainable concretes. A large number of previous studies are synthesized in this thesis. These have focused on the addition of different types of waste materials into the concrete-mortar mix as fine aggregates, coarse aggregates or cement additives and investigated the physical and mechanical properties of the material.

As part of the work of this dissertation, the influence of the incorporation of bauxite residues on the physical and mechanical properties of concrete was undertaken at percentages of 5%, 10%, 15% and 20% and with each percentage, the bauxite residues were used at diameter of 300 μm , 600 μm , 2 mm and in liquid form. These experimental investigations have shown that the substitution of bauxite residues decreases the workability and the air content of fresh concrete.

The mechanical behaviour of the concrete of bauxite residues' study indicates that the mass substitution of cement by 5% and 10% of bauxite residues improves the mechanical properties of the concrete. Beyond 10% bauxite residue the mechanical strength begins to decrease. Nevertheless, the mechanical strength of up to 20% bauxite residues remains sufficient for using these types of concrete in construction.

In addition, an assessment of the reliability of the mechanical behaviour prediction models was carried out for the concretes developed in this study in order to make the necessary modifications to improve their performance. Moreover, the consideration of the bauxite residue content was taken into account.

A study of the stress-strain behaviour was also made as part of this work. The stress-strain behaviour was studied by a series of displacement-controlled uniaxial compression tests.

Three of the most used stress-strain models in the literature: Popovics model, Collins model and Hoshikuma model are considered for bauxite residue concrete to predict the stress-strain behaviour. The results reveal that the 3 models represent the pre-peak behaviour, with a good correlation. On the other hand, none of these models can correctly represent the post-peak phase of the stress-strain curve.

This study developed a post-peak phase stress-strain prediction model based on the Popovics model. The results obtained demonstrate good agreement with the experimental measurements.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	ii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xvi
DÉDICACE	xviii
REMERCIEMENTS.....	xix
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1. Introduction	1
1.2. Problématique.....	5
1.3. Objectif.....	6
1.4. Originalité.....	7
1.5. Méthodologie	9
1.6. Contenu de la thèse.....	12
1.7. Références.....	14

CHAPITRE 2.....	15
THE EFFECTS OF THE TYPE AND QUANTITY OF RECYCLED MATERIALS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE AND MORTAR: A REVIEW.....	15
2.1. Introduction	16
2.2. Properties of concrete with recycled aggregates	20
2.2.1. Properties of fresh concrete	21
• <i>Workability</i>	21
• <i>Air content</i>	25
2.2.2. Mechanical properties of concrete with recycled aggregates	27
• <i>Compressive strength</i>	27
• <i>Elastic modulus</i>	32
2.3. Mechanical properties of concrete with alkali-activated concrete.....	35
2.3.1. Properties in a fresh state.....	39
• <i>Workability</i>	39
2.3.2. Properties in the hardened state.....	42
• <i>Compressive strength</i>	42
• <i>Elastic modulus</i>	49
2.4. Discussion and conclusions	52
2.5. Reference	56
CHAPITRE 3.....	73
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON À BASE DE RÉSIDUS DE BAUXITE.....	73

3.1.	Introduction	73
3.2.	Propriétés physico-chimiques de résidus de bauxite	76
3.3.	Méthodologie et procédure d'essais	78
3.3.1.	Résidus de bauxite	79
3.3.2.	Ciment.....	80
3.3.3.	Granulats.....	80
3.3.4.	Adjuvent	81
3.3.5.	Composition du mélange.....	81
3.4.	Résultats et discussions.....	85
3.4.1.	Propriétés à l'état frais.....	86
•	<i>Ouvrabilité</i>	86
•	<i>Masse volumique</i>	88
•	<i>Teneur en air</i>	89
3.4.2.	Propriétés du béton à l'état durcis	90
•	<i>Résistance en compression</i>	91
•	<i>Résistance en traction</i>	97
•	<i>Module d'élasticité</i>	100
•	<i>Coefficient de Poisson</i>	105
•	<i>Porosité</i>	106
3.5.	Conclusions	107
3.6.	Références.....	109
CHAPITRE 4.....		112
CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT EN COMPRESSION DU BÉTON DE RÉSIDUS DE BAUXITE.....		112

4.1.	Introduction	112
4.2.	Méthodologie expérimentale	117
4.2.1.	Système de chargement, installation et système de mesure.....	117
4.2.2.	Matériaux et fabrication des éprouvettes	118
4.3.	Résultats	119
4.3.1.	Propriétés du béton	119
4.3.2.	Réponse contrainte déformation.....	120
4.3.3.	Proposition de modèle pour la courbe contrainte déformation	123
4.3.4.	Observations et mode de rupture	125
4.3.5.	Développement de la phase Pré-pic.....	128
4.3.6.	Développement de la phase Post-pic.....	133
4.3.7.	Effet de la teneur en résidus de bauxite sur la réponse post-pic	135
4.3.8.	Proposition d'un modèle post-pic adapté au béton de résidus de bauxite	136
4.4.	Conclusion	141
4.5.	Références.....	143
CHAPITRE 5.....		146
CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES		146
5.1.	Conclusions	146
5.2.	Travaux futurs	149
Annexe A		151
Annexe B		153
Annexe C		155

LISTE DES TABLEAUX

Table 2.1 : Mechanical properties of different types of aggregates used in concrete.	18
Table 2.2 : Fineness of cement and different types of waste replacing cement (m^2/g).....	20
Table 2.3 : Mechanical properties of different types of concrete	35
Table 2.4 : Chemical composition of cement as well as different types of industrial residues used in the manufacture of geopolymer concrete.....	37
Tableau 3.1 : Composition chimique de résidus de bauxites selon le procédé de fabrication de l'aluminium dont il est issu et comparer au ciment portland.....	78
Tableau 3.2 : Formulation de béton.	82
Tableau 3.3 : Résistance à la compression moyenne mesurée expérimentalement et prédite par la norme fib model code for concrete structures 2010.	96
Tableau 3.4 : Résistance à la traction moyenne mesurée expérimentalement et prédite par l'équation 3.....	100
Tableau 3.5 : Modules élastiques moyens déterminés expérimentalement et prédits par l'équation 5.....	103
Tableau 4.1 : Formulation de béton.	119
Tableau 4.2 : Résultats d'essais à l'état frais.	120
Tableau 4.3 : Résultats des courbes contrainte déformation.	124
Tableau 4.4 : Comparaison entre la valeur du paramètre n obtenue à partir des données expérimentales à celles prescrites par les modèles de Popovics et Popovics modifié.....	131

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Site de disposition de résidus de bauxite situé tout près de l'usine Vaudreuil (Radio-Canada, 2017).....	2
Figure 1.2 : Aléas induits par l'entreposage des résidus de bauxite (Costis, 2021) .	4
Figure 1.3 : Organigramme de la méthodologie	12
Figure 2.1 : Variation in workability as a function of replacement ratio.....	24
Figure 2.2 : Variation in workability as a function of replacement ratio.....	24
Figure 2.3 : Variation of air content as a function of replacement ratio	26
Figure 2.4 : Variation in 7-days compressive strength as a function of replacement ratio.	31
Figure 2.5 : Variation in 28-days compressive strength as a function of replacement ratio	32
Figure 2.6 : Effect of $Na_2SiO_3/NaOH$ ratio on the slump of GPC (Nath et al., 2014).	40
Figure 2.7 : Variation of compressive strength as a function of time (Fang et al., 2018 ; Musaddiq Laskar et al., 2017)	45
Figure 2.8 : Variation of compressive strength of Portland cement concrete, with blast furnace slag (GGBS) and BR, as a function of time and for different RB: GGBS ratios (Sas et al., 2019).....	48
Figure 2.9 : Modulus of elasticity as a function of curing time of GPC after 7 days at a curing temperature of 80 °C (Wang et al., 2020).....	51
Figure 2.10 : Modulus of elasticity as a function of curing temperature after 7 days with a curing time of 24 h (Wang et al., 2020)	52

Figure 3.1 : Résidus de bauxite utilisés.....	79
Figure 3.2 : Analyse par tamisage des résidus de bauxite.....	80
Figure 3.3 : Analyse granulométrique (CSA A23,2-2A 2019).....	81
Figure 3.4 : Montage expérimental du test de compression uniaxiale.....	84
Figure 3.5 : Montage expérimental du test de traction par essai brésilien.	85
Figure 3.6 : Effets des résidus de bauxite sur l'affaissement des mélanges.	88
Figure 3.7 : Effets des résidus de bauxite sur la masse volumique des mélanges.	89
Figure 3.8 : Effets des résidus de bauxite sur la teneur en air des mélanges.	90
Figure 3.9 : Résistance à la compression uniaxiale mesurée sur cylindre, pour différentes durées de cure et pour une taille maximale des particules sèches de résidus de bauxite de : a) 300 μm , b) 600 μm , c) 2 mm et d) sous forme brute liquide.....	92
Figure 3.10 : Photo d'une éprouvette typique après la rupture par l'essai de compression pour des teneurs de : a) 5%, b) 10%, c) 15% et d) 20%.	93
Figure 3.11 : Taux de murissement du béton en fonction du temps.....	94
Figure 3.12 : Valeur du paramètre s en fonction de la teneur en résidus de bauxite à 7 jours.	97
Figure 3.13 : Résistance en traction à 28 jours (RB < 300 μm).....	98
Figure 3.14 : Photo d'une éprouvette typique après la rupture par l'essai brésilien pour des bétons de résidus de bauxite de 300 μm à différentes teneurs : a) 5%, b) 10%, c) 15% et d) 20%.	99

Figure 3.15 : Module d'élasticité mesuré sur cylindre à différents temps de cure pour une taille maximale de particules de résidu de bauxite sèche de : a) 300 μm , b) 600 μm , c) 2 mm et d) pour du résidu de bauxite liquide.	102
Figure 3.16 : Module d'élasticité en fonction de la résistance en compression.	105
Figure 3.17 : Coefficient de Poisson à 28 jours (RB < 300 μm).	106
Figure 3.18 : Porosité du béton de résidus de bauxite.	107
Figure 4.1 : Réponse contrainte-déformation typique du béton de ciment Portland sous compression uniaxiale.	113
Figure 4.2 : Comportement du béton en compression selon différentes lois.	116
Figure 4.3 : Visuels du tests et échantillons.	118
Figure 4.4 : Courbes contrainte-déformation pilotées en chargement et en déplacement pour différentes teneurs en résidus de bauxite : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.	122
Figure 4.5 : Courbes contrainte-déformation chargée en déplacement pour des teneurs de résidus de bauxite de : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.	126
Figure 4.6 : Courbes contrainte-déformation normalisée.	127
Figure 4.7 : Courbes contrainte-déformation normalisée de la partie pré-pic pour différentes teneurs en résidus de bauxite : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.	129
Figure 4.8 : Courbes contrainte déformation de la phase post-pic des bétons de résidus de bauxite mesurée expérimentalement et comparaison aux modèles existants : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.	134

Figure 4.9 : Énergie de rupture moyenne déterminée en fonction de la quantité de résidus de bauxite.....	136
Figure 4.10 : Pente post-pic moyenne en fonction de la teneur en résidus de bauxite.	138
Figure 4.11 : Pente post-pic en fonction du paramètre k.	139
Figure 4.12 : Validation du modèle proposé.....	141

LISTE DES ABRÉVIATIONS

A	Facteur de résistance résiduelle
ACI	Institut américain du béton (<i>American Concrete Institute</i>)
Al	Aluminium
ASR	Réaction alcaline de la silice (<i>Alkali Silica Reaction</i>)
ASTM	Société américaine d'essais et de matériaux (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
C–A–S–H	Aluminosilicate de calcium hydrate (<i>Calcium aluminosilicate hydrate</i>)
CRC	Crumb Rubber Concrete
CRIB	Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
CSA	Canadian Standards Association
C–S–H	Silicate de calcium hydrate (<i>Calcium silicate hydrate</i>)
d	Diamètre de l'échantillon (mm)
E'	Pente post-pic moyenne
E _c	Module d'élasticité sécant (<i>Secant elasticity modulus</i>)
E/C	Rapport Eau/ciment
FA	Cendres volantes (<i>Fly ash</i>)
FS	Fumée de silice (<i>Silica fume</i>)
GGBFS	Granulas de laitier de haut fourneau (<i>Blast furnace slag ground granules</i>)
GGBS	laitier de haut fourneau (<i>Blast furnace slag</i>)
GPC	Béton géopolymère (<i>Geopolymer concrete</i>)
GUL	Ciment Portland-calcaire à usage général
l	Longueur de l'échantillon (mm)
MTS	Machine d'essai Criterion Model 64
n	Paramètre d'ajustement de courbe
Na	Sodium
N–A–S–H	Aluminosilicate de sodium hydraté (<i>Sodium aluminosilicate hydrate</i>)
OPC	ciment ordinaire Portland (<i>Ordinary cement Portland</i>)

P	Charge maximale appliquée (N)
pH	<i>Potentiel hydrogène</i>
RB	Résidus de bauxite
RCA	Granulat grossier recyclé (<i>Recycled coarse aggregate</i>)
RMSE	Erreur quadratique moyenne
SCC	Béton autoplaçant (<i>Self-compacting concrete</i>)
SCRC	Béton caoutchouté autoplaçant (<i>Self-compacting rubberized concrete</i>)
SH	Sodium hydroxide
SLSJ	Saguenay-Lac-Saint-Jean
SP	Naphtalène
SS	Sodium silicate
f_t	Résistance en traction (MPa)
t	Âge de béton
s	Coefficient qui dépend de la classe de la résistance du ciment
W:C	Rapport Eau/ciment (<i>Water: Cement ratio</i>)
w:s	Rapport eau/solide (<i>Water: solid ratio</i>).

DÉDICACE

*À mon père, ma mère, mes deux frères et ma sœur,
Merci pour votre soutien infailible.*

REMERCIEMENTS

J'offre premièrement mes plus sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Ali Saeidi qui m'a supervisé tout au long de mes travaux. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie, car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de ce projet et a toujours veillé à ce que tout soit mis en œuvre pour que ma thèse se déroule dans de bonnes conditions. Merci infiniment pour vos multiples conseils.

Dans un même ordre d'idée, je tiens à remercier mes codirecteurs, Professeur Mathieu Fiset et la professeur Kadiata Ba, pour leur support et leur contribution inestimable à l'avancement de ce projet. Nos échanges m'ont permis d'apprendre énormément et d'élever cette thèse à un niveau supérieur. « J'apprécie vraiment, merci beaucoup »

Je remercie les membres du Comité d'évaluation pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail. Mes vifs remerciements vont aussi au technicien David Noel pour son support technique de même que pour tous les outils fournis durant la réalisation de ce projet. Je tiens également à remercier tout spécialement les professeurs du groupe R2Eau, ainsi que tous les étudiants du groupe. J'ai retiré énormément de cette enrichissante expérience et j'espère avoir la chance de travailler avec vous de nouveau dans un avenir prochain.

À titre plus personnel, je remercie ma chère épouse pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme contagieux à l'égard de mes travaux comme dans la vie en général. Mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Vous m'avez vu grandir au fil de toutes ces années. Vous avez su me soutenir et m'encourager durant toutes les épreuves que j'ai eu à traverser. Vous m'avez toujours soutenu, encouragé et aidé. Vous avez su me donner toutes les chances pour réussir dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Une reconnaissance particulière aux membres de ma famille, mes deux frères et ma sœur de même que leurs adorables enfants, qui en tout temps m'ont apporté soutien et encouragement. Je te remercie infiniment, cher père, qui a contribué directement à la correction de certains volets de cette thèse et d'avoir été toujours à mes côtés. Mes remerciements s'adressent particulièrement à mon oncle Fethi Meghnefi et sa famille qui m'ont toujours soutenu. Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études que ça soit dans le groupe de recherche ou en dehors, ce fut une très belle expérience.

Je tiens également à remercier tout spécialement les professeurs Daniel Marceau et Guy Simard pour m'avoir accueilli au laboratoire CURAL ainsi que pour leurs collaborations et également pour leurs financements des résidus de bauxite.

Je voudrais également exprimer ma gratitude aux personnels de laboratoire CIGELE et plus particulièrement au Professeur Issouf Fofana. Il est également important de souligner l'appui apporté par les supports financiers CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada) ainsi que le CRIB (Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton). Je tiens également à remercier l'Université du Québec à Chicoutimi, ainsi que sa Fondation.

Pour finir, je remercie toutes les personnes intéressées par mon travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans cette thèse des explications utiles à leurs propres travaux.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1. Introduction

Les résidus de bauxite, communément appelé « boues rouges », est un déchet industriel généré lors de la production d'alumine. Sa composition chimique varie fortement selon l'origine de la bauxite et sa teneur en aluminium. Sa composition est aussi tributaire du processus industriel utilisé pour le traitement de la boue (pour la neutralisation du pH). Les résidus de bauxite se compose principalement de fer (sous forme d'hématite), qui lui donne sa couleur rouge, d'aluminium et de silicium. Il contient aussi, mais en plus petite quantité, du titane, du calcium et du sodium, ainsi que de la soude caustique, composante servant à extraire l'alumine de la bauxite par le procédé Bayer. Le stockage du résidus de bauxite est considéré comme un sérieux problème environnemental (Figure 1.1), notamment en raison de la nature caustique du matériau (Sanz, 2013). Cependant, en vertu de la réglementation québécoise sur les matières dangereuses, le résidus de bauxite n'est pas considéré comme une matière toxique (Blais, 2016).



Figure 1.1 : Site de disposition de résidus de bauxite situé tout près de l'usine Vaudreuil (Radio-Canada, 2017).

La production de résidus de bauxite est estimée entre 1,5 et 2,5 tonnes par tonne d'aluminium, selon la source et l'efficacité de la procédure d'extraction (Almutairi et al., 2021 ; Hu et al., 2019). La plupart de ces résidus sont soit déversés sur les terres, soit rejetés dans l'océan après avoir été neutralisés (Mansi et al., 2022 ; Samal et al., 2013). Du fait de sa grande alcalinité et de sa capacité d'échange cationique, le stockage des résidus de bauxite nécessite une grande surface d'entreposage et présente un risque majeur pour le sol, l'environnement et l'eau. Le lessivage des substances toxiques des résidus de bauxite peut contaminer le sol et les eaux souterraines (Figure 1.2) (Costis, 2021). Par conséquent, pour une plus grande sécurité l'environnementale, l'élimination ainsi que l'exploitation complète de

ces déchets deviennent une des préoccupations majeures des alumineries, La réutilisation de ces déchets comme ajouts dans le béton peut aider à réduire l'utilisation du ciment et par là consommation massive des matériaux utilisés dans la fabrication du ciment.

Selon les conclusions et recommandations exposées par le Comité international pour l'étude de la bauxite, de l'alumine et de l'aluminium (ICSOBA, 2011) dans le cadre de son séminaire ICSOBA-2011 à Goa (Inde), chaque raffinerie fonctionne dans un contexte unique relativement aux risques, aux besoins et aux opportunités locales. L'objectif de l'industrie de l'aluminium est néanmoins dirigé vers une production dite zéro déchet. Pour ce faire, il est indispensable de développer des méthodes permettant de valoriser les résidus de bauxite comme matière première dans un grand nombre d'aires d'applications afin d'en prévenir l'entreposage et les conséquences écologiques potentielles.

L'une des voies de valorisation potentielle des résidus de bauxite réside en son utilisation comme ajout cimentaire dans les mélanges de béton. En plus de valoriser les résidus de bauxite, cette approche permet de substituer le ciment Portland, typiquement lié à une production de CO_2 en quantité importante, par un résidu industriel considéré comme un déchet.

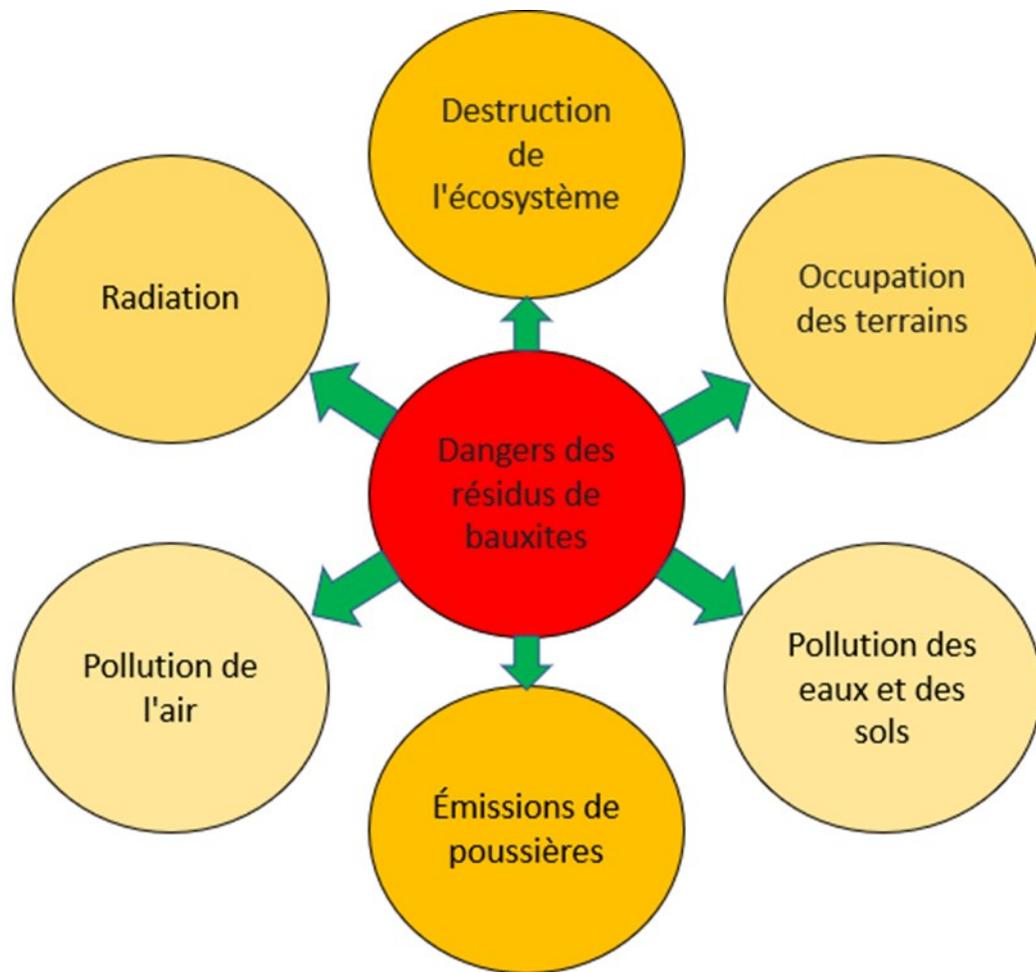


Figure 1.2 : Aléas induits par l'entreposage des résidus de bauxite (Costis, 2021).

Afin d'assurer l'utilisation des résidus de bauxite dans la formulation de béton et de garantir leur utilisation au niveau de l'industrie de construction, il est nécessaire de caractériser la formulation au moyen d'études en laboratoire. Entre autres, il est fondamental de connaître la relation mécanique contrainte déformation pour la conception et l'analyse des éléments structuraux. Il apparaît essentiel d'étudier l'effet des différents paramètres affectant le comportement du béton de résidus de bauxite et les modes de rupture, dont principalement la teneur en résidus de bauxite pouvant être utilisée dans un mélange typique de béton de ciment Portland.

Cette recherche vise à utiliser les meilleurs attributs des modèles antérieurs afin de proposer un nouveau modèle de comportement contrainte-déformation pour le béton de résidus de bauxite sollicité en compression. Ainsi, ce comportement, dont dépendent par exemple la rigidité et la ductilité structurale, est un aspect important qui doit être pris en compte dans la conception des éléments structuraux en béton.

1.2. Problématique

Le recyclage vise à limiter la consommation de matières premières vierges en proposant aux entreprises des matières premières secondaires de qualité irréprochable, incluant l'aspect écologique et sanitaire. Également, cela permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre causés par la fabrication du ciment. Dans ce contexte, le présent travail s'intéresse à l'étude d'un béton à base de résidus de bauxite, qui se veut écologique et avec des comportements mécaniques répondant à l'ingénierie de génie civil.

À ce propos, la qualité du béton de résidus de bauxite est jugée par les différentes propriétés mécaniques à l'état frais (la maniabilité, la teneur en air et la masse volumique), et à l'état durcis (résistance en compression, résistance en traction, le module d'élasticité et le coefficient de poisson) que présentent ces dernières. Ces propriétés sont influencées par le procédé de fabrication et les matières premières.

Il ressort aussi de la revue de littérature que la provenance des résidus de bauxite dans la formulation de béton a également une grande influence sur le

comportement de ce dernier (Sanz, 2013). La résistance mécanique change selon l'origine des résidus de bauxite. Dans le cadre de cette étude, la première question est quelles sont les caractéristiques physiques et mécaniques de béton conçu à base des résidus de bauxite du Saguenay-lac-Saint-Jean, sachant qu'il s'agit d'un enjeu régional majeur ?

Dans un second temps et afin d'étudier le comportement mécanique du béton à base de résidus de bauxite, l'une des étapes les plus importantes consiste à établir des modèles de prédiction qui capturent le comportement mécanique réel. La deuxième question scientifique de ce projet est quel est le modèle de prédiction qui présente mieux le comportement en contrainte à la compression et à la déformation de béton conçu à base de résidus de bauxite du Saguenay-lac-Saint-Jean ? Comment peut-on développer un nouveau modèle ou modifier les méthodes existantes afin d'avoir la meilleure prédiction de comportement de contrainte déformation de béton de résidus de bauxite ?

1.3. Objectif

L'objectif principal de ce projet consiste à déterminer le comportement mécanique du béton fabriqué avec l'ajout de résidus de bauxite ainsi que de développer des modèles mathématiques permettant de simuler le comportement en compression uniaxiale du béton.

Afin d'atteindre cet objectif principal, les objectifs spécifiques suivants sont fixés :

1. Développer différentes formulations de béton en fonction de la teneur en résidus de bauxite (0%, 5%, 10%, 15% et 20%) et en fonction de différents calibres de résidus de bauxite (300 μm , 600 μm , 2 mm et sous forme de boue) ;
2. Caractériser le comportement du béton à base de résidus de bauxite afin de déterminer ses propriétés à l'état frais et à l'état durcis en fonction des différents calibres et différents pourcentages ;
3. Évaluer l'effet des paramètres physiques sur la résistance en compression et les paramètres élastiques ;
4. Déterminer l'effet des résidus de bauxite sur le comportement contrainte-déformation sur la phase pré-pic et post-pic ;
5. Développer et valider un modèle contrainte-déformation du béton qui peut bien représenter le comportement global contrainte-déformation en compression uniaxiale du béton conventionnel et le béton de résidus de bauxite avec un bon contrôle des branches ascendantes et descendantes.

1.4. Originalité

L'originalité de ce travail de recherche se résume à travers les points qui suivent :

- a. La récupération des déchets industriels réduit deux impacts très importants : l'impact environnemental résolu par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique par l'utilisation des déchets dans l'industrie ou dans le domaine de construction. L'une des originalités de ce travail est l'élaboration d'une

synthèse générale sur les déchets qui peuvent remplacer les agrégats ou le ciment dans une formulation de béton dans le but d'approfondir les connaissances dans les bétons faits de matériaux recyclés et de déterminer des pistes de recherches innovantes dans ce domaine.

- b. Selon les conclusions et recommandations exposées par le Comité international pour l'étude de la bauxite, de l'alumine et de l'aluminium (ICSOBA, 2011) dans le cadre de son séminaire ICSOBA-2011 à Goa (Inde), chaque raffinerie fonctionne dans un contexte unique, où la composition chimique diffère d'une raffinerie à l'autre. L'une des originalités de cette recherche est la détermination des effets des paramètres physiques, du pourcentage et du calibre des résidus de bauxites issus de la production des alumineries de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ) sur le comportement en compression et en traction ainsi que les paramètres élastiques de ce type de béton. Ce travail permettra de déterminer le pourcentage et le calibre optimal de résidus de bauxite (SLSJ) qui peut être utilisé dans un mélange de béton afin d'avoir les meilleures propriétés physique et mécanique.
- c. Le comportement contrainte-déformation de ce genre de béton est également inconnu, l'autre originalité de ce projet est finalement de développer un modèle mathématique permettant de prédire le comportement contrainte-déformation de la phase pré-pic et post-pic du béton de résidus de bauxite.

1.5. Méthodologie

La méthodologie de ce projet de recherche est présentée à la Figure 1.3. Tout d'abord, une recherche bibliographique détaillée présentée dans le deuxième chapitre de cette thèse permet de mieux comprendre les types de résidus pouvant être utilisés et leurs effets dans les mélanges de béton. Les éléments suivants s'en dégageront :

- Une synthèse générale des différents résidus qui peuvent être utilisés pour remplacer les granulats dans le béton ;
- Les propriétés du béton frais telles que la maniabilité et la teneur en air pour différents types de résidus ;
- Les propriétés mécaniques du béton à base de différents résidus ;
- La classification des résidus en fonction de leur taux et du type de remplacement ;
- Les propriétés du béton à base de résidus utilisés en remplacement du ciment Portland.

Par la suite, différents mélanges de béton de ciment Portland intégrant également différentes quantités de résidus de bauxite ont fait l'objet d'une étude expérimentale réalisée au laboratoire de l'UQAC. Cette étude expérimentale est divisée en plusieurs parties telles que : le séchage des résidus de bauxite, le broyage des résidus de bauxite, le développement des formulations de béton à base de résidus de bauxite, la confection des différentes formulations de béton, et les tests de caractérisation de façon détaillée,

- Les résidus de bauxite ont été séchés à une température de séchage de 110 ± 5 °C dans un four à moufle pendant 48 heures puis broyés à différents calibres (300 μm , 600 μm et 2 mm), puis tamisés. Dans le but de les caractériser, plusieurs paramètres ont été déterminés tel le pH qui est de nature alcaline et la densité des résidus de bauxite.

Une fois les résidus de bauxite séchés, broyés et tamisés, l'étape suivante a consisté à développer différentes formulations de béton à base de résidus de bauxite. Les formulations ont été développées en fonction du pourcentage massique de résidus de bauxite en remplacement du ciment (5%, 10%, 15% et 20%) pour chacun des pourcentages de ciment, les résidus de bauxites ont été utilisés avec différentes tailles (300 μm , 600 μm , 2 mm et sous forme de boue), leurs effets sur les propriétés du béton ont été étudiés pour un total de 17 formules de béton. Le choix du calibre de 300 μm a été fait par rapport à la finesse du ciment, quant aux diamètres de 600 μm et 2 mm, ils ont été sélectionnés en fonction des diamètres de tamis existant au laboratoire. En revanche, les résidus de bauxite liquide ont été utilisés sous leur forme initiale, sans traitement de séchage ou de broyage. La proposition du dosage de résidus de bauxite dans la formulation du béton est basée sur les résultats des essais de la revue de la littérature. Une fois les 17 formulations de béton sélectionnées, la prochaine étape consistait en la préparation des mélanges de béton. Dans ce travail, des tests à l'état frais et à l'état durcis du béton ont été réalisés. À l'état frais, la maniabilité, la teneur en air et la masse volumique ont été déterminées pour les 17 formulations développées dans cette étude. Le but principal de cette caractérisation est de quantifier l'effet du pourcentage et du calibre

des résidus de bauxite dans le béton sur les propriétés à l'état frais. À l'état durci, des essais de compression uniaxiale (CSA A23.2) et de traction indirecte (CSA A23.2) ont été réalisés, à différentes durées de cure. La résistance en compression a été évaluée à des âges de 7 jours et 28 jours pour toutes les formulations de béton. En revanche, seulement les formulations de 300 µm ont été testées à 90 jours et 180 jours. La résistance en traction a été testée à 28 jours pour les formulations de 300 µm. Des comparaisons des résultats selon le temps de durcissement, le pourcentage de résidus de bauxite et le calibre de résidus de bauxite ont été faites pour ces formulations de béton de résidus de bauxite ainsi que le béton témoin. Les différents tests à l'état frais et à l'état durcis ont été réalisés selon les normes CSA A23.1, A23.2 et ASTM volume C.

Une fois les essais de compression réalisés, le module de Young a été déterminé pour chacun des échantillons afin de pouvoir comparer l'élasticité du béton avec chacun des pourcentages de résidus de bauxite.

Après avoir caractérisé le matériau, le comportement pré et post-pic du béton de résidus de bauxite mesuré expérimentalement a permis de développer un modèle prédictif du comportement courbe contrainte-déformation en compression. Cette étape a permis à son tour de considérer l'effet de la teneur en résidus de bauxite sur la courbe contrainte-déformation des mélanges de béton enrichis de résidus de bauxite.

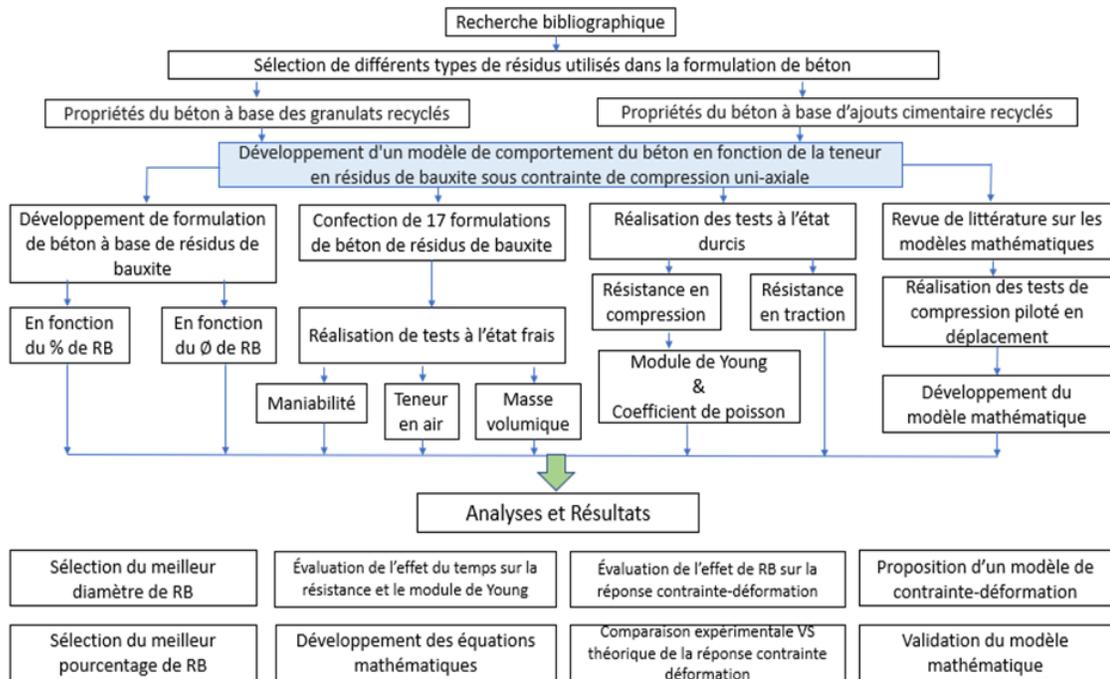


Figure 1.3 : Organigramme de la méthodologie.

1.6. Contenu de la thèse

La thèse est structurée comme suit :

Le chapitre I, porte sur une introduction générale du projet de même que la problématique de cette étude. Par la suite, les objectifs spécifiques et généraux sont définis, l'originalité du projet et la méthodologie du travail sont expliquées.

Le chapitre II, synthétise un état de l'art sur l'ajout de différents types de déchets dans le mélange de béton et de mortier sous forme d'agrégats fins, d'agrégats grossiers ou d'additifs de ciment et présente l'étude des propriétés physiques et mécaniques du matériau amélioré. Aussi, les résultats issus de de la littérature sont discutés.

Le chapitre III, présente le programme expérimental et les résultats de la caractérisation physique et mécanique pour le béton témoin ainsi que le béton de

résidus de bauxite. Ces dernières sont constituées d'un remplacement partiel du ciment par des résidus de bauxite à des pourcentages de 0%, 5%, 10%, 15% et 20% et pour chacun des pourcentages les résidus de bauxite sont utilisés à des calibres de 300 μm , 600 μm , 2 mm et à son état initial sous forme liquide (Boue rouge). Pour les différentes formulations de béton considérées, les résultats de l'étude expérimentale sont présentés et discutés dans cette section. Il s'agit du comportement à l'états frais : la maniabilité, la teneur en air et la masse volumique. A l'état durcis, les propriétés suivantes sont présentées : la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité et le coefficient de poisson.

Le chapitre IV, présente le programme expérimental ayant permis de déterminer le comportement de contrainte déformation en compression uniaxiale du béton conventionnel et du béton de résidus de bauxite pré et post pic, et ce pour différentes teneurs en résidus de bauxite. Les résultats de l'étude expérimentale sont présentés et discutés dans cette section. Par la suite un modèle mathématique est développé et validé en utilisant les données de la littérature pour chacunes des parties pré-pic et post-pic de la courbe contrainte-déformation.

Pour finir, le chapitre V portera sur les conclusions et les recommandations pour des travaux futurs.

1.7. Références

- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>
- Blais, R. (2016). <La-bauxite-et-ses-résidus.pdf>. *centre de recherche sur le développement territoriale*, 22.
- Costis, S. (2021). *Évaluation du comportement des résidus de flottation issus de l'extraction de minéraux de terres rares dans un contexte nordique*. Doctorat en sciences de la terre,
- Hu, Y., Liang, S., Yang, J., & Chen, Y. (2019). Role of Fe species in geopolymer synthesized from alkali-thermal pretreated Fe-rich Bayer red mud. *Construction and Building Materials*, 200, 398-407. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.122>
- ICSOBA. (2011). *The International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium*,. Paper presented at the bauxite residue seminar, India.
- Mansi, A., Sor, N. H., Hilal, N., & Qaidi, S. M. (2022). *The Impact of Nano Clay on Normal and High-Performance Concrete Characteristics: A Review*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Radio-Canada. (2017, 23/08/2017). *Residus-de-bauxite-un-site-deux-visions*. *ICI Saguenay–Lac-Saint-Jean*. Retrieved from 1051967
- Samal, S., Ray, A. K., & Bandopadhyay, A. (2013). Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India — A review. *International Journal of Mineral Processing*, 118, 43-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.11.001>
- Sanz, B. O. (2013). *Caractérisation physico-chimique du résidu de bauxite vénézuélienne: évaluation des options de valorisation dans le domaine environnemental*. (These). Université Lille 1, Lille

CHAPITRE 2

THE EFFECTS OF THE TYPE AND QUANTITY OF RECYCLED MATERIALS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE AND MORTAR: A REVIEW

Résumé

La réutilisation des déchets industriels pour produire du béton et du mortier est une solution environnementale pour leur élimination ainsi que pour le développement d'un béton écologique et durable. Un grand nombre d'études antérieures, résumées dans cet article de synthèse, ont porté sur l'ajout de différents types de déchets dans le mélange de béton et de mortier sous la forme de granulats fins, de granulats grossiers ou d'ajouts de ciment, et ont étudié les propriétés physiques et mécaniques du matériau amélioré. La réutilisation des déchets dans la conception des mélanges de béton et de mortier affecte de manière significative les propriétés fraîches et durcies du matériau. Cette revue de la littérature offre un aperçu général à la communauté du génie civil et industriel sur le béton et le mortier à base de déchets écologiques qui peut servir de base à la construction et aux travaux futurs dans ce domaine.

Abstract

The reuse of industrial wastes to produce concrete and mortar is an environmental solution for their disposal as well as for the development of ecological and sustainable concrete. A large number of previous studies summarized in this review paper focused on adding different types of waste in the concrete and mortar mix in the form of fine aggregates, coarse aggregates or cement additives, and investigated the physical and mechanical properties of the enhanced material. Reusing waste in concrete and mortar mix design significantly affects the material's fresh and hardened properties. This literature review offers a general insight to the

civil and industrial engineering community on ecological waste-based concrete and mortar that can serve as a basis for construction and future work in this field.

Keywords: industrial wastes; concrete; physical properties; mechanical properties; waste-based concrete; recycling

Brahami, Y., Saeidi, A., Fiset, M., & Ba, K. (2022). The Effects of the Type and Quantity of Recycled Materials on Physical and Mechanical Properties of Concrete and Mortar: A Review, – *Sustainability*, 14(22), 14752.

2.1. Introduction

During recent decades, there has been an increase in awareness about environmental and ecological issues, greenhouse gas emissions, and the energy consumption of buildings, which has led to increasing interest in sustainable development. Although natural aggregate resources are not depleting currently, the accumulation of nonbiodegradable waste (such as hardened cement, bottles, polystyrene, used tyres, and glass) is a major source of environmental and economic problems. This accumulation is linked to the population explosion in developing countries with uncontrolled urbanisation, which has led to the production of large amounts of waste (e.g., used tyres, bottles, cans, various containers holding stagnant water, and so on). Sanitary waste is a fertile habitat for insects (e.g., flies and mosquitoes), and it exposes a large number of people to life-threatening diseases such as dengue and malaria. Other wastes generated from industries and factories such as fly ash from the combustion of coal in large industries and coal-fired power plant boilers, silica fumes formed during the production of silicon and ferro-silicon alloys, blast furnace slags, and bauxite residues from the production of steel and aluminium are also environmental threats if not disposed of in a proper

manner. In this context, waste-based concretes represent a new way of recovering waste in construction materials and ensuring environmental protection. Wastes used in concrete can be classified into two categories: recycled aggregates and cement substitute materials.

For wastes that replace natural aggregates, researchers have evaluated the partial or total replacement of fine or large natural aggregates or both by using different types of aggregates (Table 2.1), especially in medium- and low-strength concrete. The durability and mechanical properties of recycled aggregate–concrete is always poorer than control concrete because of the properties of recycled aggregate (Table 2.1) and other aspects, such as the type and content of recycled aggregate, water: cement ratio, mixing procedure, adjuvants, and additives.

Concrete made from glass, polystyrene, and plastic aggregates can easily slide and flow inside different parts of the formwork and generate remarkable consolidation within the targeted formwork owing to their own weight. They do not need external or internal vibration and leave no defects resulting from segregation. To obtain complete compaction, these concretes must be adequately fluid and cohesive. However, concrete made from rubber, brick and demolition aggregates show firm fluidity due to their high absorption (Table 2.1) and rough surfaces. In contrast, the workability of concrete can be improved by mixing fine substances, such as silica fume, limestone powder, blast furnace slag, and fly ash, or by adding an appropriate dosage of viscosity-modifying adjuvants.

Table 2.1 : Mechanical properties of different types of aggregates used in concrete.

Properties Materials	Elastic Modulus	Poisson ratio	Density	Water absorption coefficient
	E [GPa]	ν	ρ [kg/m^3]	(%)
Typical natural aggregates	20-70	0.2-0.45	400-2000	0.35-0.40
demolition aggregates	–	–	1300-1700	3-5
Brick	14-16	0.15-0.18	1800-2100	8-9
Waste glass	60-69	0.18-0.30	2500	0
Plastic (polypropylene)	1.3-5	0.35-0.45	900-1500	0
Polystyrene	3-3.4	0.35-0.45	200-1500	0.30-0.40
Caoutchouc	0.001-0.1	0.5-0.6	970-1250	0.25-0.30

Cement is a major contributor to greenhouse gas emissions (Miller et al., 2021), the cement production process is harmful to the environment as it generates carbon dioxide. In this regard, the use of by-products from other industries as additional cemented materials in concrete with cement is well known for reducing gas emissions from concrete (Malhotra et al., 2002). Substituting cement with fly ash, silica fume, and blast furnace slag leads to a cement-like fineness (Table 2.2), and it has been used in several studies (Bernal et al., 2011; Nasvi et al., 2012; Zhang et al., 2016) to prepare geopolymer concretes (GPCs). Red mud and glass powder have also been used to partially replace cement in concrete (Olivia et al., 2012). Glass functions as a pozzolanic material when finely ground (Table 2.2). The properties of concrete are thus modified and there is decreased consumption of cement, which is the most expensive component of concrete.

Another major component of geopolymers is alkaline activators, which can be hydroxides, silicates, sodium, or potassium carbonates or a mixture of these; these are soluble in water. To obtain a high-performance final product, the precursor and the alkaline activator must be appropriately paired. Some precursors react preferentially or work effectively with a certain type of activator because of the differences in chemical compositions. For example, sodium hydroxide is preferred for the alkaline activation of fly ash. A sodium-in-silicate solution provides better activation for blast furnace slags than other types of alkaline activators.

A geopolymer can achieve strength comparable to ordinary concrete. GPC is a good fire-resistant material (Sas et al., 2019). Some of the advantageous characteristics of GPC include rapid strength, dimensional stability, acid resistance, fire resistance, excellent adhesion to reinforcements and aggregates, and lower cost of materials, which is approximately 10–30% compared to conventional concrete as it uses waste as a raw material, unlike cement concrete, which uses virgin materials (Fang et al., 2018; Ismail Amer, 2020; Xuan et al., 2019). Lan et al. (2016) reported that GPCs experience very little creep and drying shrinkage and exhibit exceptional resistance to sodium sulphate. The application of GPCs in buildings and other structures is limited due to lack of structural design standards and codes (Kumar et al., 2018). More investigations into long-term behaviour and durability are required to enable the commercialisation of GPC.

Table 2.2 : Fineness of cement and different types of waste replacing cement (m^2/g).

Cement	Fly ash	Silica fume	Blast-furnace slag	Red mud	Glass powder
0.3-0.35	0.22-0.4	0.28-0.70	0.25-0.4	0.1-0.3	0.3-0.35

This study comprehensively reviewed various state-of-the-art residues used in the formulation of concrete for recycling the maximum amount of waste, preserving natural resources, and ensuring environment protection. This paper can serve as a reference document and guide for the characterisation of parameters that affect the physical and mechanical properties of waste-based concrete. This paper aims to provide a comprehensive understanding of the parameters affecting the physical and mechanical properties of concrete formulated from waste. First, the effects of waste type and replacement rate on workability and air content of fresh concrete are presented. Next, the mechanical parameters such as compressive strength, modulus of elasticity. Finally, their development, evolution, and advantages and disadvantages are discussed in detail.

2.2. Properties of concrete with recycled aggregates

Comprehensive understanding of the mechanical properties, including the workability of fresh concrete and the strength and stiffness of hardened concrete, of concrete containing industrial waste is essential to study delayed strain. These properties are affected by the rate at which aggregates are replaced by waste or cement additions, types of recycled materials, W:C ratio, and types of admixtures.

2.2.1. Properties of fresh concrete

- ***Workability***

The slump test is used to evaluate the workability of fresh concrete. Typically, a workable mixture is more durable and exhibits better mechanical properties. The workability of a mixture also depends considerably on the properties of its constituents.

Typically, glass aggregates are used to replace fine aggregates in concrete. However, the workability of glass concrete decreases with the increase in the amount of glass (Figure 2.1). Park et al. (2004) determined that slump decreased by 23%, 32%, and 41% compared to conventional concrete when 30%, 50%, and 70%, respectively, glass aggregates were used as sand replacement. This decrease in slump can be attributed to the tendency of cement paste to cling to the surface of the waste glass. Therefore, a lower proportion of cement is available to fluidise the mix. Glass aggregate particles are also typically smoother and more angular than sand, which decreases the fluidity of fresh concrete.

Polystyrene aggregates are used to replace coarse aggregates, and it decreases workability. Tang et al. (2008) showed that replacing coarse aggregates with polystyrene aggregates decreased sagging from 65 to 55 mm (Figure 2.2). However, polystyrene aggregates did not absorb much water owing to their closed cell structures (Benfenier, 1998; cook, 1983; Saradhi Babu et al., 2005). Polystyrene aggregates typically show a uniform distribution in the mortar and concrete matrix,

and the cohesion of fresh mixes of polystyrene concrete appears similar to that of ordinary concrete (Babu et al., 2003).

Using tyre rubber as a substitute for aggregates in a concrete mix also affects its workability and slump. Several studies (Batayneh et al., 2008; Reda Taha et al., 2008; Senouci, 1994; Zaher et al., 1999) have determined that the workability of rubber–concrete mix decreases with increasing rubber content (Figure 2.1 and Figure 2.2). Zaher et al. (1999) and Su et al. (2015) reported that the workability of rubber–concrete decreased with a decrease in the size of the rubber particles due to the increase in the area of the angular size particles. Mechanically crushed rubber aggregates are more rough and provide higher surface area, and thus, they have lower workability values than crushed cryogenic rubber (Zaher et al., 1999). However, some researchers have reported conflicting results on the effect of rubber particle size. Senouci (1994) and Reda Taha et al. (2008) found that the workability of rubber–concrete decreased with increasing particle size due to increased friction between the angles of rubber particles, which also decreased the fluidity of larger-calibre rubber particles (Holmes et al., 2014). Studies have shown that pre-treatment of rubber particles may improve the workability of concrete mixes containing rubber aggregates. For example, soaking the rubber particles in water for 24 h can increase the slump of rubber–concrete mixes. This is because the water adsorbed by the rubber aggregates facilitates relative displacement between the rubber particles and the other components of the concrete mix (Mohammadi et al., 2014). Similar workability improvement can be achieved by treating rubber particles with one of the following aqueous solutions: anhydrous ethanol, acrylic acid or polyethylene glycol.

The molecular structures of these mixtures is similar to that of a polycarboxylate-based water reducer, and their behaviours are similar to those of concrete mixtures with treated rubber aggregates (Zhang et al., 2014). Treating rubber particles with sulphuric acid (H_2SO_4) also improves fresh concrete workability. Such treatment affects the surfaces of rubber particles, which increases workability and forms particles that are more porous, smaller, and rougher (Alawais et al., 2019; Roychand et al., 2020).

Plastic aggregates may also be used to replace sand or gravel in concrete mix. Most studies have determined that increasing the replacement ratio decreases the workability and slump values of fresh concrete (Faraj et al., 2019; Hama et al., 2017; Sadrmomtazi et al., 2016; Yang et al., 2015). Most studies have shown that increasing the percentage of plastic content decreases the sag. Mohammed et al. (2019) replaced sand with recycled plastic aggregates at different percentages (2.5%, 5%, 7.5%, and 10%) relative to the weight of the aggregates and found that the optimum performance for flow diameter was 2.5% content of plastic aggregates. Some studies have shown that the shapes of plane particles can be an important factor in decreasing the flow and that these may thus behave as the retaining material, slowing the sag. This is mainly observed when round and smooth plastic particles are used as a replacement material (Chunchu et al., 2019).

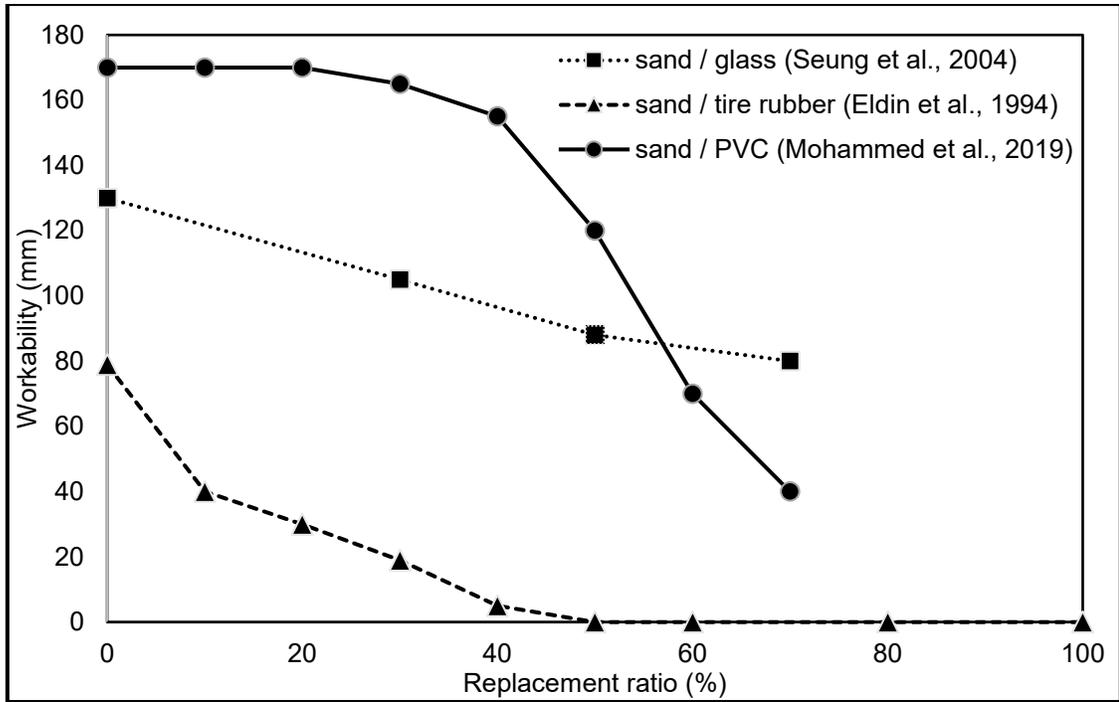


Figure 2.1 : Variation in workability as a function of replacement ratio.

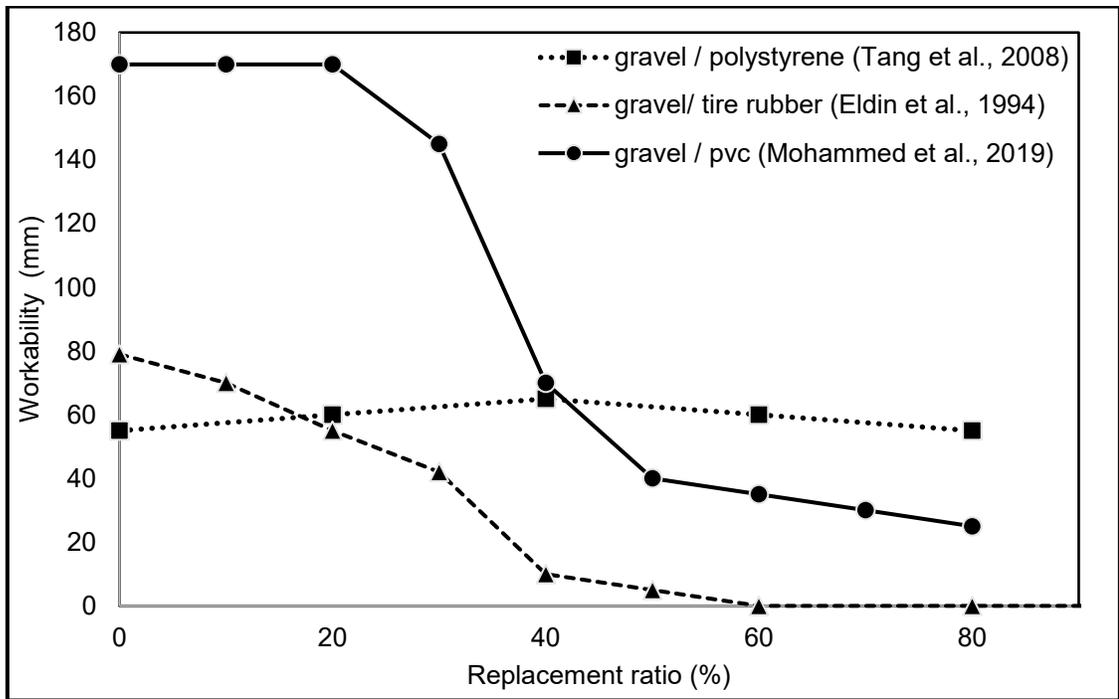


Figure 2.2 : Variation in workability as a function of replacement ratio.

From a workability point of view, all the wastes mentioned in this study negatively influence the workability of concrete. It is preferable to replace sand with glass and PVC, and gravel by polystyrene and rubber tyre.

- ***Air content***

Handling fresh concrete always lets in a certain amount of air, which is called occluded air. For concrete that is not exposed to freezing and thawing, the air content should be between 1% and 4%, while, for concrete exposed to freezing and thawing, the air content varies between 5% and 8% due to the addition of air-entraining additives. In the case of waste concrete, air content is higher than control concrete due to the irregular size and shape of the waste aggregates. For example, concretes containing waste glass as aggregate, with replacement ratio of 30%, 50%, and 70%, show an average of 16.9%, 27%, and 36% increase in air content, respectively, compared to plain concrete (Figure 2.3). This trend of increased air content is attributed to the existence of more waste glass aggregates with larger grain sizes than sand as well as their irregular shapes, which result in a larger relative surface area and thus more air (Park et al., 2004).

The air content of polystyrene aggregate–concrete increases considerably with the increase in polystyrene aggregate content (Figure 2.3), which increases the workability of the concrete (Tang et al., 2008). Spherical air bubbles act as fine aggregates with very low surface friction and high compressibility (Iucolano et al., 2013). However, the high trapped air content increases the presence of voids and decreases the strength of the concrete.

For concrete made with recycled brick aggregates, the amount of entrapped air increases with the increase in the percentage of recycled brick aggregates (Figure 2.3). This is attributed to the increases in water content due to the incorporation of this type of aggregate (Gayarre et al., 2019).

Sadromtazi et al. (2016) studied the air content of concrete with plastic particles as a partial replacement for sand. The air content values of the mixes increased with the addition of recycled plastic aggregates (Figure 2.3). For the reference mix, the air content value was only 4.2%. With the incorporation of 15% plastic particles, this value increased to 5.8%.

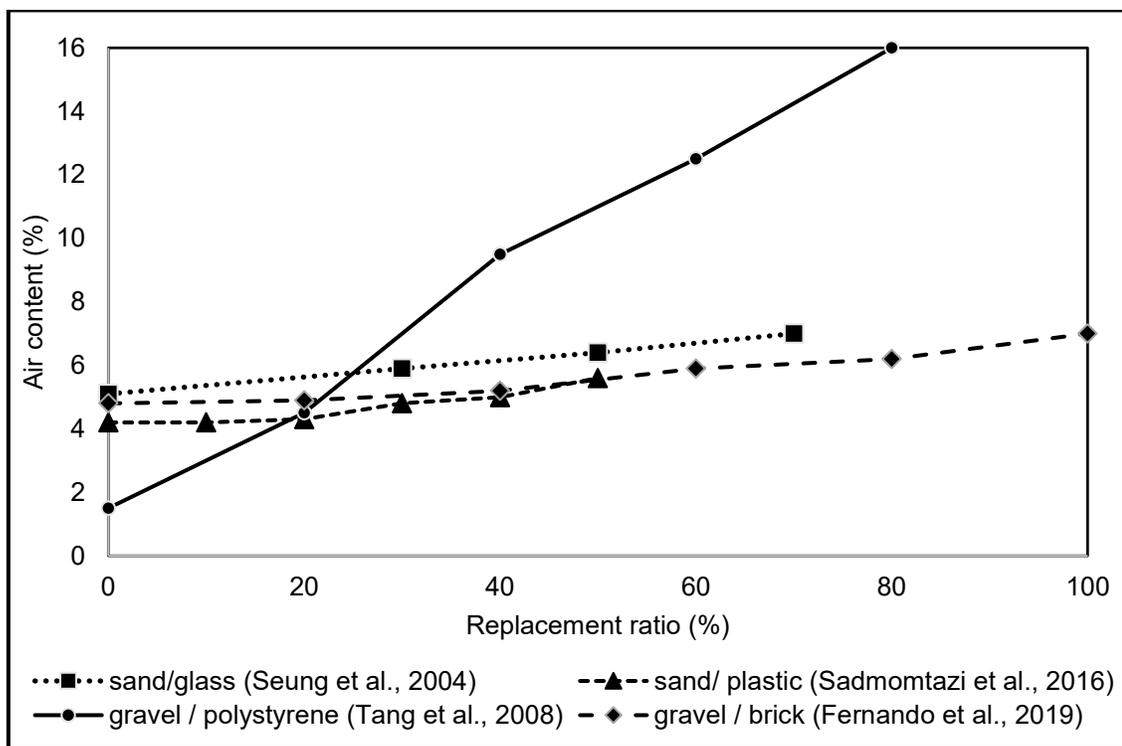


Figure 2.3 : Variation of air content as a function of replacement ratio.

Although the air content increases with the addition of the various wastes, it is still acceptable for glass, plastic, and brick concretes. However, for polystyrene concrete, the addition should not exceed 40%.

2.2.2. Mechanical properties of concrete with recycled aggregates

- ***Compressive strength***

The compressive strength of concrete is an essential property considered by engineers. Different codes require certain conditions of durability that must be satisfied according to the purpose of the concrete mixture. The compressive strength of concrete is largely affected by the stiffness and roughness of the aggregates, which improve the anchorage of the binder (i.e. cement paste for conventional concrete) as well as the matrix density (Miah et al., 2021). Replacing gravel and sand in conventional concrete by another type of aggregate may therefore affect the compressive strength of the new material.

The effect of replacing gravel or sand by recycled aggregates on concrete compressive strength measured after ageing for 7 and 28 days is presented in Figure 2.4 and Figure 2.5, respectively. Replacing gravel or sand aggregates with rubber, polystyrene, plastic, brick aggregates, and demolition aggregates decreases the compressive strength of concrete at both 7 and 28 days. For rubber aggregates, (Abdelmonem et al., 2019; Gesoglu et al., 2015; Raffoul et al., 2016; Reda Taha et al., 2008; Senouci, 1994; Zaher et al., 1999) strength reduction was attributed to (i) the deformability of rubber particles in relation to the cement microstructure, leading to crack initiation in a pattern similar to that of air voids in normal concrete, (ii) the

weak interfacial bonding between the rubber particles of the tires and the cement matrix, and (iii) the possibility of decrease in the density of the concrete matrix, which further depends on the size, density, and hardness of the aggregate particles.

Water-washed rubber pre-treated with NaOH provided slight improvement compared to untreated concrete (4.7% and 3.1%, respectively); rubber particles pre-coated with cement and mortar showed considerable improvements of 15.6% and 40.6%, respectively (Najim et al., 2013). Balaha (2007) reported an improvement of approximately 13% in compressive strength in rubber–concrete containing crumbs of rubber pre-treated with NaOH. Soaking rubber particles in water is the most cost-effective method of pre-treatment. Mohammadi et al. (Mohammadi et al., 2014, 2015) found that soaking rubber aggregates in water for 24 h provides a considerable compressive strength improvement in 28 days, as it helped remove air trapped in the rubber particles, thereby improving the adhesion of the rubber to the cement matrix.

A similar decrease in compressive strength was observed after 7 and 28 days when polystyrene (Faraj et al., 2020; Perry et al., 1991; Saradhi Babu et al., 2005; Tang et al., 2008) or plastic aggregates (Chunchu et al., 2019; Faraj et al., 2019; Hama et al., 2017; Law Yim Wan et al., 2018; Safi et al., 2013) were used to replace natural aggregates in concrete (Figure 2.4 and Figure 2.5) by Faraj et al. (2020) and Iucolano et al. (2013). Faraj et al. (2019) reported 24% reduction in compressive strength by incorporating 40% plastic granules instead of sand at the same water:cement ratio. Sadrmomtazi et al. (2016) reported that the strength of concrete containing 15% by weight of plastic aggregates decreased by 48.3%. Most

researchers have attributed this decrease in strength to the low stiffness and density of the polystyrene and plastic aggregates compared to that of conventional aggregates. When samples are loaded, these aggregates behave as voids within the matrix, leading to crack initiation around the particles and decreasing strength and stiffness (Hama et al., 2017).

Perry et al. (1991) studied the strength of polystyrene aggregate–concrete over a density range of 850–1250 kg/m^3 and found that the mechanical behaviour of polystyrene aggregate–concrete is similar to that of concrete cells, as polystyrene aggregate mainly comprises air. Similarly, Chen et al. (2004) investigated the mechanical properties of polystyrene aggregate–concrete at a constant water: binder ratio (0.37), producing a series of polystyrene aggregate-based samples with compressive strengths of 10–25 MPa over a density range of 800–1800 kg/m^3 . Saradhi Babu et al. (2005) studied the strength and durability of polystyrene aggregate–concrete containing mineral admixtures with concrete densities in the range of 550–2200 kg/m^3 ; the corresponding strength results were in the range 1–21 MPa. The density and strength of polystyrene aggregate–concrete decrease considerably with increase in polystyrene content; therefore, this concrete can be used in areas where strength is not a crucial factor and in areas exposed to freezing and thawing.

Some researchers have also studied brick aggregates are an alternative for replacing coarse aggregates. All studies reviewed in this paper have reported linear reductions in concrete compressive strength when natural coarse aggregates are progressively replaced by brick aggregates (Figure 2.4 and Figure 2.5), as tested by

Debieb et al. (2008). Figure 2.5 shows that at 28 days, the compressive strength decreased linearly at a rate of approximately 4% for each 10% replacement and reached a loss of 40% for 100% substitution. For low-strength concrete (strength < 25 MPa), de Brito et al. (2005) observed a linear decrease in strength, but at a smaller rate of 2.2% for each 10% replacement of coarse aggregates. By replacing fine aggregates (sand) by brick aggregates instead of coarse aggregates in normal-strength concrete, Cachim (2009) observed almost no decrease in compressive strength for a replacement ratio of 50%, and compressive strength loss was <20% for a replacement ratio of 100%.

Torkittikul et al. (2010) stated that the compressive strength of concrete made from ceramic aggregates was higher than that obtained with natural aggregates for fine fraction substitution percentages up to 50% (Figure 2.4 and Figure 2.5). The optimum result was obtained by Pacheco-Torgal et al. (2010) who used ceramic sand with a low water absorption coefficient (6%). The replacement of natural sand by ceramic sand is a good choice because the concrete did not show any loss of strength and had excellent durability.

The addition of mineral admixtures such as fly ash and silica fume considerably improved the strength of recycled aggregate–concrete due to the improved microstructure of the matrix (Faraj et al., 2019; Sadrmomtazi et al., 2016). The use of 10% silica fume in recycled aggregate–concrete containing 15% by weight of plastic particles increased the compressive strength by 14% compared to the same mix with no silica fume content (Sadrmomtazi et al., 2016). Faraj et al. (2019) also reported that the compressive strength of recycled aggregate–concrete increased

by 5% with the addition of 10% silica fume regardless of the plastic aggregate content.

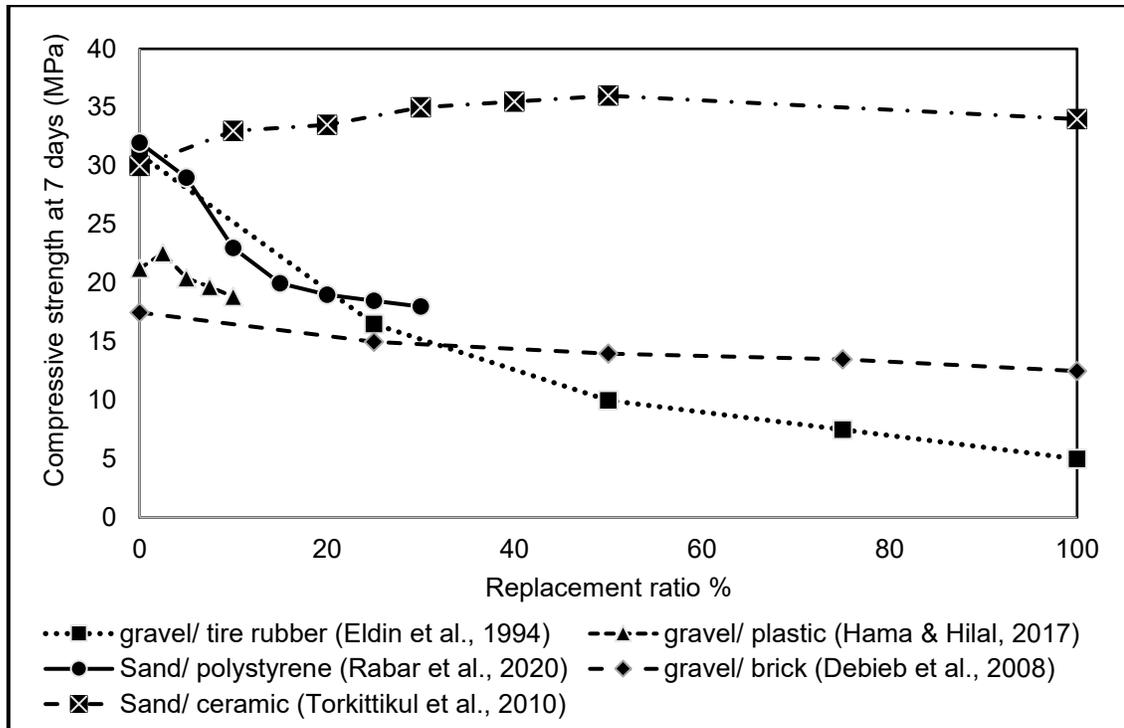


Figure 2.4 : Variation in 7-days compressive strength as a function of replacement ratio.

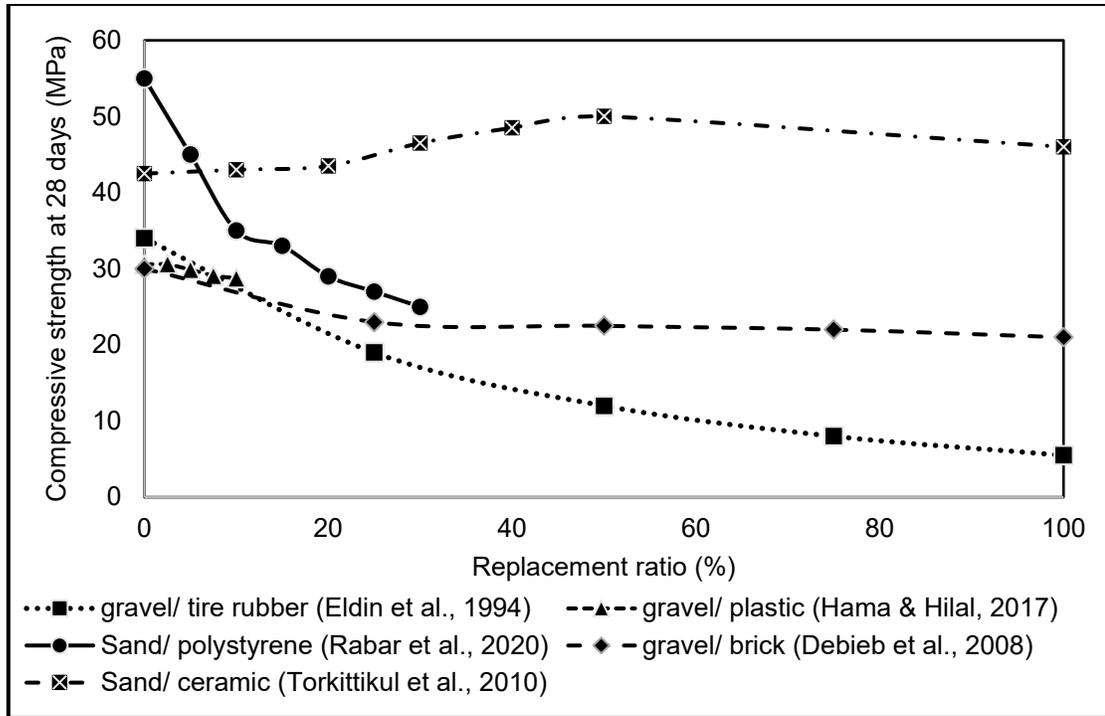


Figure 2.5 : Variation in 28-days compressive strength as a function of replacement ratio.

Despite the decrease in compressive strength of waste-based concretes, it remains acceptable for brick and ceramic concretes at up to 100% replacement and for plastic at up to 15%. On the other hand, the polystyrene and tyre rubber concretes had a significant drop in compressive strength with the increase of the replacement.

- **Elastic modulus**

The modulus of elasticity (E_c) of concrete depends on many factors, such as W:C ratio, binder content, and type of aggregates.

Table 2.3 presents the results of previous studies on the influence of percentage and the types of aggregates on E_c ; these were determined from the experimental stress–strain.

Tang et al. (2008) reported that compared to control concrete, the E_c of concrete made from polystyrene aggregates decreased by 29% and 73% when 20% and 80% aggregates were replaced, respectively. Yang et al. (2015) concluded that the E_c of lightweight concrete containing 15% polystyrene aggregates was 10% lower than that of the control mix. The modulus of elasticity of concrete is considerably affected by the properties of the aggregates, the cementitious matrix, and the transition zone. The E_c is negligible in polystyrene aggregate-based concrete because the incorporation of polystyrene aggregates in the mix increases the elastic incompatibility between the polystyrene aggregates and the matrix, thus increasing the stress concentration at the bond interface (Bremner et al., 1986). As a result, the elastic modulus decreases considerably.

The modulus of elasticity of plastic aggregate–concrete depends on many factors, such as the water: cement ratio, binder content, and the type of plastic aggregate. The elastic modulus of plastic aggregate–concrete decreases with increasing plastic content. Faraj et al. (2019) also reported that as the replacement ratio of plastic content increased from 0% to 40%, the static elastic modulus of high-strength concrete decreased by 22% on average. They also determined that adding silica fume improved the E_c regardless of the plastic aggregate content. Similar results were presented by (Sadrmomtazi et al., 2016).

Li et al. (2016) examined the effect of particle size and the replacement ratio of coarse/fine aggregates by rubber aggregates on the elastic modulus. The elastic modulus increased with increasing particle size but decreased with increasing rubber replacement ratio. Similar findings were reported about the decrease in the

elastic modulus with increasing rubber replacement ratio; Atahan et al. (2012) and Yuan (2008) determined that the elastic modulus of concrete containing smaller rubber particles increased by 17.1% and 17.4%, respectively, compared to rubber particles with larger sizes. At higher replacement levels, however, there was not a considerable difference in the effect of particle size on the elastic modulus.

Table 2.3 shows that the modulus of elasticity is strongly affected by the presence of aggregates of recycled bricks. The modulus of elasticity decreases with increasing percentage of brick aggregates. It follows a similar trend like compressive strength (Figure 2.4 and Figure 2.5). For a substitution percentage of 100% of brick aggregates, the elastic modulus decreased by approximately 60%. Cabral et al. (2010) reported a 45% decrease for 100% coarse fraction substitution and a 12% decrease when replacing the fine fraction for medium-strength concrete (<35 MPa). Alves et al. (2014) reported a decrease of 30% in medium-strength concrete (<50 MPa) for 100% substitution of fine fractions. Khatib (2005) reported a decrease of only 15% in the dynamic modulus of elasticity for 100% substitution of the fine fraction in medium-strength concrete (<50 MPa). The decrease in elastic modulus occurs mainly because the recycled brick aggregate has lower stiffness than the natural aggregate. Moreover, the presence of the coarse fraction of recycled brick aggregates enhances this characteristic compared to the substitution of only the fine fraction.

Table 2.3 : Mechanical properties of different types of concrete.

Material	Replacement ratio	Modulus of elasticity	Compressive strength at 28 days	Tensile strength at 28 days	density
	%	E [GPa]	[MPa]	[MPa]	ρ [kg/m ³]
Concrete based on natural aggregates	100%	20-50	30-72	3	2200-2400
Concrete based on Tire Rubber	25% à 100%	–	23-55	2.8-1.6	2150-1700
Polystyrene-based concrete	5% à 30%	–	45-25	4-2.8	1800-2150
Glass Concrete	25% à 100%	16.5-18	52-55	–	2150-2450
Brick-based concrete	20% à 70%	36-16.5	55-43	3.9-2.5	2340-1870
Plastic-based concrete (polypropylene)	5% à 40%	41-34	78-62	4.4-5.8	1500-2000
Concrete made with demolition aggregates	25% à 100%	–	44.5-38.7	–	2210-2170

The modulus of elasticity was not determined for all the waste concretes cited in this study because of its sharp decrease with increasing waste quantity. This is also the case for the wastes listed in Table 3.

2.3. Mechanical properties of concrete with alkali-activated concrete

Over the past few decades, extensive research has been conducted on energy-efficient and sustainable alternatives to Portland cement concrete. Compared to Portland cement concrete, the primary raw materials of geopolymers are mainly natural aluminosilicate-rich minerals, alkaline activators, and industrial wastes, rather than relying on calcium carbonate calcination (CaCO_3)(Table 2.4), which is a dominant source of CO_2 emissions in the production of Portland cement concrete

(Kupwade-Patil et al., 2013). Portland cement is totally replaced by another raw material in GPC; therefore, it is considered an environmentally friendly alternative to conventional concrete (Guo et al., 2019; Xie et al., 2019).

In GPCs, the binder can replace 100% of the Portland cement and provide better concrete physical properties and durability (Olivia et al., 2012; Rangan, 2008). Various sources of raw materials can be used as binders in GPC. Contemporary raw materials that are commonly used in GPC are fly ash (FA), blast furnace slag ground granules (GGBFS), and metakaolin. These by-products have been preferentially used for GPC due to their availability and high content of silica and alumina, which are responsible of the geopolymerisation process when reacting with activators (typically sodium silicate, Na_2SiO_3 , and sodium hydroxide, $NaOH$). Silica fume (FS), which is a by-product of smelting silicon, is another source of silicate that can be used in concrete to replace Portland cement or to act as an additive for Portland cement concrete (Nochaiya et al., 2010). Silica fume comprises very fine particles (between 0.1 and 0.5 μm) (Zhang et al., 2016), which leads to very high pozzolanic activity (Liu et al., 2017). Bauxite residues (RBs) and glass powders are alternative sources of silica that can be used for geopolymers if they contain sufficient alumina and calcium (Xuan et al., 2019). GPC can be used as an industrial by-product of raw materials that have considerable potential to improve durability (Bajpai et al., 2020). FA and blast furnace slag are preferentially applied to GPC due to their high availability and high content of silica (SiO_2) and alumina (Al_2O_3) (Puertas et al., 2011). Table 2.4 shows the typical chemical compositions of Portland cement, bauxite residue, FA, silica fume, glass powder, and blast furnace slag.

Table 2.4 : Chemical composition of cement as well as different types of industrial residues used in the manufacture of geopolymer concrete.

Composition (%)	Portland Cement	Bauxite residues	Fly ash	Silica fume	Glass powder	Blast Furnace Slag
<i>CaO</i>	61-70	1-4	1-40	0.1-0.15	8-10	40-45
<i>SiO₂</i>	20.0-25	8-15	15-60	91-97	70-72	35-38
<i>Al₂O₃</i>	3.5-7.5	20-24	5-35	0.2-0.3	1.5-5	10-12
<i>Fe₂O₃</i>	1.5-6	40-45	4-40	0.1-0.5	0.08-2.3	0.18-0.4
<i>MgO</i>	1.5-4	0.20-0.30	1-3	0.1-0.2	0.5-3.2	8-9
<i>SO₃</i>	0.05-3.5	0.60-0.8	0.1-0.4	0.12-0.45	0.08	-
<i>K₂O</i>	0.05-1.4	0.04-0.05	1-3	0.1-0.56	0.5-7	0.1-0.4
<i>Na₂O</i>	0.05-0.7	3.70-4	0.4-1.5	0.1-0.6	8-14	-
Chloride	0-0.1	-	-	-	-	-
Insoluble	0.05-1.2	-	2.0	-	-	-
Loss on fire	0.2-3	10	3-5	1.2-2.40	2-3	1.5
free lime	1.0	-	-	-	-	-

The main reaction and activation products of GPC show the optimum mechanical properties and durability after high-temperature curing. Generally, FA requires a curing temperature of 60–85 °C because the reactivity of FA is inadequate to be activated by alkaline activators at 20°C room temperature (Junaid et al., 2014). Blast furnace slag can improve the curing properties of fly ash-based GPC at room temperature because of the presence of CaO in the blast furnace slag (Puligilla et al., 2013). Thus, the use of FA/GGBFS-based GPC, which includes calcium silicate hydrate (C–S–H gel), calcium aluminosilicate hydrate (C–A–S–H gel), and sodium aluminosilicate hydrate (gel N–A–S–H) (Zhang et al., 2016), can save energy,

decrease CO₂ emissions, and facilitate the recycling of waste. These types of geopolymer also exhibit excellent mechanical properties (Abdrazak et al., 2014; Ding et al., 2016), freeze–thaw resistance (Ferdous et al., 2015), corrosion resistance for embedded steel reinforcement (Ariffin et al., 2013), high temperatures resistance (Diouri et al., 2014), and exceptional interfacial bonding properties of steel reinforcing bars (Diouri et al., 2014).

Glass powder is also considered a source of silica for the production of GPC. It can limit the amount of sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH), which are alkaline solutions that are typically used as geopolymer activators. Under certain conditions, these solutions can be completely eliminated for economic advantages in the production of alkaline geopolymers, which are the most expensive components of GPC mixtures (Cyr et al., 2011). Silica fume reacts with the calcium compounds of the raw geopolymer material (usually FA) and forms C–S–H gels, which increases the physical and mechanical properties and durability of GPCs (Chindaprasirt et al., 2014). Mijarsh et al. (2015) used silica fume as a mineral additive for the production of geopolymers from palm oil fuel ashes.

Several studies have shown that the use of calcium hydroxide, Ca(OH)₂, is the optimum representative of pozzolanic reaction activity, and it is the criterion for the identification of a pozzolanic material (Moon et al., 2017). In the past, two main types of pozzolanic materials have been used, namely, natural materials, which are rare materials generally produced by volcanic activities, and synthetic materials such as ceramic powder. Currently, the most frequently used pozzolanic materials with the same properties are FA, silica fume, and metakaolin (Moropoulou et al., 2004).

Water quenched slag also has suitable cementing and pozzolanic properties. However, the hydration of water-soaked slag decreases $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in concrete, which can reduce its permeability, improve its resistance to chemical attack, enhance its durability, and decrease in the reaction of alkaline aggregates. Thus, this concrete is more compact, and its strength may increase after long-term use (Hwang, 2007).

Bauxite residues have also been used in GPCs. The chemical composition of bauxite residues can be variable and depends on its nature. In general, bauxite residues contain iron, titanium, silica, and the aluminium that was not extracted during refining and metal production. These may also contain sodium, in the form of hydrated aluminium silicate and sodium of a zeolitic nature, hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), magnetite (Fe_3O_4), boehmite ($\gamma\text{-AlOOH}$), quartz (SiO_2), sodalite ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$), and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A small amount of calcite (CaCO_3) and gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) may also be present in bauxite residues (da Silva et al., 2008). Olivia et al. (2012) indicated that the percentage of CaO is less variable, and thus, bauxite residues do not have cementitious properties. However, when added to concrete with Portland cement, bauxite residues may react with water and cement and acquire cementitious properties.

2.3.1. Properties in a fresh state

- ***Workability***

Generally, an alkaline solution (NaOH , Na_2SiO_3) of geopolymer activators is used in the liquid form. Investigations into the effects of different alkaline solution concentrations (35%, 40%, and 45%) on the performance of GPCs based on blast

furnace slag have shown that the slump of GPC is maximised when the concentration of the alkaline solution is 45% (Nath et al., 2014). However, the increase in SH concentration decreases the slump of the GPC (Nuaklong et al., 2016), which may be attributed to the penetration of more SiO_2 and Al_2O_3 , which accelerates the geopolymer process and improves the stiffness of the system.

The workability of fly ash-based GPC is also considerably affected by the Na_2SiO_3 : NaOH ratio, and different Na_2SiO_3 : NaOH ratios can cause unstable variations in the workability of GPC (Figure 2.6) (Perná et al., 2014). The viscosity of GPC increases with increase in the Na_2SiO_3 : NaOH ratio, and generally, the slump of GPC decreases with increasing Na_2SiO_3 content (Nath et al., 2014).

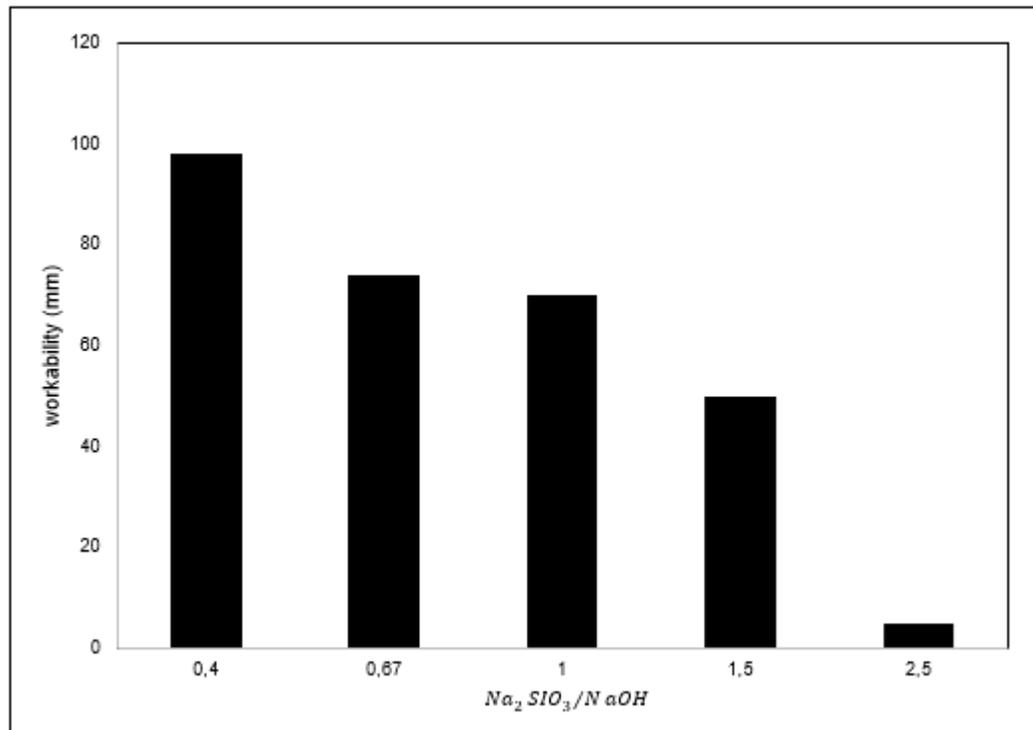


Figure 2.6 : Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio on the slump of GPC (Nath et al., 2014).

For GPC mixed with FA and blast furnace slag, Laskar et al. (2017) and Venu et al. (2017) revealed that replacing part of the FA with blast furnace slag would decrease the slump of GPC. This may be due to the high calcium content in the blast furnace slag, which accelerates the reaction of the geopolymers by forming an amorphous Ca–Al–Si gel (Cheah et al., 2017).

Generally, GPCs have a lower slump than Portland cement concrete. Fly ash-based geopolymers, where the slag has low calcium content, the workability is similar to that of Portland cement concrete (Ismail Amer, 2020). Rangan (2008) showed that workability can be increased by using a super plasticiser product based on naphthalene (SP). The recommended amount of naphthalene (SP) for a 44% solid solution is approximately 2%–4% of FA mass. Umniati et al. (2017) reported that the increase in FA to sand ratio leads to the increase in GPC workability. However, the cohesion and the slump of GPC increase with the increase in the SiO₂: Na₂O ratio in the sodium silicate solution. Shadnia et al. (2015) found that the slump of GPC increases when the molarity of NaOH is decreased with varying ratios of alkali activator solution to FA (Lokuge et al., 2018; Mehta et al., 2017). Mehta et al. (2016) showed that the use of NaOH as an alkali activator alone, without SH, can considerably reduce the slump of GPC, which can be attributed to the high viscosity of Na₂SiO₃. According to Ramujee et al. (2017), among the factors that act on the slump of GPC, the alkali solution to FA ratio, the fineness of FA, the ratio of Na₂SiO₃: NaOH solution and liquid to FA considerably affect the workability of GPC.

Few works have investigated the fresh state properties of geopolymer concrete. However, from previous studies, it can be concluded that geopolymer

concrete has a firmer slump than Portland cement concrete. On the other hand, there are solutions to liquefy the geopolymer concrete mix, as mentioned above.

2.3.2. Properties in the hardened state

- ***Compressive strength***

Various material residues are used in the production of GPCs, and their dosage has a crucial effect on the concrete mechanical properties. Consequently, the strength of GPC varies according to the type of residues used the curing temperature, the curing duration, and the selected raw materials, such as the types of super plasticiser: water: solid ratio, Na_2O : SiO_2 ratio, Na_2SiO_3 : NaOH ratio, and by the particle size distribution (Assi et al., 2018).

The curing of GPC at high temperature can facilitate its subsequent reaction and generate more material in the geopolymer gel phase, thus improving the material strength (Görhan et al., 2016; Noushini et al., 2016). However, the curing time at high temperature should not be very long. The main reason is that high-temperature curing for a long time would generate thermal stress within the geopolymer matrix, producing microcracks in its internal structure, which decreases the compressive strength of the samples (Görhan et al., 2016; Noushini et al., 2016; Sukmak et al., 2013). Guo et al. (2010) also concluded that there is a critical value for the high-temperature curing time of GPC, and a too long curing time at high temperature can damage the geopolymer structure.

High-temperature curing of geopolymer-based concrete acquires their maximum compressive strength after one day without further increase in compressive strength over time. In fact, nearly 90% of this final strength is developed in a few hours if curing is done at 80–90 °C. However, GPC cured under ambient temperature gains strength over time, which is observed with ordinary concrete. Increasing the curing temperature is also beneficial for discharging the water generated in the system, as it accelerates the growth of the gel phase material in GPCs (Nasvi et al., 2012; Noushini et al., 2016). Hence, this can rapidly form a high-strength hard structure. Therefore, a high curing temperature of 80 °C can improve the compressive strength of GPC. In general, a large amount of water molecules are deformed at the beginning of the geopolymerisation process, the water molecules evaporate during high-temperature curing (Görhan et al., 2016; Rovnaník, 2010), and then leave voids in the internal structure and the external surface of the matrix. Therefore, under appropriate conditions of curing temperature, all incompletely reacted blast furnace slag and FA particles were tightly enveloped by the generated gel phase material, and the bond between the particles and the matrix became compact and dense.

All curing regimes (ambient or higher temperatures) produce long-term strength (Rangan, 2008), and the curing temperature simply changes the time to reach the ultimate strength of the mix under study. Curing at excessive temperature is not beneficial to the compressive strength of GPC. The main reason is the weakening of the microstructure and the formation of micro- and macro-cracks (Guo et al., 2010; Noushini et al., 2016). As an example, curing at 100 °C causes loss of

humidity and a decrease in strength because the geopolymerisation process requires humidity to obtain good mechanical properties (Nasvi et al., 2012).

As for the effect of the residues on the compressive strength, on one hand, Nasvi et al. (2012) reported that the fly ash-based geopolymer did not acquire a considerable increase in strength above 60 °C, and on the other hand, some researchers found that the optimal curing temperature for higher strength was 75–85 °C (Alvarez-Ayuso et al., 2008; Noushini et al., 2016). These conflicting results could be attributed to the type of activators and the level of alkalinity of the activators (Mastali et al., 2018; Nasvi et al., 2012). Several researchers have mixed blast furnace slag with FA at different percentages (Figure 2.7). Fang et al. (2018) added blast furnace slag (GGBS, 0%–30%) in FA concrete (Musaddiq Laskar et al., 2017) or they added 0%–50% FA in blast furnace slag concrete (GGBF). This gave better results at lower temperatures (Fang et al., 2018; Musaddiq Laskar et al., 2017). Some highly reactive very fine fly ashes do not require slag addition to achieve high strengths (Assi et al., 2016).

Studies have reported that the increase in the concentration of alkali activator affects the strengthening of the resistance while the increase in molarity leads to a better dissolution rate of the aluminosilicate sources, thus improving the geopolymerisation process (Elyamany et al., 2018; Toniolo et al., 2018). Due to the increase in the activator: binder ratio, the water content increased resulted in high dissolution of the ions (Al Bakri et al., 2012). The compressive strength of GPC decreases with the increase in the superplasticiser: binder ratio (Al Bakri et al., 2012).

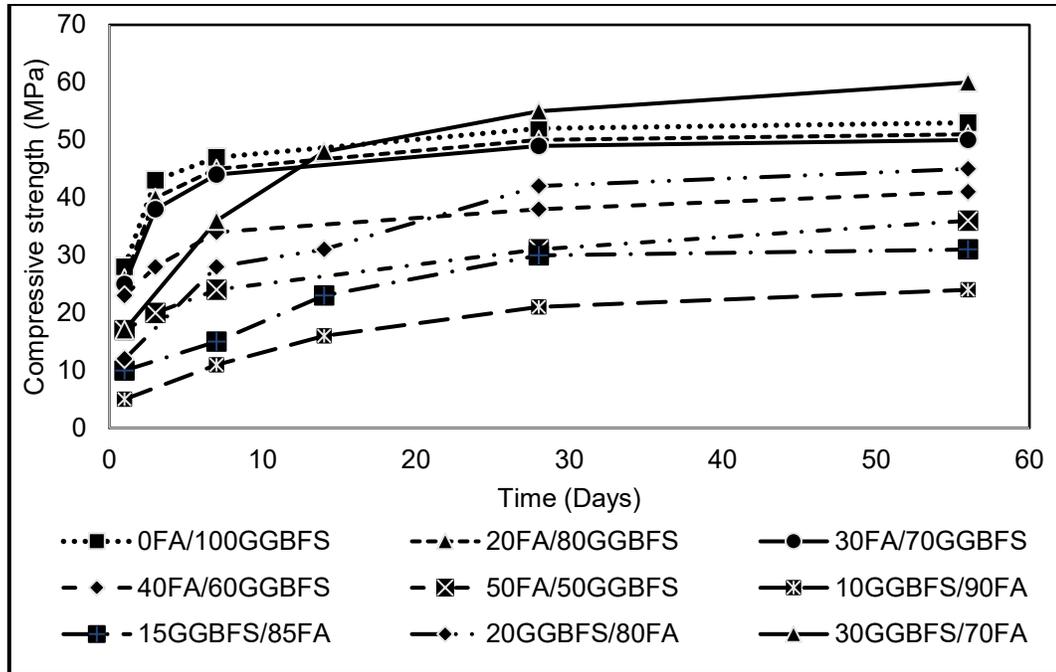


Figure 2.7 : Variation of compressive strength as a function of time (Fang et al., 2018; Musaddiq Laskar et al., 2017).

The molar ratios, water: solid ratios (w:s) of the mixtures, and the Na_2O : SiO_2 ratio increased as the Na_2SiO_3 : NaOH ratio decreased. A higher Na_2O : SiO_2 ratio corresponded to a higher compressive strength of the samples. This may be due to the increased amount of Na_2O in the mixture, which improves the mechanical properties of the geopolymers (Chi et al., 2013). The strength decreases as the alkali solution content increases due to the high liquid content w:s of the mixture, which hinders the polymerisation process as well as the increase in the amount of oligomerisation reaction products (Ruiz-Santaquiteria et al., 2012). Although the Si: Al ratio in the total binder increases as the alkali activator content increases, the water: solid ratio was the key factor affecting compressive strength.

Al Bakri et al. (2012) also reported that water content is the most important factor for a geopolymerisation process and for the dissolution of SiO_2 and Al_2O_3 and

hydrolysis (Zuhua et al., 2009). Consequently, the water content increases with the increase in the activator: binder ratio, which leads to more efficient dissolution of ions.

High compressive strength is related to the leaching of silica and alumina with a high molarity alkaline solution. The dissolution process and the binding of the particles are related to the NaOH concentration. Therefore, the use of a high concentration of NaOH solutions leads to a better dissolution and a more efficient geopolymerisation process (Hardjito et al., 2008); (Somna et al., 2011).

The polymerisation of GPC is controlled by the dissolution and precipitation processes. As pH increases, the diffusion-controlled polymerisation reaction process of GPC becomes faster than the hydration reactions of Portland cement concrete, and GPC has a higher compressive strength at the beginning of the drying period. Hydration products for Portland cement concrete are mainly calcium hydroxide (Ca(OH)_2), C–S–H gel and ettringite (AFt), and those for blast furnace slag-based GPCs comprise a geopolymer gel and a C–S–H gel (Chen et al., 2019). The structure of GPC is also denser than that of Portland cement concrete. The interfacial transition zone of GPC is very dense and uniform, and particle roughness has improved the mechanical integrity of GPC (Mehta et al., 2017; Pasupathy et al., 2017) and recycled GPC (Shi et al., 2012).

Some researchers have reported that increasing the amount of silica fume in fly ash-based geopolymer blends decreases strength due to their low Al_2O_3 and CaO content. Silica fume also decreases the alkalinity of the mixtures and the solubility of

the FA (Alanazi et al., 2019). Others report that the resistance increases under the effect of silica fume may be related to its pozzolanic nature. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is formed with the reaction of the alkaline solution and CaO , which is very high in FA. Silica fume is a highly reactive pozzolan; it reacts with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and forms calcium silicate hydrate (C–SH) gels, resulting in increased resistance (Duan et al., 2017).

Xuan et al. (2019) analysed the mix effect of glass powder and NaOH concentration in GPC. For a low concentration of NaOH (6 mol/L), they observed that the increase in the amount of glass powder up to 20% increases the compressive strength of geopolymer up to 45 MPa. For a large proportion of glass powder ($\geq 50\%$), the compressive strength decreased. However, at a concentration of 10 mol/L NaOH, the use of 50% glass powder could still increase the compressive strength up to the highest measured value. This was attributed to the better dissolution of the glass powder in the alkaline environment, which is related the NaOH concentration. (Toniolo et al., 2018; Toniolo et al., 2017) reported that partially dissolved glass powder develops a silica-rich gel on the surface of the glass particles that prevents complete dissolution, and therefore, a higher glass powder replacement ratio can limit the reaction and decrease mechanical properties.

Bernal et al. (2011) evaluated the compressive strength of GPC with different blast furnace slag contents (300, 400, and 500 kg/m^3) and compared it with a Portland cement concrete with the same contents. They observed that compressive strength increased with the binder content (slag for GPC and cement for ordinary concrete). Regardless of the blast furnace slag content, GPC had a higher compressive strength than Portland cement concrete (Bernal et al., 2011). Sas et al.

(2019) studied the compressive strength of GPC with blast furnace slag (GGBS) and bauxite residue (BR) with different contents. As presented in Figure 2.8, for different ratios of BR and GGBS (mixtures named XXRB/YYGGBS, where XX and YY are the percentage of BR and GGBS, respectively), they found that compressive strength decreased with increasing percentage of bauxite residue in the mixtures cured at ambient temperature. For all four studied mixtures, the compressive strength increased with time, but the strength at 2 days was generally very close to the strength measured after 28 days.

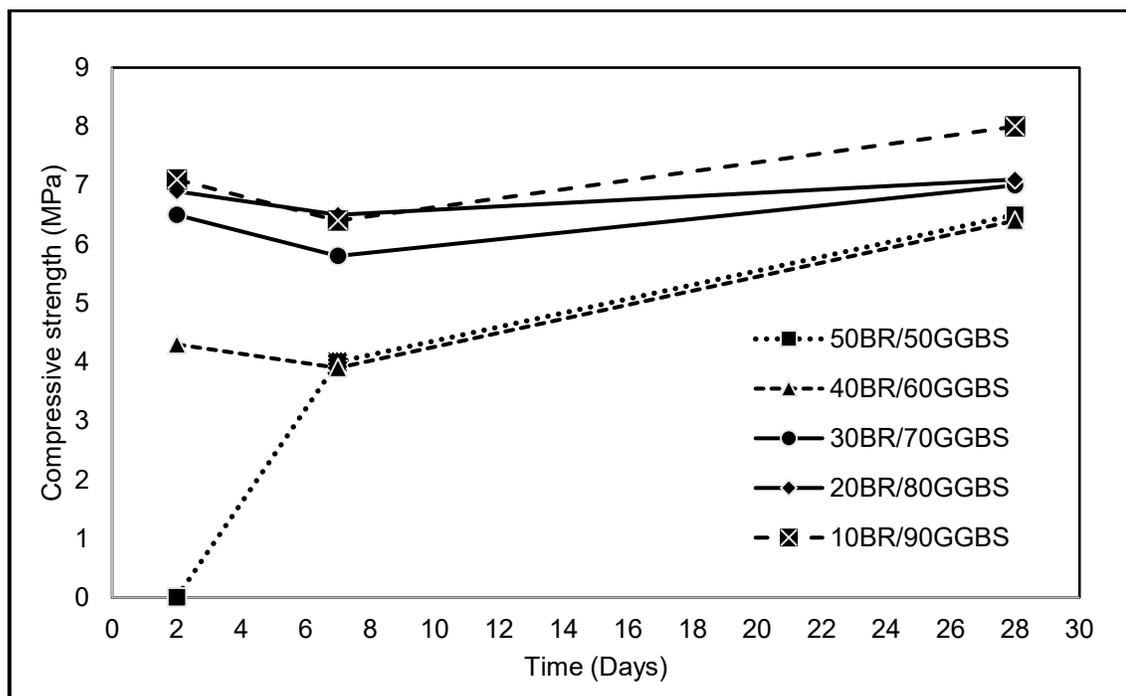


Figure 2.8 : Variation of compressive strength of Portland cement concrete, with blast furnace slag (GGBS) and BR, as a function of time and for different RB: GGBS ratios (Sas et al., 2019).

Few researchers have studied GPC with recycled aggregates. (Ren et al., 2018; Xie et al., 2019) found that the geopolymer paste comprises more homogeneous substances and is denser than Portland cement concrete paste,

which modifies the defects caused by the demolition aggregates. Shi et al. (2012) also reported that GPC made from recycled aggregates had higher mechanical strength than its counterpart ordinary Portland cement concrete made from recycled aggregates (Z. Liu et al., 2016; Xie et al., 2019).

Some researchers have studied the combination of fly ash (FA) and silica fume (SF) with irradiated polyethylene terephthalate (PET) waste and ordinary polyethylene terephthalate (PET) waste in a cementitious grout [122]. The results show that the compressive strength is significantly reduced at all curing ages, although the pozzolanic characteristics of FA and SF combined to increase the compressive strength. Khan et al. [123] studied the influence of replacing ordinary Portland cement (OPC) with irradiated polyethylene terephthalate (PET) waste and silica fume in cement grouts. The experimental results show a loss of compressive strength.

In general, the compressive strength of geopolymer concretes varies according to the type of residues used, the curing temperature, the curing time, and the raw materials used. Geopolymer concretes can be produced by mixing several wastes at the same time. This considerably improves the mechanical properties of the concrete.

- ***Elastic modulus***

The elastic modulus of alkali-activated GPC was studied and compared to conventional Portland cement concrete by several authors. Generally, GPC has a lower modulus of elasticity than conventional Portland cement concrete (Lee et al.,

2017; Shi et al., 2019; Thomas et al., 2015). The main reason could be that for the intrinsic modulus of elasticity of sodium alumino-silicate hydrate gels formed in fly ash/GGBS, geopolymerisation is slower than that of calcium silicate hydrate gel (Ding et al., 2016; Němeček et al., 2011). However, many parameters of a GPC mix affect its elastic modulus.

Figure 2.9 presents the effect of the curing time at 80 °C on the elastic modulus for three different mixtures of GPC with GGBS and FA (Wang et al., 2020). The effect of curing temperature on the elastic modulus for the same mixtures was examined by Wang et al. (2020), and the results are presented in Figure 2.10. The mixtures were named as XXGGBS/YYFA, where XX and YY are the percentage of GGBS and FA used, respectively. Figure 2.9 and Figure 2.10 show that as the substituted amount of FA increased, the elastic modulus decreased. Increasing the curing time and curing temperature up to 80 °C also increased the elastic modulus. The smaller growth of elastic modulus after 24 h indirectly reflects that the geo-polymerisation reaction is almost completed (Wang et al., 2020). Similar effect of curing time and temperature was observed by Nasvi et al. (2012) and Wang et al. (2020) for GPC with Portland cement recycled aggregates. The reason for this improvement in the elastic modulus of concrete depends on the concrete components, including the paste, aggregates, and the interfacial transition zone (Çakır, 2014; T. Xie et al., 2018). The gel phase of the geopolymer became stronger and the hydration reaction in the GPC matrix increased further with increasing curing duration and curing temperature (Ding et al., 2016). It was also noted by Xuan et al. (2019) that the addition of glass powder may increase the elastic modulus of GPC. However, most

studies have shown that for a given compressive strength, GPC has an elastic modulus lower than a control Portland cement concrete sample (Hardjito et al., 2008).

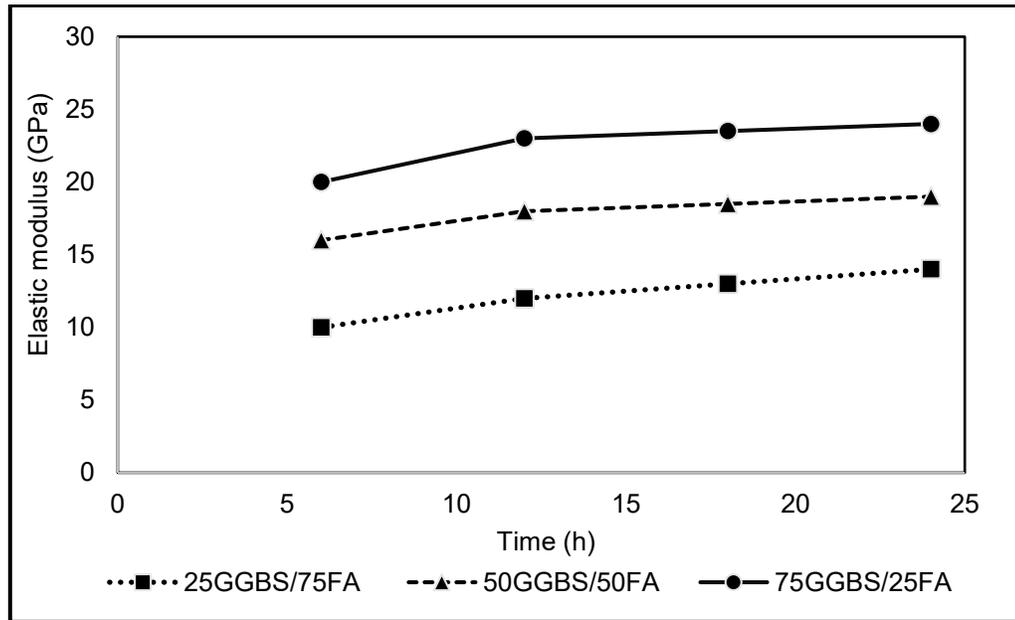


Figure 2.9 : Modulus of elasticity as a function of curing time of GPC after 7 days at a curing temperature of 80 °C (Wang et al., 2020).

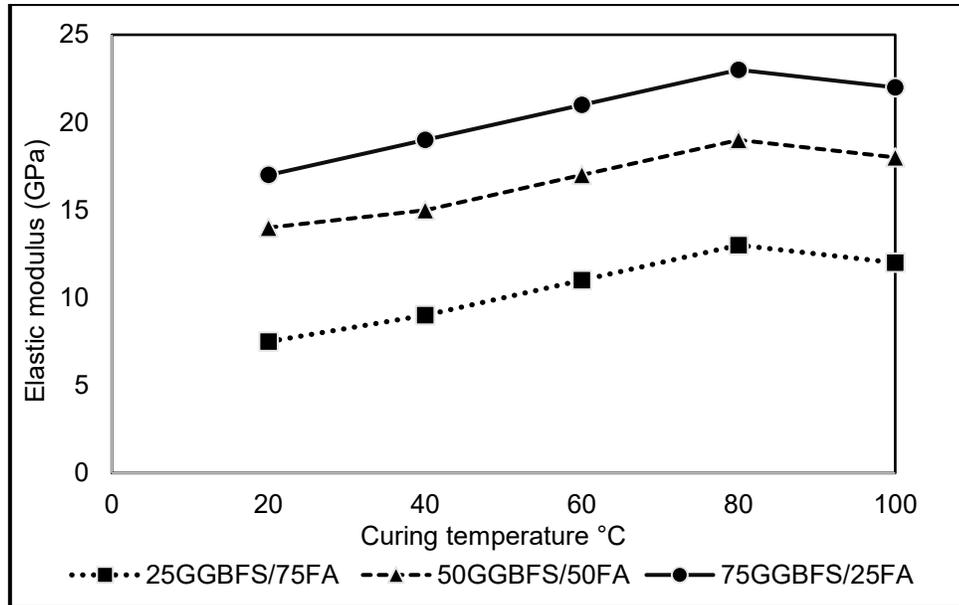


Figure 2.10 : Modulus of elasticity as a function of curing temperature after 7 days with a curing time of 24 h (Wang et al., 2020).

Generally, the elastic modulus of geopolymer concrete is always lower than that of its reference concrete. However, it could be improved, by increasing the temperature and the curing time.

2.4. Discussion and conclusions

Several researchers have studied the properties of mortar and concrete containing different types of waste. A complete review of previous studies on concrete made from different types of wastes is presented herein. Based on an extensive review of research data, the following points should be highlighted:

- Various admixture chemicals such as superplasticisers and viscosity modifiers, as well as mineral admixtures and industrial wastes could be effectively used to improve the physical and mechanical properties of concrete. However, the type, form, and the level of replacement considerably

influence the mechanical properties. The latter can be attributed to the decrease or increase in adhesive strength between the surface of the type of aggregate used and the cement paste. For example, the addition of recycled plastic, glass, tyre rubber, or brick aggregates in planar form can decrease the slump and the strength of concrete, while the compressive strength may increase with the addition of these recycled aggregates in spherical form.

- The use of waste aggregates considerably decreases the fresh and dry density of concrete regardless of the type of waste and the amount of substitution. Due to the unit weight, the concrete made by recycled aggregates is substantially lighter than concrete made by natural aggregates. The incorporation of different types of pozzolanic materials such as silica fume, FA, glass powder, and blast furnace slag increase the density of concrete and improve the microstructure of the matrix. As a result, the strength and mechanical properties of the concrete are considerably improved.
- Brick, ceramic, glass and demolition aggregates can be used at up to 100% replacement in a concrete mix. However, plastic, tyre rubber and polystyrene aggregates cannot exceed 20% replacement in a concrete mix.
- GPC is a relatively inexpensive material to produce since the essential component is an industrial by-product. The properties of GPC depend on the chemical product, the composition of the binders, the type of used admixture, the curing conditions, the pouring processes and the environmental

conditions. GPC has all the elements of desirable mechanical and structural properties that make it an ideal choice for industrial construction. Generally, GPC elements show more durability than traditional repair materials for thermal resistance and acid sulphate attack.

- The mixing of FA with another pozzolanic material such as silica fume, blast furnace slag or glass powder improves the strength of the concrete, allows the use of another much finer by-product, with FA, each giving its advantage. In addition, the use of both by-products also offers environmental benefits that help decrease the use of Portland cement while improving the properties of concrete.
- The mechanical properties of concrete containing recycled materials decrease due to the increased surface area of the waste, and its irregular shape results in rigid concrete that is difficult to handle.
- The unit weight values of concrete containing waste are lower than those of ordinary concrete. This decrease in weight is due to the nature of the waste used, which makes the concrete less dense and less resistant compared to conventional concrete.
- The increase in Na_2SiO_3 : NaOH ratio, fly ash: blast furnace slag ratio, or silica fume or glass powder, the hardening at very high temperature, and the temperature application time, effect on the setting time, the end-of-setting time, and the physical and mechanical properties of the GPC.

- Recycled aggregate-concrete is a clean product obtained from industrial waste as a more environmentally building material. Concrete made from mineral additives has many important characteristics; it does not produce harmful greenhouse gas emissions, hardening periods between 3 and 8 h can produce concretes with excellent strength and high-performance durability in an aggressive environment, and cost-effectiveness and environmental friendliness make it a potential sustainable material in the construction industry.

Further research must be conducted on the application recommendations of waste-based concrete. Other properties, such as sound attenuation, vibration control, thermal insulation, heat release upon hydration, shrinkage, creep, fatigue resistance, fire resistance, and environmental impact, must be considered for the complete evaluation of waste concrete. For well understanding of the mechanical behaviour of GPC, the microstructure/nanostructure and chemical reaction of geopolymers should be studied. More creep tests on different designs and mixing conditions of GPC are needed to expand the creep database.

2.5. Reference

- Abdelmonem, A., El-Feky, M. S., Nasr, E.-S. A. R., & Kohail, M. (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041
- Abdrazak, S. N., & Nuruddin, M. F. (2014). The Effects of Alkali Silica Reaction (ASR) towards Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 699, 271-276. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.699.271
- Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A., & Zarina, Y. (2012). The processing, characterization, and properties of fly ash based geopolymer concrete. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 30(1), 90-97.
- Alanazi, H., Hu, J., & Kim, Y.-R. (2019). Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 197, 747-756. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.172
- Alawais, A., & West, R. P. (2019). Ultra-violet and chemical treatment of crumb rubber aggregate in a sustainable concrete mix. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 4(3), 144-152. doi:10.1080/24705314.2019.1594603
- Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., . . . Barra, M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes. In *J Hazard Mater* (Vol. 154, pp. 175-183). Netherlands.
- Alves, A. V., Vieira, T. F., de Brito, J., & Correia, J. R. (2014). Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 64, 103-113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.037>

- Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Mohd Tahir, M., & Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, *43*, 80-86. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018
- Assi, Lateef, Ghahari, S., Deaver, E., Leaphart, D., & Ziehl, P. (2016). Improvement of the early and final compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete at ambient conditions. *Construction and Building Materials*, *123*, 806-813. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.069
- Assi, N., L., Eddie Deaver, E., & Ziehl, P. (2018). Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, *167*, 372-380. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193
- Atahan, A. O., & Yücel, A. Ö. (2012). Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation. *Construction and Building Materials*, *36*, 617-622. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.068
- Babu, K. G., & Babu, D. S. (2003). Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, *33*(5), 755-762. doi:10.1016/s0008-8846(02)01055-4
- Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., & Singh, M. (2020). Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, *254*. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120147
- Balaha, A. A. B. H. (2007). Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes *Indian journal of Engineering & Materials Sciences*, *14*, 427-435.
- Batayneh, M. K., Marie, I., & Asi, I. (2008). Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. *Waste Manag*, *28*(11), 2171-2176. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.035

- Benfenier, A. (1998). *Engineering properties of polystyrene aggregate concrete*. PhD thesis, University of Technology, Sydney, Australia,
- Bernal, S. A., Mejía de Gutiérrez, R., Pedraza, A. L., Provis, J. L., Rodriguez, E. D., & Delvasto, S. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 1-8. doi:10.1016/j.cemconres.2010.08.017
- Bremner, T., & Holm, T. (1986). *Elastic compatibility and the behavior of concrete*. Paper presented at the Journal Proceedings.
- Cabral, A. E. B., Schalch, V., Molin, D. C. C. D., & Ribeiro, J. L. D. (2010). Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 421-430. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011
- Cachim, P. B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1292-1297. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023
- Çakır, Ö. (2014). Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 68, 17-25. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.032
- Cheah, C. B., Samsudin, M. H., Ramli, M., Part, W. K., & Tan, L. E. (2017). The use of high calcium wood ash in the preparation of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Pulverized Fly Ash geopolymers: A complete microstructural and mechanical characterization. *Journal of Cleaner Production*, 156, 114-123. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.026
- Chen, Bing, Liu, & Juanyu. (2004). Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1259-1263. doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.014

- Chen, Xiao, Guo, Y., Ding, S., Zhang, H., Xia, F., . . . Zhou, M. (2019). Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions. *Journal of Cleaner Production*, 207, 789-800. doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.263
- Chi, M., & Huang, R. (2013). Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, 40, 291-298. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003
- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., & Rattanasak, U. (2014). Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1087-1093. doi:10.1016/j.appt.2014.02.007
- Chunchu, B., & Putta, J. (2019). Rheological and Strength Behavior of Binary Blended SCC Replacing Partial Fine Aggregate with Plastic E-Waste as High Impact Polystyrene. *Buildings*, 9(2). doi:10.3390/buildings9020050
- cook. (1983). Expanded polystyrene concrete. *Concrete Technology and Design*, 1, 41-69.
- Cyr, M., Idir, R., & Poinot, T. (2011). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782-2797. doi:10.1007/s10853-011-6107-2
- da Silva, T., Gondim, F., & de Castro Motta, L. (2008). Performance Evaluation of Interface of Reinforced Concrete and Repair Mortars by Microscopy. *Special Publication*, 253, 71-88.
- de Brito, J., Pereira, A. S., & Correia, J. R. (2005). Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 429-433. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005

- Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5), 886-893. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013
- Ding, Y., Dai, J.-G., & Shi, C.-J. (2016). Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 127, 68-79. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.121
- Diouri, A., Khater, H. M., Khachani, N., & Alami Talbi, M. (2014). Studying the effect of thermal and acid exposure on alkali activated slag Geopolymer. *MATEC Web of Conferences*, 11. doi:10.1051/mateconf/20141101032
- Duan, P., Yan, C., & Zhou, W. (2017). Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle. *Cement and Concrete Composites*, 78, 108-119. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.01.009
- Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, A. E. M., & Elshaboury, A. M. (2018). Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders. *Construction and Building Materials*, 187, 974-983. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.025
- Fang, G., Ho, W. K., Tu, W., & Zhang, M. (2018). Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 172, 476-487. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.008
- Faraj, R. H., Hama Ali, H. F., Sherwani, A. F. H., Hassan, B. R., & Karim, H. (2020). Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*, 30. doi:10.1016/j.jobbe.2020.101283
- Faraj, R. H., Sherwani, A. F. H., & Daraei, A. (2019). Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing

- recycled polypropylene plastic particles. *Journal of Building Engineering*, 25. doi:10.1016/j.jobbe.2019.100808
- Ferdous, W., Manalo, A., Khennane, A., & Kayali, O. (2015). Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams – Concrete mix design and application. *Cement and Concrete Composites*, 58, 1-13. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.12.012
- Gayarre, F. L., González, J. S., López, M. A. S., Pérez, C. L.-C., & Arias, P. J. F. (2019). Mechanical properties of prestressed joists made using recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 194, 132-142. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.004
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., İpek, S., & Asaad, D. S. (2015). Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel–concrete bond strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 1113-1121. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.030
- Görhan, G., Aslaner, R., & Şinik, O. (2016). The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste. *Composites Part B: Engineering*, 97, 329-335. doi:10.1016/j.compositesb.2016.05.019
- Guo, Shenglai, Ma, Cong, Long, Guangcheng, . . . Youjun. (2019). Cleaner one-part geopolymer prepared by introducing fly ash sinking spherical beads: Properties and geopolymerization mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 219, 686-697. doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.116
- Guo, Xiaolu, Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003
- Hama, S. M., & Hilal, N. N. (2017). Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. *International Journal of*

Sustainable Built Environment, 6(2), 299-308.
doi:10.1016/j.ijsbe.2017.01.001

Hardjito, D., Cheak, C. C., & Ing, C. H. L. (2008). Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar. *Modern applied science*, 2(4), 3-11.

Holmes, N., Dunne, K., & O'Donnell, J. (2014). Longitudinal shear resistance of composite slabs containing crumb rubber in concrete toppings. *Construction and Building Materials*, 55, 365-378. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.046

Hwang, C. (2007). Pozzolana Concrete Using Manual. Sinotech Engineering Consultants. *Inc., Taipei*.

Ismail Amer, M. K., M.S. El-Feky, Ahmed Rashad, Mohamed A. Khalaf. (2020). Evaluation Of Using Cement In Alkali-Activated Slag Concrete. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 9.

Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F., & Cioffi, R. (2013). Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials & Design (1980-2015)*, 52, 916-922. doi:10.1016/j.matdes.2013.06.025

Junaid, M. T., Khennane, A., Kayali, O., Sadaoui, A., Picard, D., & Fafard, M. (2014). Aspects of the deformational behaviour of alkali activated fly ash concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 60, 24-29. doi:10.1016/j.cemconres.2014.01.026

Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763-769. doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.017

- Kumar, P., Pankar, C., Manish, D., & Santhi, A. (2018). Study of mechanical and microstructural properties of geopolymer concrete with GGBS and Metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 28127-28135.
- Kupwade-Patil, K., & Allouche, E. N. (2013). Impact of Alkali Silica Reaction on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), 131-139. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000579
- Lan, P., Tang, H., & Zhang, J. (2016). Solidification microstructure, segregation, and shrinkage of Fe-Mn-C twinning-induced plasticity steel by simulation and experiment. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(6), 2964-2984.
- Laskar, S. M., & Talukdar, S. (2017). Preparation and tests for workability, compressive and bond strength of ultra-fine slag based geopolymer as concrete repairing agent. *Construction and Building Materials*, 154, 176-190. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.187
- Law Yim Wan, D. S., Aslani, F., & Ma, G. (2018). Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Perlite, Scoria, and Polystyrene Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8). doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002350
- Lee, K.-M., Choi, S., Choo, J. F., Choi, Y.-C., & Yoo, S.-W. (2017). Flexural and Shear Behaviors of Reinforced Alkali-Activated Slag Concrete Beams. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1-12. doi:10.1155/2017/5294290
- Li, L.-J., Tu, G.-R., Lan, C., & Liu, F. (2016). Mechanical characterization of waste-rubber-modified recycled-aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 124, 325-338. doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.003
- Liu, Jin, Huixin, Wang, & Dongmin. (2017). Influence of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete. *Powder Technology*, 320, 230-238. doi:10.1016/j.powtec.2017.07.052

- Liu, Z., Cai, C. S., Peng, H., & Fan, F. (2016). Experimental Study of the Geopolymeric Recycled Aggregate Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9). doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001584
- Lokuge, W., Wilson, A., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2018). Design of fly ash geopolymer concrete mix proportions using Multivariate Adaptive Regression Spline model. *Construction and Building Materials*, 166, 472-481. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.175
- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2002). High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories.
- Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Mohammadi Firouz, R., & Illikainen, M. (2018). Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. *Construction and Building Materials*, 190, 533-550. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.125
- Mehta, A., & Siddique, R. (2016). An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 127, 183-198. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.136
- Mehta, A., & Siddique, R. (2017). Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 146, 136-143. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.077
- Miah, M. J., Ali, M. K., Paul, S. C., Miah, M. S., Haque, M. M., Islam, M. S., & Islam, M. R. (2021). Impact of partial replacement of brick coarse aggregate by waste rubber tyre on the fresh and hardened properties of concrete. In *Key Engineering Materials* (Vol. 877 KEM, pp. 131-137).
- Mijarsh, M. J. A., Megat Johari, M. A., & Ahmad, Z. A. (2015). Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolymer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives. *Cement*

and Concrete Composites, 60, 65-81.
doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.02.007

Miller, S. A., Habert, G., Myers, R. J., & Harvey, J. T. (2021). Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*, 4(10), 1398-1411.

Mohammadi, I., Khabbaz, H., & Vessalas, K. (2014). In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements. *Construction and Building Materials*, 71, 456-471.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085

Mohammadi, I., Khabbaz, H., & Vessalas, K. (2015). Enhancing mechanical performance of rubberised concrete pavements with sodium hydroxide treatment. *Materials and Structures*, 49(3), 813-827. doi:10.1617/s11527-015-0540-7

Mohammed, A. A., Mohammed, I. I., & Mohammed, S. A. (2019). Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials*, 201, 232-245.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.145

Moon, H., Kim, J.-H., Lee, J.-Y., Kim, S.-G., & Chung, C.-W. (2017). Evaluation of Pozzolanic Activity for Effective Utilization of Dredged Sea Soil. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(4), 637-646.
doi:10.1007/s40069-017-0215-6

Moropoulou, A., Bakolas, A., & Aggelakopoulou, E. (2004). Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 420(1-2), 135-140. doi:10.1016/j.tca.2003.11.059

Musaddiq Laskar, S., & Talukdar, S. (2017). Development of Ultrafine Slag-Based Geopolymer Mortar for Use as Repairing Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5). doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001824

- Najim, K. B., & Hall, M. R. (2013). Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Materials and Structures*, 46(12), 2029-2043. doi:10.1617/s11527-013-0034-4
- Nasvi, M. M. C., Gamage, R. P., & Jay, S. (2012). Geopolymer as well cement and the variation of its mechanical behavior with curing temperature. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2(1), 46-58. doi:10.1002/ghg.39
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080
- Němeček, J., Šmilauer, V., & Kopecký, L. (2011). Nanoindentation characteristics of alkali-activated aluminosilicate materials. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 163-170. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.10.005
- Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, 89(3), 768-774. doi:10.1016/j.fuel.2009.10.003
- Noushini, A., & Castel, A. (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 464-477. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.210
- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.109
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 191-198. doi:10.1016/j.matdes.2011.10.036

- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832-838. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023
- Park, S. B., Lee, B. C., & Kim, J. H. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2181-2189. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.006
- Pasupathy, K., Berndt, M., Sanjayan, J., Rajeev, P., & Cheema, D. S. (2017). Durability of low-calcium fly ash based geopolymer concrete culvert in a saline environment. *Cement and Concrete Research*, 100, 297-310. doi:10.1016/j.cemconres.2017.07.010
- Perná, I., & Hanzlíček, T. (2014). The solidification of aluminum production waste in geopolymer matrix. *Journal of Cleaner Production*, 84, 657-662.
- Perry, S., Bischoff, P., & Yamura, K. (1991). Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 43(154), 71-76.
- Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J. S., Rico, A., & Rodríguez, J. (2011). A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(12), 2043-2056. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036
- Puligilla, S., & Mondal, P. (2013). Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer. *Cement and Concrete Research*, 43, 70-80. doi:10.1016/j.cemconres.2012.10.004
- Raffoul, S., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., & Medina, N. F. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 124, 391-404. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054

- Ramujee, K., & PothaRaju, M. (2017). Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2937-2945. doi:10.1016/j.matpr.2017.02.175
- Rangan. (2008). Fly ash-based geopolymer concrete. *Research Report GC 4 Engineering Faculty Curtin University of Technology Perth, Australia*.
- Reda Taha, M. M., El-Dieb, A. S., Abd El-Wahab, M. A., & Abdel-Hameed, M. E. (2008). Mechanical, Fracture, and Microstructural Investigations of Rubber Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(10), 640-649. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:10(640)
- Ren, X., & Zhang, L. (2018). Experimental study of interfacial transition zones between geopolymer binder and recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 167, 749-756. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.111
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176-1183. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023
- Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O., & Mills, J. E. (2020). A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 237. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117651
- Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2012). Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates. *Cement and Concrete Research*, 42(9), 1242-1251. doi:10.1016/j.cemconres.2012.05.019
- Rubberized Concrete. *MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 20. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:11(692)
- Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., & Sadeghi-Nik, A. (2016). The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles

- and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2363-2373. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.107
- Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., & Maallem, M. (2013). The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 43, 436-442. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049
- Saradhi Babu, D., Ganesh Babu, K., & Wee, T. H. (2005). Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1218-1223. doi:10.1016/j.cemconres.2004.11.015
- Sas, Z., Sha, W., Soutsos, M., Doherty, R., Bondar, D., Gijbels, K., & Schroeyers, W. (2019). Radiological characterisation of alkali-activated construction materials containing red mud, fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Sci Total Environ*, 659, 1496-1504. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.01.006
- Senouci, N. N. E. A. B. (1994). Measurement and Prediction of the Strength of Rubberized Concrete. *Cement & Concrete Composites*, 287-298.
- Shadnia, R., Zhang, L., & Li, P. (2015). Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM. *Construction and Building Materials*, 84, 95-102. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.066
- Shi, Caijun, Collins, F. G., Zhao, X. L., & Wang, Q. Y. (2012). Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. *J Hazard Mater*, 237-238, 20-29. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.07.070
- Shi, Caijun, Qu, B., & Provis, J. L. (2019). Recent progress in low-carbon binders. *Cement and Concrete Research*, 122, 227-250. doi:10.1016/j.cemconres.2019.05.009

- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, *90*(6), 2118-2124. doi:10.1016/j.fuel.2011.01.018
- Su, H., Yang, J., Ling, T.-C., Ghataora, G. S., & Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, *91*, 288-296. doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.022
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., & Shen, S.-L. (2013). Strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, *40*, 566-574. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.015
- Tang, W. C., Lo, Y., & Nadeem, A. (2008). Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, *30*(5), 403-409. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002
- Thomas, R. J., & Peethamparan, S. (2015). Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress–strain behavior. *Construction and Building Materials*, *93*, 49-56. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.039
- Toniolo, Rincón, A., Roether, J. A., Ercole, P., Bernardo, E., & Boccaccini, A. R. (2018). Extensive reuse of soda-lime waste glass in fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, *188*, 1077-1084. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.096
- Toniolo, N., & Boccaccini, A. R. (2017). Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*, *43*(17), 14545-14551. doi:10.1016/j.ceramint.2017.07.221
- Torkittikul, P., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, *32*(6), 440-449. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.02.004

- Umniati, B. S., Risdanareni, P., & Zein, F. T. Z. (2017). *Workability enhancement of geopolymer concrete through the use of retarder*.
- Venu, M., & Gunneswara Rao, T. D. (2017). Tie-confinement aspects of fly ash-GGBS based geopolymer concrete short columns. *Construction and Building Materials*, 151, 28-35. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.065
- Wang, J., Xie, J., Wang, C., Zhao, J., Liu, F., & Fang, C. (2020). Study on the optimum initial curing condition for fly ash and GGBS based geopolymer recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 247. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118540
- Xie, Jianhe, Wang, Junjie, Rao, Rui, . . . Maochieh. (2019). Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 164, 179-190. doi:10.1016/j.compositesb.2018.11.067
- Xie, T., Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2018). Toward the Development of Sustainable Concretes with Recycled Concrete Aggregates: Comprehensive Review of Studies on Mechanical Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9). doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002304
- Xuan, D., Tang, P., & Poon, C. S. (2019). MSWIBA-based cellular alkali-activated concrete incorporating waste glass powder. *Cement and Concrete Composites*, 95, 128-136. doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.10.018
- Yang, S., Yue, X., Liu, X., & Tong, Y. (2015). Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*, 84, 444-453. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038
- Yuan, Z. X. S. H. a. Y. (2008). Strength, Modulus of Elasticity, and Brittleness Index of

- Zaher, K., Khatib, J. M., Fouad, M., Bayomy, Member, & ASCE. (1999). RUBBERIZED PORTLAND CEMENT CONCRETE. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(16661), 206-213.
- Zhang, Haibo, Gou, Mifeng, Liu, Xiaoxing, . . . Xuemao. (2014). Effect of rubber particle modification on properties of rubberized concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 29(4), 763-768. doi:10.1007/s11595-014-0993-5
- Zhang, Zengqi, Zhang, Bo, Yan, & Peiyu. (2016). Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 105, 82-93. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.045
- Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 43(2), 218-223. doi:10.1016/j.clay.2008.09.003

CHAPITRE 3

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON À BASE DE RÉSIDUS DE BAUXITE

3.1. Introduction

Un des enjeux environnementaux majeurs pour l'industrie de l'alumine est l'élimination d'une quantité massive de résidus de bauxite. Approximativement 90 millions de tonnes de résidus de bauxite sont produites chaque année à travers le monde (Patel et al., 2015). Or, il est connu que l'utilisation industrielle des résidus de bauxite est très limitée et leur quantité augmentent dans les lieux de stockage.

Plusieurs travaux ont été publiés sur l'utilisation des résidus de bauxite dans des bétons conventionnels. Par exemple, Al-Amoush et al. (2018) ont étudié la résistance du béton autoplaçant dans lequel le ciment Portland a été remplacé par des résidus de bauxite à des pourcentage de 1%, 2%, 3% et 4% dans un béton de nuance de 30 MPa. D'après les résultats obtenus, il a été constaté que l'ajout de résidus de bauxite permettait d'augmenter la résistance à la compression de chaque mélange par rapport au mélange témoin. À 28 jours, les résistances en compression et en flexion du mélange de 2% de résidus de bauxite ont augmenté de 20% et 34% respectivement, par rapport à son béton témoin. Cependant avec le même mélange de 2% de résidus de bauxite la résistance en flexion a marqué la plus grande résistance. Illavarason et al. (2018) ont remplacé le ciment par des résidus à des proportions 0%, 5%, 10%, 15%, 20% de résidus de bauxite, et une quantité de chaux hydratée constante de 5% dans le béton conventionnel de 30 MPa. Les résultats de la résistance en compression et en traction ont montré une augmentation à 5% 10%

et 15%, puis une diminution à 20% avec une augmentation de 10% et 14% de la résistance en compression et en traction, respectivement. Ye et al. (2018) ont proposé d'utiliser les résidus de bauxite pour remplacer partiellement les cendres volantes (12.5, 25 et 50%) dans le béton autoplaçant. Les résultats des essais ont démontré que l'ajout de résidus de bauxite a entraîné une perte considérable de fluidité et que la résistance mécanique du béton augmente avec l'augmentation de la teneur en résidus de bauxite. Les échantillons de 50% de résidus de bauxite ont donné les meilleurs résultats en termes de résistance en compression, avec une augmentation de 7% par rapport au béton témoin. En revanche, pour la résistance en traction, les mélanges de 25% de résidus de bauxite ont donné les meilleurs résultats avec une augmentation de 5% par rapport au béton témoin. Bayat et al. (2018) ont étudié la possibilité d'utiliser des combinaisons binaires de résidus de bauxite et de laitier (sous forme alcali-activé). Pour ce faire, les laitiers utilisés ont été remplacés par des résidus de bauxite à des pourcentages de 10%, 20%, 30% et 40% en poids du laitier. Ces mélanges ont ensuite été comparés à un mélange de béton témoin dont le liant était constitué uniquement de ciment Portland. Les auteurs ont constaté que les résistances à la compression de tous les échantillons ont augmenté avec l'âge de durcissement (3, 7 et 28 jours). De plus, les échantillons de mélange binaire sans résidus de bauxite présentaient la plus grande résistance en compression à tous les âges. Les auteurs ont également observé que la résistance à la compression de toutes les éprouvettes de béton binaire enrichi de résidus de bauxite était inférieure à celle du béton témoin, sans résidus de bauxite ni laitier, à un âge de durcissement de 3 jours. Cependant, les mélanges contenant 10% et 20% de résidus de bauxite ont présenté une résistance à la compression

supérieure à celle du mélange témoin de béton de ciment Portland aux âges de 7 et 28 jours. La résistance à la traction mesurée par essai de flexion de tous les échantillons de béton de laitier et de résidus de bauxite était inférieure à celle des bétons de laitier seul et le béton conventionnel. Shetty et al. (2014) ont étudié les aspects de résistance du béton autoplaçant préparé en remplaçant partiellement le ciment par des résidus de bauxite et dans le même mélange, il a procédé au remplacement partiel du sable par des résidus de minerai de fer. Le ciment a été remplacé par les résidus de bauxite à 1%, 2%, 3% et 4%. Pour chaque pourcentage de résidus de bauxite, ils ont remplacé les agrégats fins par les résidus de minerai de fer à des pourcentage de 10%, 20%, 30%, 40%. Chaque mélange qui avait été remplacé par des résidus de bauxite et des résidus de minerai de fer a atteint des résistances supérieures à celles d'un mélange témoin (0% de résidus de bauxite et 0% de minerai de fer). À 28 jours, le mélange témoin a atteint une résistance à la compression, f'_c de 32,8 MPa. Le mélange avec 2% de résidus de bauxite et 30% de résidus de minerai de fer a atteint la plus grande résistance à la compression avec une augmentation de 22% par rapport au béton témoin. La résistance à la traction mesurée en flexion, f_r , obtenue pour tout le mélange est supérieure à celle du mélange témoin. Le mélange avec 2% de résidus de bauxite et 30% des résidus de minerai de fer a atteint une résistance f_r de 7,88 MPa. Cette dernière a augmenté de 26,48% pour ce mélange. Sunitha et al. (2014) ont examiné l'utilisation de résidus de bauxite lavée et non lavée dans le béton pour le remplacement partiel du ciment à des teneurs de 0 % à 20 % avec un intervalle de 2%. Ils ont constaté que la résistance au cisaillement, la résistance à la compression, la résistance à la traction mesurée par flexion et par fendage augmentaient avec l'augmentation de la quantité

de résidus de bauxite lavée jusqu'à 8% et non lavée jusqu'à 2%, par la suite une réduction des résistances a été observée. En outre, il a été observé que l'absorption d'eau et la sorptivité diminuaient avec l'augmentation des résidus de bauxite dans le béton. La résistance, la maniabilité et la sorptivité du béton de résidus de bauxite lavés étaient supérieures à celles des résidus non lavés.

3.2. Propriétés physico-chimiques de résidus de bauxite

Les résidus de bauxite sont souvent de couleur gris-blanc à rouge, en fonction de la quantité d'oxyde de fer présente. Le point de fusion, la densité et la densité apparente de résidus de bauxite se situent entre 1100 et 1500 °C, 2700–3200 Kg/m³ et 750–1000 Kg/m³, respectivement (Anagnostopoulos et al., 2021; Atan et al., 2021 ; Hong et al., 2021 ; Sun et al., 2021). Les résidus de bauxite ont un pH compris entre 10 et 12,5, ce qui est hautement alcalin. L'indice de plasticité est de 17,2–30,5 (Panda et al., 2017 ; Wang et al., 2021).

La taille des grains des résidus de bauxite est extrêmement fine. Kumar et al. (2013) ont utilisé un analyseur de taille de particules laser pour déterminer la distribution granulométrique des résidus de bauxite et ont découvert que sa distribution était plus étroite que celle des cendres volantes utilisées dans le béton. La surface spécifique des résidus de bauxite est d'environ 12–59 m²/g, et le diamètre des grains est compris entre 3 et 75 µm. Conséquemment, les résidus de bauxite présentent une excellente adsorption. Pour des utilisations pratiques, la majorité des études se sont concentrées sur la granulométrie et la finesse des résidus de bauxite en tant que substitut de la poudre de ciment. Bien que la majorité

des minéraux présents dans les résidus de bauxite soit libérée, différentes particules minérales collent les unes aux autres en raison de la taille ultrafine des particules, ce qui entraîne une agglomération importante des diverses particules minérales (Yuan et al., 2020).

Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , CaO , MgO et K_2O sont les principaux composés chimiques des résidus de bauxite. Le tableau 1 montre la composition chimique typique des résidus de bauxite selon différents procédés de fabrication de l'aluminium et la compare à celle d'autres matériaux typiquement utilisés dans le béton comme liant ou ajout cimentaire. Les résidus de bauxite peuvent également être faiblement radioactif en raison de la présence de métaux, de terres rares et de traces d'éléments radioactifs tel que l'uranium et le thorium (Hong et al., 2021 ; Milacic et al., 2012 ; Paramguru et al., 2004 ; Wang et al., 2021). En raison des variations régionales des ressources brutes, des procédures de fabrication d'alumine et des progrès techniques, la composition chimique des résidus de bauxite diffère d'un lieu de production à un autre. Les compositions chimiques estimées des résidus de bauxite générés par les procédés Bayer, frittage et les processus de combinaison sont présentés dans le Tableau 3.1 (Liu et al., 2021). Par rapport aux résidus de bauxite produit par le procédé de frittage, les résidus de bauxite du procédé Bayer à une plus faible teneur en calcium et silicium et une plus grande concentration en aluminium, en fer et en sodium, comme le montre le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique typique de résidus de bauxites selon le procédé de fabrication de l'aluminium dont il est issu et comparer au ciment Portland.

Composition	Portland (%)	Procédé de fabrication		
		Bayer (%)	Frittage (%)	Combinaison (%)
<i>CaO</i>	61-70	1-9	45-49	43,5-47
<i>SiO₂</i>	20,0-25	4-20	22-23	20-21
<i>Al₂O₃</i>	3,5-7,5	12-24	4-7	5,5-7,5
<i>Fe₂O₃</i>	1,5-6	35-65	6-10	6-7,5
<i>MgO</i>	1,5-4	0,2-0,3	1,3-1,6	-
<i>SO₃</i>	0,05-3,5	0,60-0,8	-	-
<i>K₂O</i>	0,05-1,4	0,04-0,05	0,3-0,4	0,4-0,7
<i>Na₂O</i>	0,05-0,7	3-10	2,5-3,5	2,7-3
Chlorure	0-0,1	-	-	-
Insolubles	0,05-1,2	-	-	-
Pertes au feu	0,2-3	10-16	7-10	-
Chaux libre	1,0	-	-	-

3.3. Méthodologie et procédure d'essais

Afin de pouvoir caractériser les propriétés physiques et mécaniques des bétons à différents pourcentages et calibre de résidus de bauxite, des essais à l'état frais et à l'état durci, sont réalisés pour la formulation du béton témoin d'une classe de résistance à la compression de 30 MPa et les formulations de résidus de bauxite.

Les propriétés mécaniques investiguées sont la résistance en compression, la résistance en traction, le module d'élasticité et le coefficient de Poisson en respectant les normes CSA A23.1 et A23.2 (2019). Les tests d'affaissement et de

teneur en air ont été aussi effectués dans le but de connaître les propriétés à l'état frais du béton. Les échantillons faits de béton de résidus de bauxite de calibre de 300 μm et les mélanges témoins de béton de ciment portland ont été coulés et durcis pendant 7, 28, 90 et 180 jours, alors que les bétons de résidus de bauxite de calibre de 600 μm , 2 mm et de liquide étaient testés à 7 et 28 jours seulement.

3.3.1. Résidus de bauxite

Les résidus de bauxite utilisés dans cette étude sont ceux de la région de Saguenay-Lac-Saint-Jean dans la province du Québec. Les résidus de bauxites ont été collectés sous forme de boue (Figure 3.1) puis celle-ci a été séchée à $110 \pm 5^\circ\text{C}$ dans un four à moufle pendant 48 heures. Par la suite, elle a été broyée et tamisée manuellement à différents calibres : 300 μm , 600 μm , 2 mm (Figure 3.2).



Figure 3.1 : Résidus de bauxite utilisés.

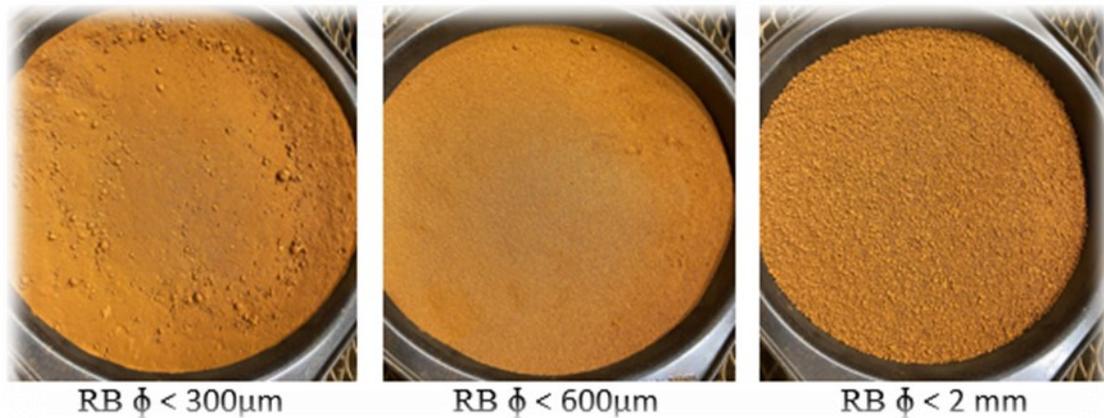


Figure 3.2 : Analyse par tamisage des résidus de bauxite.

3.3.2. Ciment

Le ciment Portland utilisé est fabriqué par une cimenterie Canadienne (Lafarge). C'est un ciment Portland de type GUL (ciment Portland-calcaire à usage général). Il se caractérise par une masse volumique apparente de 3220 kg/m^3 et une surface spécifique de $3275 \text{ cm}^2/\text{g}$.

3.3.3. Granulats

Un granulats fin concassé avec une masse spécifique de 2,56 et un module de finesse de 2,6, d'une absorption d'eau de 1,01% et d'une taille maximale de 5 mm conforme à la norme A23.2 (2019), a été utilisé. Également un agrégat grossier, un granit d'une densité de $2,67 \text{ g/cm}^3$, d'une taille maximale de 20 mm et d'une absorption d'eau de 1,39% ont été utilisés. Leurs courbes granulométriques peuvent être observées sur la Figure 3.3.

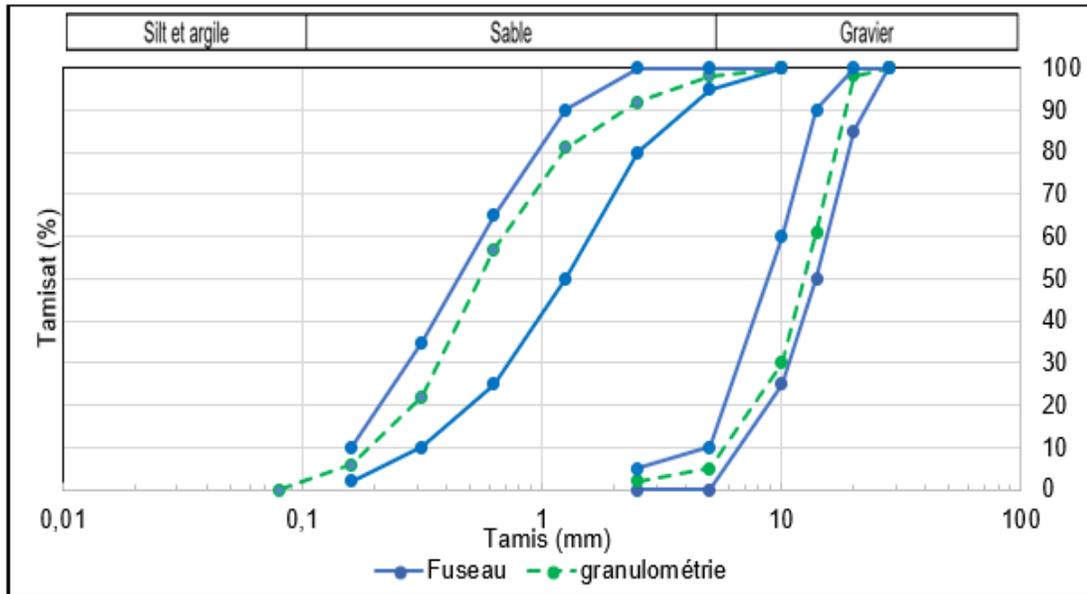


Figure 3.3 : Analyse granulométrique (CSA A23,2-2A 2019).

3.3.4. Adjuvant

La proportion de super plastifiant utilisée est de 0,55% en poids de liant. Le super plastifiant (Eucon 37) a été utilisé pour améliorer la maniabilité du béton et réduire la ségrégation. L'entraineur d'air de type extra a été utilisé en proportion de 0,85% en poids de liant. Le dispersant (WR-75) a été ajouté en proportion de 0,80% en poids de liant.

3.3.5. Composition du mélange

La conception du mélange a été réalisée conformément à la norme CSA A23.1 (2019). Le mélange de béton de contrôle (seulement le ciment Portland, OPC) utilisé dans ce programme expérimental visait une résistance en compression uniaxiale de 30 MPa à 28 jours, avec un rapport de E/C=0,45 dosé à 370 Kg/m³ et un rapport de granulats de 60% de gravier et 40% de sable. Les mélanges de béton à base de

résidus de bauxite étaient réalisés en remplaçant le ciment par 5%, 10%, 15% et 20% de résidus de bauxite, pour chacun des diamètres de résidus de bauxite : 300 μm , 600 μm , 2 mm et sous forme de boue (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Formulation de béton.

	Teneur en Résidus de bauxite	Ciment (Kg)	Granulats fins (Kg)	Gros granulats (Kg)	Résidus de bauxite (Kg)	Eau (L)
Béton témoin	0%	370,0	767,5	1151,3	0	166,5
Calibre de résidus de bauxite < 300 μm	5%	351,5	766,0	1149,0	18,5	169,0
	10%	333,0	764,5	1146,5	37,0	171,5
	15%	314,5	762,7	1144,0	55,5	174,0
	20%	296,0	761,1	1141,6	74,0	176,5
Calibre de résidus de bauxite < 600 μm & < 2 mm	5%	351,5	766,0	1149,0	18,5	166,5
	10%	333,0	764,5	1146,5	37,0	166,5
	15%	314,5	762,7	1144,0	55,5	166,5
	20%	296,0	761,1	1141,6	74,0	166,5
Résidus de bauxite sous forme de boue	5%	351,5	766,0	1149,0	18,5	161,5
	10%	333,0	764,5	1146,5	37,0	156,7
	15%	314,5	762,7	1144,0	55,5	152,0
	20%	296,0	761,1	1141,6	74,0	147,5

Note : Pour tous les mélanges, 1,000 L d'agent entraîneur d'air (air-extra), 0.925 L de dispersant (WR-75) et 0.650 L de superplastifiant (Eucon-37)

Le béton a été mélangé dans un malaxeur de béton d'une capacité de 70 kg. Dans la première étape du mélange, les deux types d'agrégats ont été ajoutés séparément et mélangés pendant deux minutes avec l'entraîneur d'air et le tiers de la

quantité d'eau utilisée. Dans la deuxième étape, les résidus de bauxites, le ciment et le dispersant ont été ajoutés séparément et mélangés pendant une minute de plus. Dans la dernière étape, les deux tiers de la quantité d'eau et le superplastifiant ont été ajoutés et mélangés soigneusement pendant 5 minutes de plus pour obtenir un mélange homogène. Avant de placer le béton dans les moules, l'ouvrabilité de chaque mélange a été mesurée en utilisant le test de cône d'affaissement ainsi que la teneur en air et la masse volumique. Les moules ont été remplis de béton en 3 couches, dans chaque couche 20 coups de Mallet sont donnés. Une fois le moule rempli, l'excès de béton est enlevé et la surface est nivelée à l'aide d'une truelle. Après 24 h de coulée, les éprouvettes ont été démoulées et soumises à une cure à 100% d'humidité. Un nombre total de deux cent vingt-deux spécimens cylindriques (3 po par 6 po) pour déterminer la résistance en compression, la résistance en traction, le module d'élasticité et le coefficient de Poisson à différents âges.

Pour chacun des mélanges testés, trois spécimens sont testés pour chacun des essais. Les essais de compression uniaxiale ont été réalisés selon la norme (CSA, 2019) avec la machine d'essai MTS Criterion Model 64 de l'université de Québec à Chicoutimi. Les spécimens ont été soumis à une précharge de 0,8 KN puis chargés à un taux de 1,14 KN/s jusqu'à la rupture. La résistance à la compression a été obtenue en prenant la moyenne des trois spécimens. Les courbes contrainte-déformation pour chaque mélange ont été obtenues en testant les éprouvettes cylindriques sous compression uniaxiale. Le système d'acquisition des données était composé d'une cellule, d'un extensomètre vertical de 100 mm et

d'un extensomètre horizontal installé sur une ceinture pour mesurer la charge et les déplacements correspondants des spécimens (Figure 3.4).



Figure 3.4 : Montage expérimental du test de compression uniaxiale.

La résistance en traction a été mesurée par l'essai brésilien selon la norme CSA (2019). Trois cylindres de béton pour chaque mélange ont été testés par l'essai brésilien en machine d'essai (MTS Criterion Model 64) (Figure 3.5), avec une précharge de 0,8 kN et un taux de charge de 1,14 kN/s. La résistance à la traction a été obtenue en prenant une moyenne des trois échantillons.



Figure 3.5 : Montage expérimental du test de traction par essai brésilien.

Le calcul de la résistance à la traction s'effectue à l'aide de la formule (3.1)

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (3.1)$$

Avec :

T : La résistance en traction (MPa)

P : La charge maximale appliquée (N)

l : La longueur de l'échantillon (mm)

d : Le diamètre de l'échantillon (mm)

La porosité accessible à l'eau a été mesurée au moyen de l'essai d'absorption d'eau par immersion à la pression atmosphérique. Après le démoulage, trois spécimens de chaque pourcentage de résidus de bauxite de la série de 300 μm ainsi

que le béton témoin étaient conservées en salle humide à 20 ± 2 °C, à plus de 95 % d'humidité relative et ce jusqu'à l'âge de 180 jours. A ce moment de l'essai de la porosité accessible à l'eau, les spécimens étaient pesés et exposés au séchage à une température de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ pendant 48h. Ensuite les spécimens étaient également pesés après séchage. La porosité est exprimée en pourcentage de la masse sèche du spécimen. Etant une image de la porosité. En effet, pour obtenir la porosité d'un béton, il suffit de multiplier l'absorption d'eau par immersion (en %) par la masse spécifique sèche de ce béton, exprimée en kg/dm^3 .

3.4. Résultats et discussions

3.4.1. Propriétés à l'état frais

- ***Ouvrabilité***

L'ouvrabilité de tous les mélanges a été mesurée entre la 16ème et la 18ème minute après le contact eau-liant à l'aide d'un appareil d'essai de cône d'affaissement selon la norme CSA (2019). Les valeurs mesurées pour les mélanges sont présentées à la Figure 3.6. Selon la recette développée du béton témoin, la valeur d'affaissement doit être comprise entre 50 et 110 mm (béton plastique). Il est possible de constater de la Figure 3.6 que le béton témoin répond à cette exigence avec un affaissement de 83 mm. Il est possible de constater également que la substitution du ciment par des résidus de bauxite dans le béton réduit l'affaissement, donc la pâte est plus ferme. Cette observation est similaire à ce que d'autres auteurs ont observé pour des mélanges similaires (Liu et al., 2016). Pour les mélanges de très fine granulométrie ($300 \mu\text{m}$), il a été nécessaire d'augmenter la teneur en eau

de 1,5% pour chaque 5% de résidus de bauxite afin de conserver une maniabilité et un affaissement acceptable. Cette eau supplémentaire requise peut s'expliquer par la haute absorption d'eau par les résidus de bauxite (Tableau 3.2) devant être compensée. Un comportement similaire a été observé par d'autres chercheurs tel que discuté à la section 3.1 (Tang et al, 2018 ; Rajab et al, 2018 ; Durgabai et al, 2018). Finalement, il peut être constaté à la Figure 3.6 que l'affaissement respecte les limites prescrites avec le dosage initial, sans modification d'eau, avec les résidus de bauxite de 600 μm et 2 mm. Il peut être constaté aussi pour les mélanges de 600 μm et 2 mm que le calibre des résidus de bauxite a une influence sur la maniabilité du béton. Pour les mélanges avec des résidus de bauxite liquide, une estimation de 40% de solide et 60% de liquide a été considéré dans la boue rouge et à partir de là la quantité d'eau dans la recette du béton a été justifié. Il est possible de constater qu'en augmentant la quantité de résidus de bauxite sous forme de boue l'affaissement du béton diminue. Cette diminution peut être due à la quantité des solides dans la boue rouge qui est difficile à contrôler.

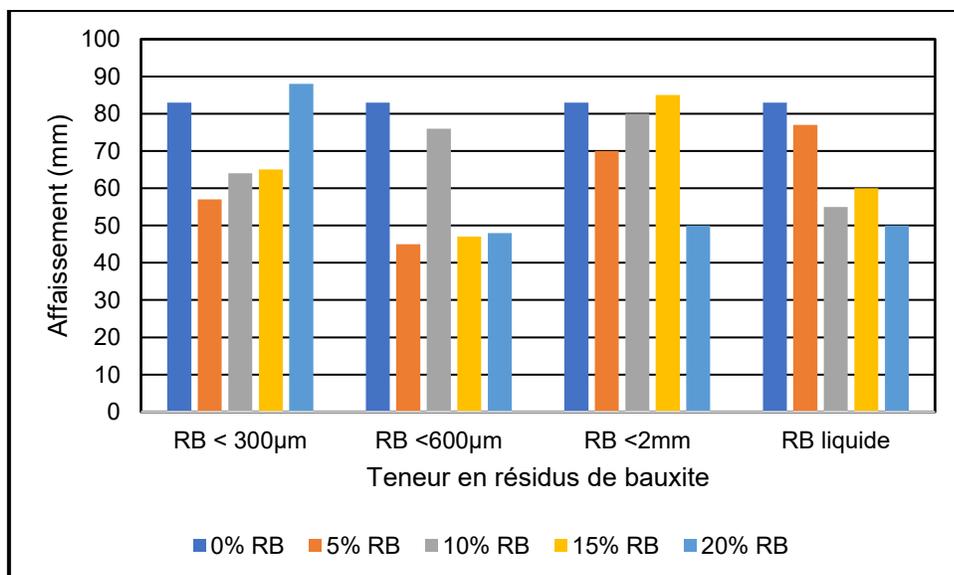


Figure 3.6 : Effets des résidus de bauxite sur l'affaissement des mélanges.

- **Masse volumique**

La masse volumique du béton a été déterminée selon la norme CSA A23.2 (2019). Les résultats obtenus sont illustrés à la Figure 3.7. Il peut y être constaté que la masse volumique du béton des résidus de bauxite est légèrement supérieure à celle de son béton témoin. Sinon, pour les différents diamètres, il est constaté qu'il n'y'a aucun effet apparent sur la masse volumique. Selon la norme CSA A23.2 (2019) la masse volumique du béton de ciment Portland standard varie typiquement de 2250 kg/m³ à 2350 kg/m³. Pour les mélanges testés, la masse volumique du béton de résidus de bauxite varie de 2100 Kg/m³ à 2500 Kg/m³, ce qui demeure semblable au béton de ciment Portland conventionnel.

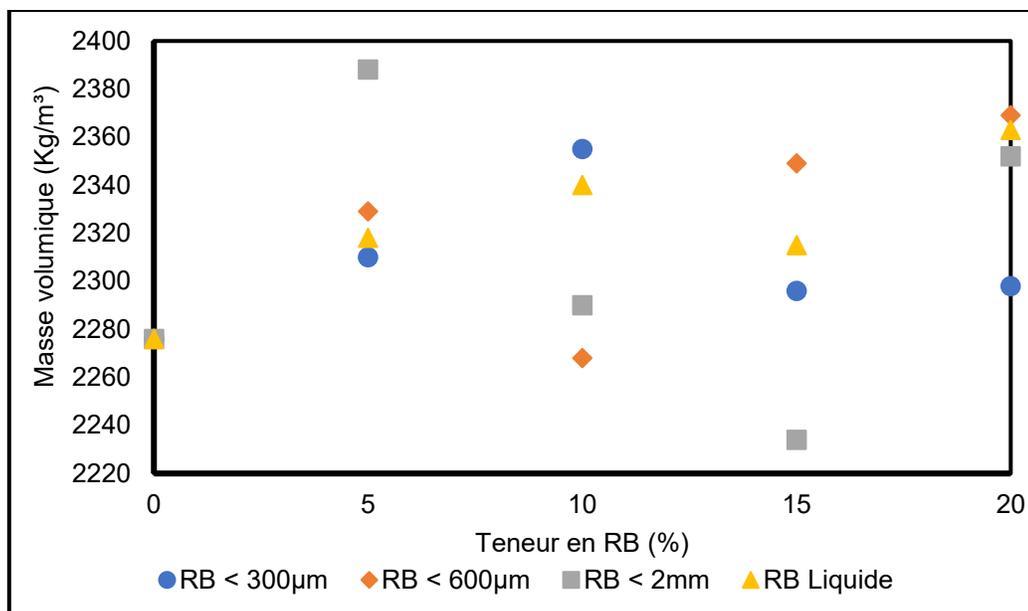


Figure 3.7 : Effets des résidus de bauxite sur la masse volumique des mélanges.

- **Teneur en air**

La teneur en air occlus a été déterminée selon la norme CSA (2019). La Figure 3.8 montre les résultats obtenus pour les différentes teneurs et calibre de résidus de bauxite. Une légère diminution de la quantité d'air occlus est observée lorsque la quantité des résidus de bauxite augmente dans le mélange de béton. Selon la norme CSA A23.2 (2019) la valeur d'air occlus varie de 5% à 8% ce qui est le cas pour le béton témoin avec une valeur de 6%. Par conséquent, les résultats du béton de résidus de bauxite se situent dans la fourchette de 3.2% à 7%. Cela implique que la substitution des résidus de bauxite peut déminué la quantité d'air dans le béton.

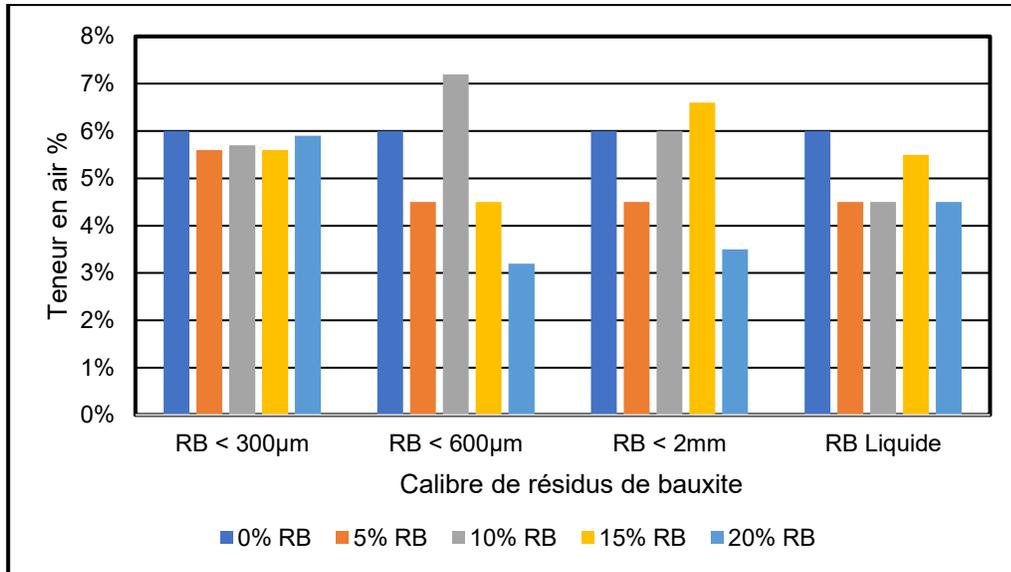


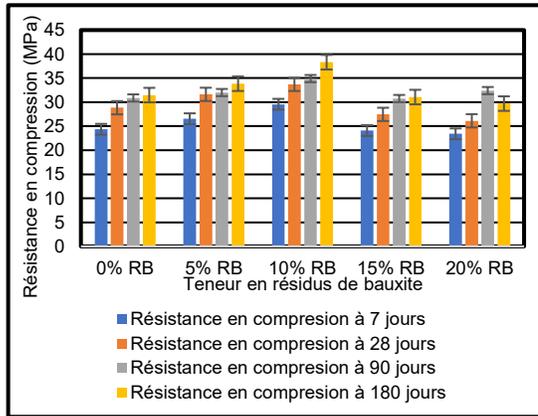
Figure 3.8 : Effets des résidus de bauxite sur la teneur en air des mélanges.

3.4.2. Propriétés du béton à l'état durcis

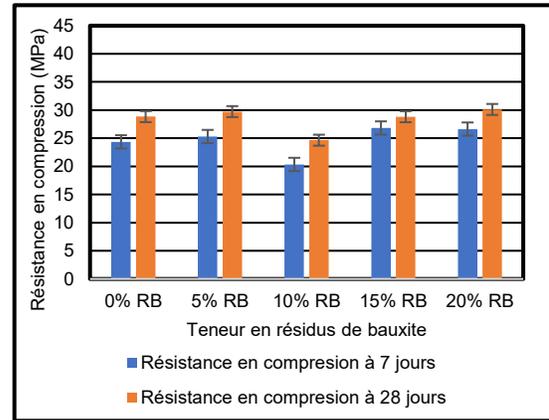
Une fois les propriétés à l'état frais mesurées, les mélanges ont été coulés dans des cylindres de 76,2 mm (3 po) de diamètre par 152,4 mm (6 po) de haut, conformément à CSA-A23.1 (2019) afin de mesurer certaines propriétés à l'état durci. Toutes les éprouvettes ont subi une cure humide d'une durée variant de 7 jours à 180 jours avant d'être mises à l'épreuve par un essai de compression uniaxiale ou de fendage (essais brésilien) selon la norme CSA A23.2 (2019). Ces essais ont permis de mesurer la résistance à la compression, la résistance à la traction, le comportement contrainte-déformation, la rigidité et le coefficient de Poisson.

- **Résistance en compression**

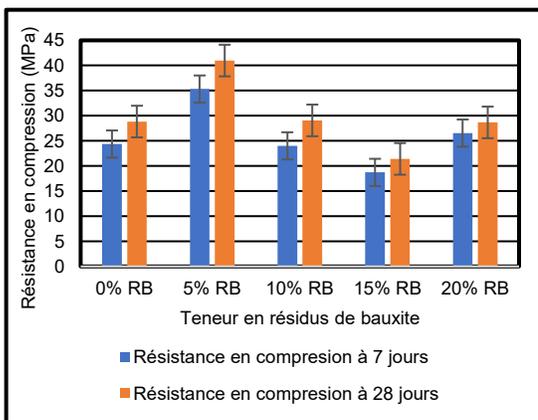
La Figure 3.9 présente la résistance moyenne (moyenne de 3 cylindres) en compression du béton partiellement remplacé à divers pourcentages de résidus de bauxite de différents calibres. Les résultats montrent que la résistance du béton de résidus de bauxite augmente avec l'augmentation de la teneur en résidus. Les effets de la teneur en résidus de bauxite sur l'amélioration de la résistance en compression étaient plus prononcés pour des taux de 5%, 10% pour les quatre différents calibres, alors que la résistance en compression diminue au fur et à mesure que leur contenu de résidus augmente à des teneurs plus élevées pour les mélanges de 300 μm . Cette observation est analogue aux études menées par Illavarason et al. (2018). La résistance du béton de résidus de bauxite pour tous les mélanges testés varie de 21,4 MPa à 41,0 MPa après 28 jours de durcissement, ce qui signifie une diminution de 23% et une augmentation de 45% par rapport à leur béton témoin, respectivement. En revanche, pour les séries de 600 μm , 2 mm et sous forme de boue, la résistance est très variable en fonction de la teneur en résidu. Cependant, jusqu'à 20% de remplacement, le béton présente une résistance en compression semblable au béton témoin de ciment Portland, sans résidus de bauxite.



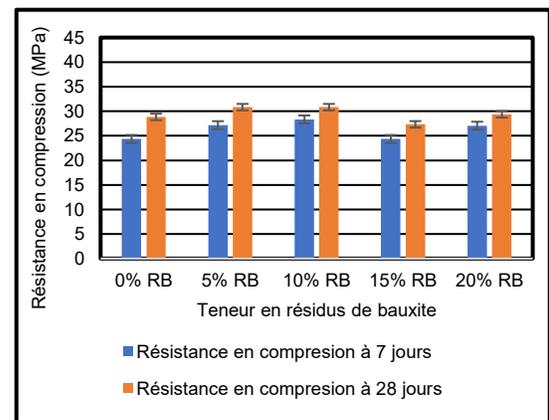
a



b



c



d

Figure 3.9 : Résistance à la compression uniaxiale mesurée sur cylindre, pour différentes durées de cure et pour une taille maximale des particules sèches de résidus de bauxite de : a) 300 µm, b) 600 µm, c) 2 mm et d) sous forme brute boue rouge.

La Figure 3.10 montre des exemples de fractures des bétons de résidus de bauxite en fonction de la teneur en résidus de bauxite. Il peut être constaté qu'avec les 5% et 10% de résidus de bauxite le béton a eu beaucoup de cassures fraîches au niveau du gravier. En revanche, pour les 15% et 20%, beaucoup plus d'arrachements de la pâte de béton peut être constatée.



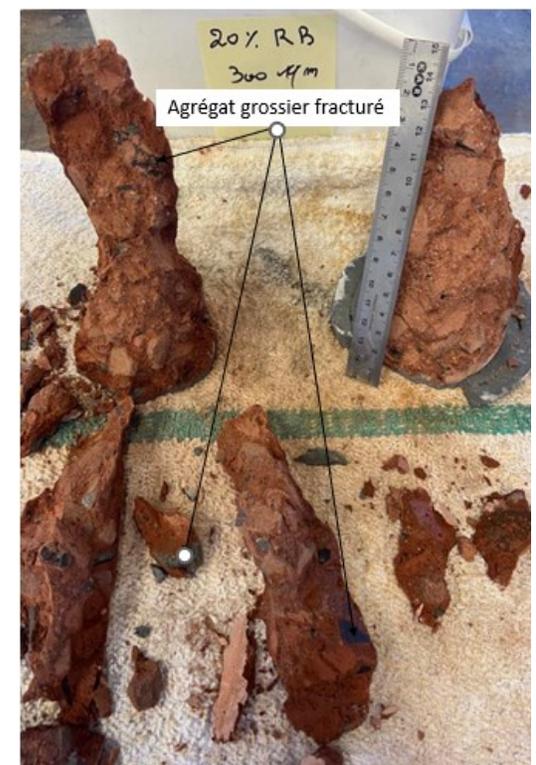
a



b



c



d

Figure 3.10 : Photo d'une éprouvette typique après la rupture par l'essai de compression pour des teneurs de : a) 5%, b) 10%, c) 15% et d) 20%.

La Figure 3.11 présente le taux de murissement du béton de résidus de bauxite et de béton témoin entre la septième et la vingt huitième journée pour tous les mélanges. Selon la norme CSA A23.3 (2019) le béton conventionnel atteint à 7 jours environ 80% de sa résistance à la compression mesurée à 28 jours. Dans cette étude, le béton témoin de ciment, sans résidus de bauxite a montré une augmentation de 84% de sa résistance à la compression de 7 à 28 jours. En comparaison, le béton de résidus de bauxite développe un murissement plus rapide pouvant atteindre 93% de sa résistance à la compression prévue à 28 jours après seulement 7 jours. En revanche, il ne semble pas y avoir de tendance claire de l'effet du calibre des particules de résidus de bauxite sur le taux de murissement tel qu'observé à la Figure 12.

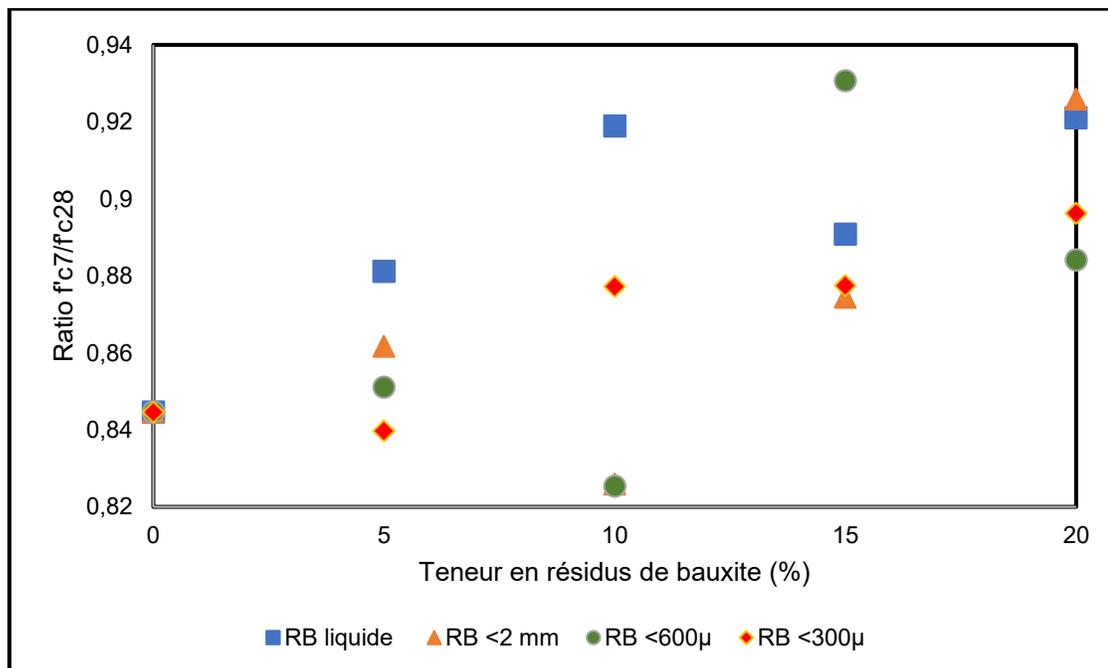


Figure 3.11 : Taux de murissement du béton en fonction du temps.

Le Tableau 3.3 compare les résistances moyennes à la compression mesurées à celles prédites avec l'équation (3.2) de la résistance en compression donnée par la norme « fib model code for concrete structures 2010 ». Les résultats montrent que la valeur de la résistance prédite des bétons de résidus de bauxite ainsi que le béton témoin est toujours supérieure à la valeur expérimentale moyenne mesurée. L'erreur obtenues entre les valeurs de la résistance en compression prédite par l'équation (3.2) et les résultats expérimentaux montre qu'il existe une certaine différence tout en augmentant les teneurs en résidus de bauxite et la durée de cure.

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f'_c \quad (3.2)$$

Avec

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (3.3)$$

Avec laquelle (f'_c) est la résistance moyenne en compression à un âge (t) en jour peut être estimée par ($f_c(t)$), selon l'équation. (3.2). Le $\beta_{cc}(t)$ est une fonction pour décrire le développement de la résistance avec le temps qui dépend de deux paramètres, où le (t) dépend de l'âge de béton en jours et le (s) est un coefficient qui dépend de la classe de la résistance du ciment, où la valeur de s varie entre 0,20 et 0,38, le ciment utilisé dans cette étude est d'une valeur de $s = 0,25$.

Tableau 3.3 : Résistance à la compression moyenne mesurée expérimentalement et prédite par la norme fib model code for concrete structures 2010.

Résistance en compression (RB < 300 µm)		0%	5%	10%	15%	20%
7 Jours	Expérimental (MPa)	24,4	26,6	29,6	24,1	23,4
28 Jours	Prédiction (MPa)	31,2	34,1	38,0	30,9	30,1
	Expérimental (MPa)	28,8	31,6	33,7	27,5	26,1
	Erreur (%)	7,7	7,3	11,3	11,0	13,3
90 Jours	Prédiction (MPa)	32,2	35,3	37,6	30,7	29,2
	Expérimental (MPa)	30,9	33,6	37,3	29,2	28,8
	Erreur (%)	4,1	4,8	0,8	4,9	1,4
180 Jours	Prédiction (MPa)	33,6	36,9	39,3	32,0	30,5
	Expérimental (MPa)	31,5	33,8	38,3	30,5	29,7
	Erreur (%)	6,3	8,4	2,5	4,7	2,6

Afin de prédire précisément la résistance à la compression des bétons de résidus de bauxite. Une relation entre le paramètre s de l'équation (3.3) et la teneur en résidus de bauxite a été défini à partir des résultats expérimentaux. La Figure 3.12 présente la valeur du coefficient s optimal en fonction de la teneur en résidus de bauxite. Les résultats montrent que la valeur de s diminue avec l'augmentation de la quantité de résidus de bauxite dans le béton qui veut dire que la cure du béton est plus rapide avec l'augmentation de la teneur en résidus de bauxite. D'après la Figure 3.12 il peut être conclu qu'il y'a une relation linéaire entre le coefficient s et la teneur en résidus de bauxite avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,65$ défini par la relation (3.4), où RB est la teneur en résidus de bauxite exprimée en %. Cette relation est valable pour la plage de données expérimentales de teneur en résidus de bauxite.

$$s = 0.17 - 0.14 (RB) \quad (3.4)$$

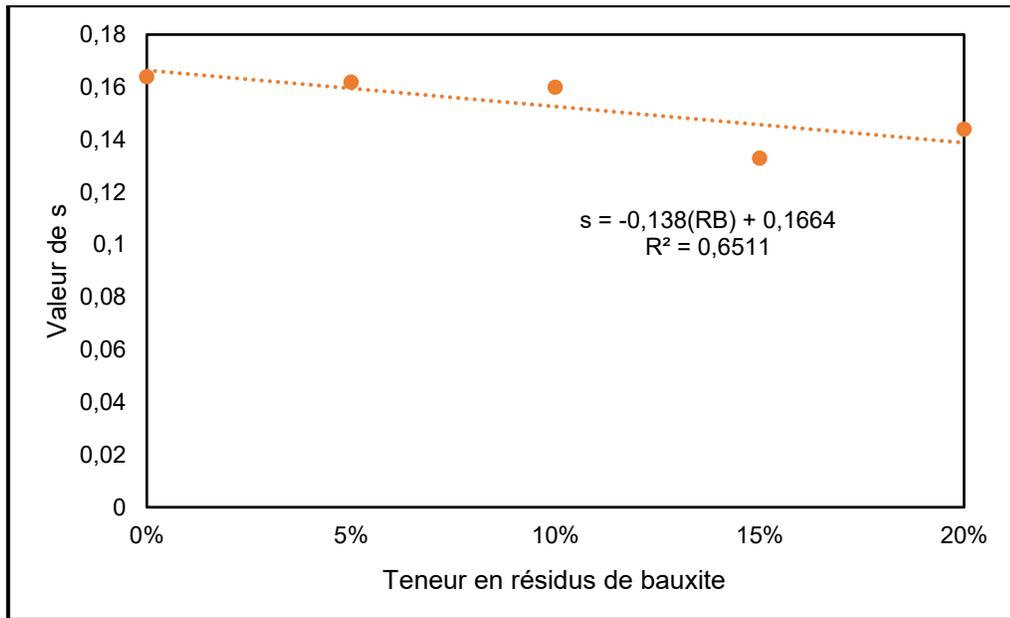


Figure 3.12 : Valeur du paramètre s en fonction de la teneur en résidus de bauxite à 7 jours.

- **Résistance en traction**

La résistance à la traction indirecte a été déterminée par l'essai brésilien à 28 jours, selon la norme CSA A23.2 (2019). La Figure 3.13 montre la résistance en traction pour les mélanges de 300 µm et le béton témoin après 28 jours de durcissement. En comparant les résistances à la traction mesurées à celles mesurées en compression (Figure 3.9a), il est possible d'observer que la résistance à la traction représente environ 10% de la résistance en compression. Une légère augmentation de la résistance à la traction est observée pour les mélanges contenant 5% et 10% de résidus de bauxite, avec une augmentation de 0,2 MPa et 0,4 MPa comparativement au mélange témoin de béton de ciment Portland,

respectivement. Pour des teneurs plus élevées de résidus de bauxite de 15 et 20%, la résistance à la traction est d'environ 0,25 MPa inférieure à celle du mélange témoin de béton de ciment.

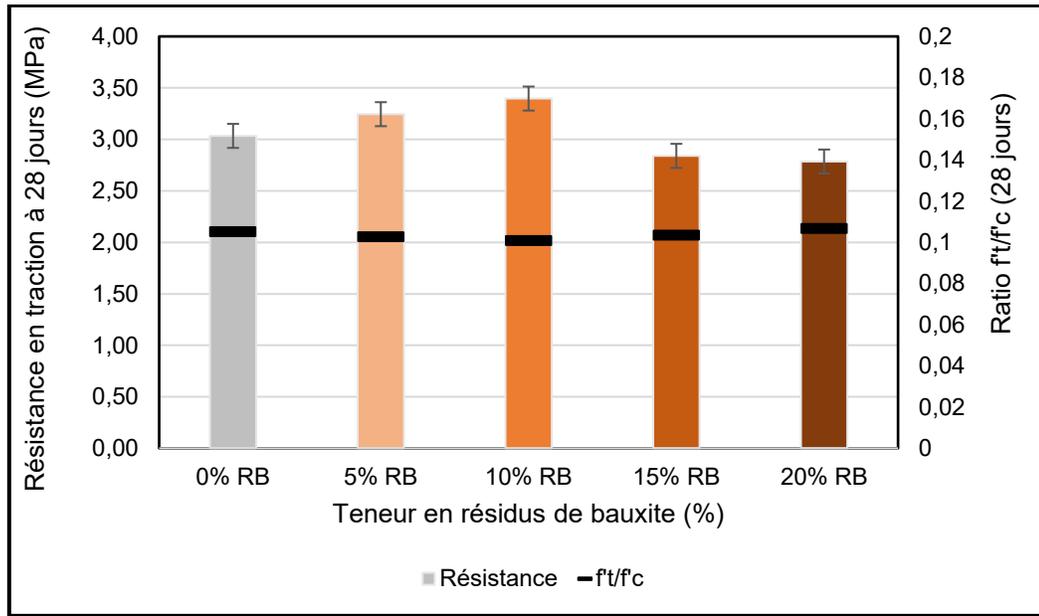


Figure 3.13 : Résistance en traction à 28 jours (RB < 300 μ m).

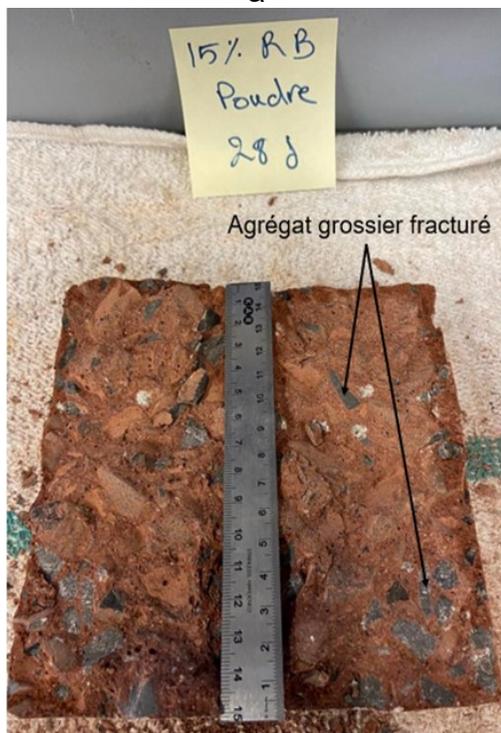
Sur la Figure 3.14 il est possible de voir les ruptures en fonction de la teneur en résidus de bauxite pour les mélanges de 300 μ m. Il peut y être constaté que les mélanges de 5% et 10% de résidus de bauxite présentent plus de cassures du granulat grossier que les mélanges de 15% et 20% de résidus de bauxite, pour lesquels leur arrachement à la pâte de béton est plus fréquent.



a



b



c



d

Figure 3.14 : Photo d'une éprouvette typique après la rupture par l'essai brésilien pour des bétons de résidus de bauxite de 300 μ m à différentes teneurs : a) 5%, b) 10%, c) 15% et d) 20%.

Les résultats de la résistance en traction directe (f_{ct}) prédite par l'équation (3.5) (Massicotte, 2017) ainsi que les résultats expérimentaux obtenus pour différentes teneurs en résidus de bauxite sont présentés dans le Tableau 3.4. L'erreur entre la valeur calculée théoriquement selon la norme CSA et les résultats expérimentaux est généralement faible.

$$f_{ct} = 0.53 \sqrt{f'_c} \quad (3.5)$$

Tableau 3.4 : Résistance à la traction moyenne mesurée expérimentalement et prédite par l'équation 3.5

Résistance en Traction (RB < 300 µm)	Prédiction (MPa)	Expérimental (MPa)	Erreur %
0%	2,85	3,03	5,94
5%	3,02	3,25	7,07
10%	3,10	3,40	8,82
15%	2,78	2,84	2,11
20%	2,71	2,79	2,86

- **Module d'élasticité**

La Figure 3.15 présente le module d'élasticité tangent déterminé sur les différentes éprouvettes lors des essais de compression uniaxiale, après différentes durées de cure et pour différentes teneurs et calibres de résidus de bauxite utilisés dans les mélanges. Le module d'élasticité a été déterminé à 7, 28, 90 et 180 jours pour la série de 300 µm, alors que pour les séries de 600 µm, 2 mm et liquide, les tests ont été effectués à 7 et 28 jours. Selon ces résultats, il peut être conclu que l'augmentation de la quantité de résidus de bauxite dans le béton n'a qu'un effet négligeable sur le module l'élasticité des mélanges. En effet, les mélanges de la

série de 300 μm ont montré une diminution remarquable après 28 jours par rapport au reste des mélanges, la baisse obtenue est d'environ 2 GPa pour tous les mélanges de la série de 300 μm . Après cela, le module a en moyenne augmenté de 4 GPa à 90 jours, suivi d'une légère diminution à 180 jours (voir Figure 3.15a). La Figure 3.15b présente les résultats du module d'élasticité de la série de 600 μm , il est constaté que seulement avec les 10% de résidus de bauxite le module d'élasticité a baissé avec le temps. En revanche, le module d'élasticité des mélanges de 5% 15% et 20% a eu un gain de rigidité avec le temps. En ce qui concerne les séries de 2 mm et les résidus de bauxite liquide, le module d'élasticité a augmenté avec le temps (voir Figure 3.15c et Figure 3.15d).

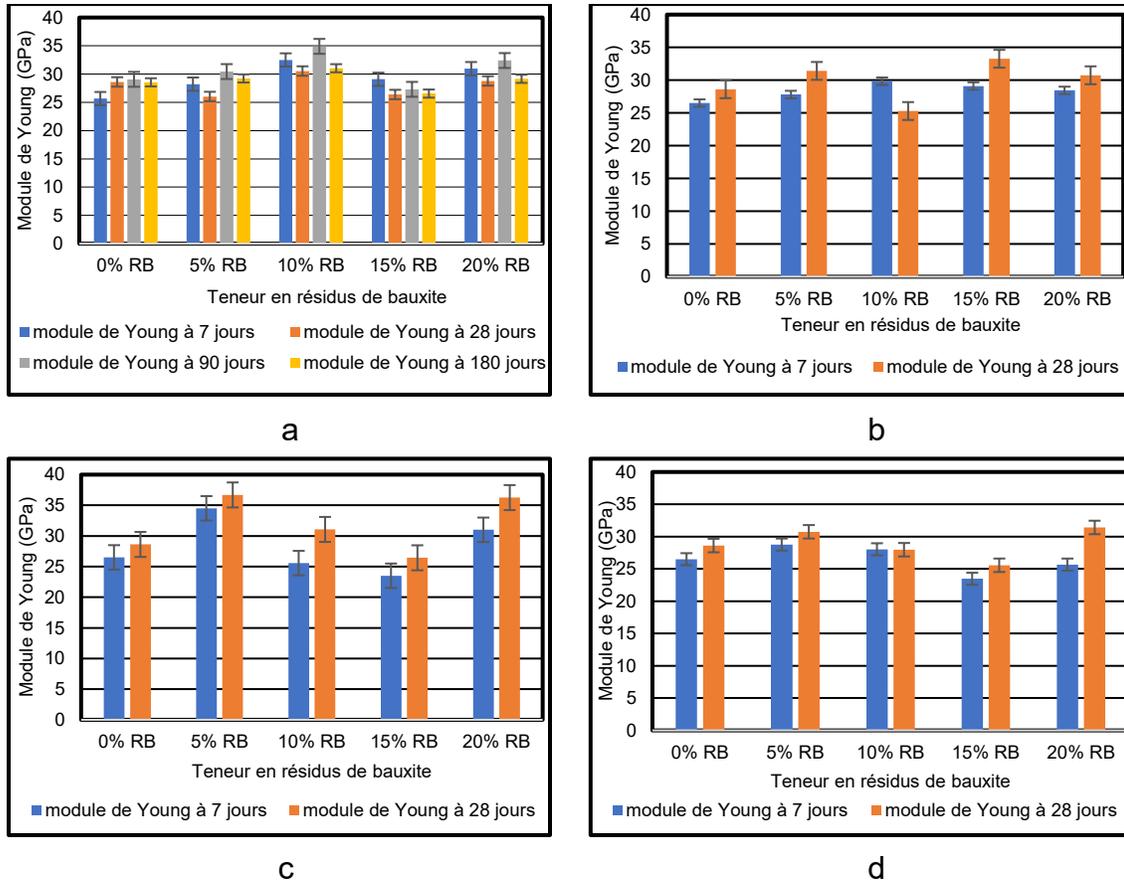


Figure 3.15 : Module d'élasticité mesuré sur cylindre à différents temps de cure pour une taille maximale de particules de résidus de bauxite sèche de : a) 300 μm, b) 600 μm, c) 2 mm et d) pour des résidus de bauxite liquide.

Le Tableau 3.5 présente le module d'élasticité calculé selon la norme CSA A23.2 (2019) par l'équation (3.6). Les résultats montrent que la valeur du module élastique prédite est toujours inférieure à la valeur expérimentale mesurée. L'erreur entre les valeurs des modules élastiques obtenues montre qu'il existe une certaine erreur tout en augmentant les teneurs en résidus de bauxite et la durée de cure.

$$E_c = 4500 \sqrt{f'_c} \quad (3.6)$$

Tableau 3.5 : Module élastiques moyens déterminés expérimentalement et prédits par l'équation 3.6.

Module d'élasticité E_c (RB < 300 μm)		0%	5%	10%	15%	20%
7 Jours	Prédiction (MPa)	23,2	23,9	24,8	23,1	22,9
	Expérimental (MPa)	25,7	28,2	32,5	29,1	31,0
	Erreur (%)	9,73	15,25	23,69	20,62	26,13
28 Jours	Prédiction (MPa)	24,6	25,5	26,1	24,2	23,8
	Expérimental (MPa)	28,6	26,0	30,5	26,4	28,8
	Erreur (%)	13,99	1,92	14,43	8,33	17,36
90 Jours	Prédiction (MPa)	25,2	26,0	27,0	24,7	24,6
	Expérimental (MPa)	29,1	30,4	34,9	27,3	32,4
	Erreur (%)	13,40	14,47	22,64	9,52	24,07
180 Jours	Prédiction (MPa)	25,4	26,1	27,3	25,1	24,9
	Expérimental (MPa)	28,5	29,2	31,0	26,6	29,2
	Erreur (%)	10,88	10,62	11,94	5,64	14,73

Afin de minimiser l'erreur du module d'élasticité du béton de résidus de bauxite, l'équation (3.7) a été déterminée à partir des résultats expérimentaux de la résistance en compression et du module d'élasticité correspondant, pour chacun des spécimens testés pour tous les mélange et à tous les âges de cure, tout en divisant la valeur du module d'élasticité par la racine carrée de la résistance en compression. Une valeur moyenne de 5200 est obtenue.

$$E_c = 5200 \sqrt{f'_c} \quad (3.7)$$

Typiquement, les ingénieurs utilisent la résistance à la compression mesurée uniaxialement sur cylindre et augmentée de puissance $\frac{1}{2}$ afin d'estimer le module

d'élasticité du béton. La Figure 3.16 présente la relation entre le module d'élasticité et la racine carrée de la résistance en compression. Les résultats montrent que les mélanges testés dans cette étude sont généralement plus rigides que les prédictions normatives prévues par le modèle de la norme ACI 363 (équation 3.8) et le modèle de la norme CSA A23.3 (2019) donné par l'équation (3.6). En raison de la faible gamme de résistances à la compression testées (f'_c variant entre 21 et 41 MPa à 28 jours), il est difficile d'établir une relation entre la teneur en résidus de bauxite, la résistance en compression et le module d'élasticité. Néanmoins, la dispersion obtenue est similaire à celle observée sur les bétons conventionnels de ciment Portland (Paultre, 2017).

$$E_c = (3300\sqrt{f'_c} + 6900) \left(\frac{\gamma_c}{2300} \right)^{1.5} \quad (3.8)$$

Avec

E_c : Le module d'élasticité en (GPa)

f'_c : La résistance à la compression en (MPa)

γ_c : La masse volumique (Kg/m^3)

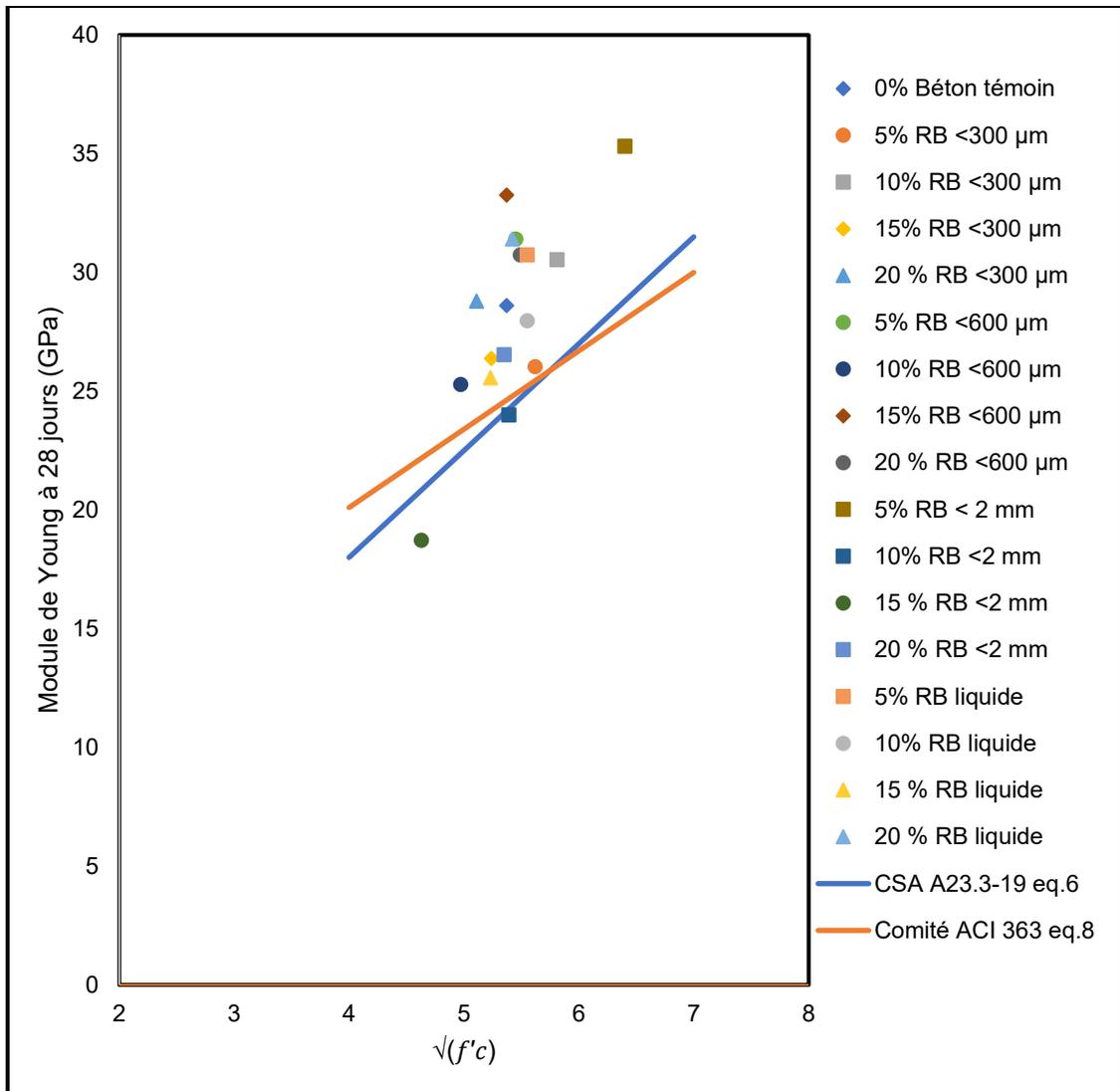


Figure 3.16 : Module d'élasticité en fonction de la résistance en compression.

- **Coefficient de Poisson**

Le coefficient de Poisson est estimé à une valeur moyenne de 0,20 selon la norme « fib model code for concrete structures 2010 » et la norme CSA A23.2 (2019). Selon les résultats de cette étude, la teneur en résidus de bauxite n'a eu que peu d'effet sur le coefficient de Poisson. Les différents coefficients de Poisson des mélanges déterminés expérimentalement pour chacun des teneurs de résidus de

bauxite de 300 μm présentés dans la Figure 3.17 montrent que les valeurs du coefficient de Poisson pour tous les mélanges se situent entre 0,17 et 0,18, ce qui est égal ou inférieure à la valeur déterminée pour le béton témoin de 0,18.

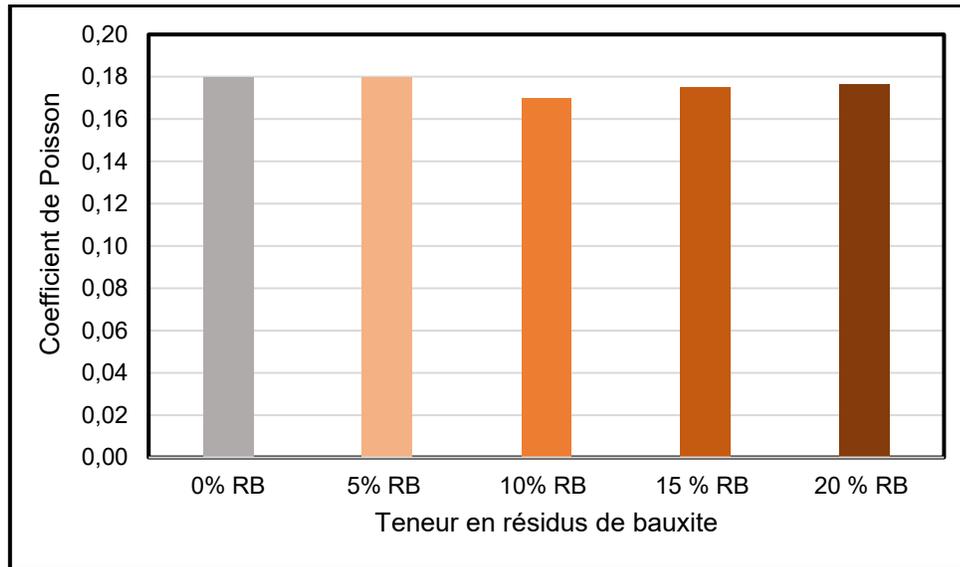


Figure 3.17 : Coefficient de Poisson à 28 jours (RB < 300 μm).

- **Porosité**

La variation de la porosité accessible à l'eau selon la teneur en résidus de bauxite est présentée à la Figure 3.18. Les résultats montrent que la porosité du béton témoin est d'environ 9,5%. En revanche, l'ajout de résidus de bauxite permet de réduire la porosité entre 7,5 et 9%.

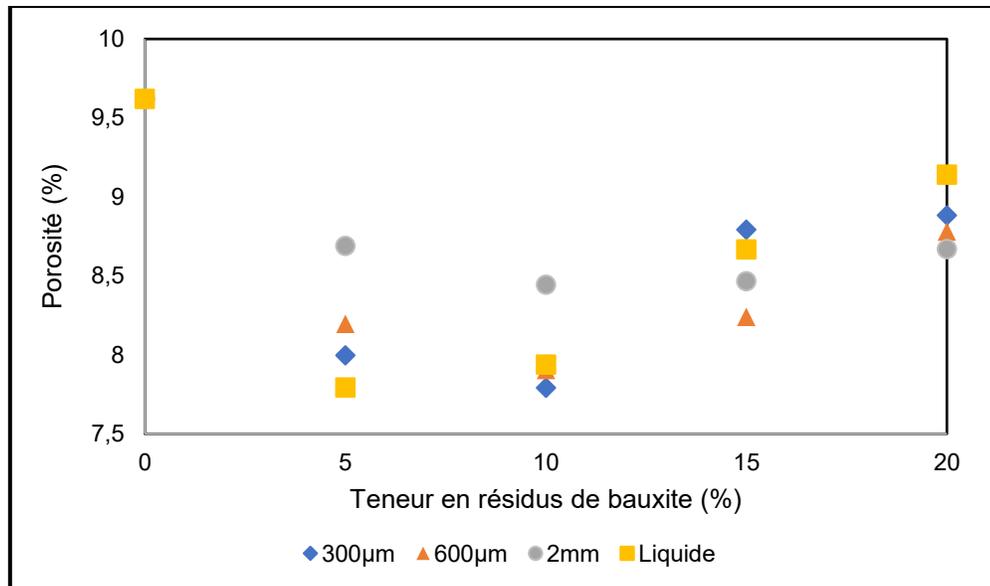


Figure 3.18 : Porosité accessible à l'eau du béton de résidus de bauxite.

3.5. Conclusions

Dans ce chapitre, la méthodologie ainsi que les résultats et la discussion des tests et des analyses de l'influence du pourcentage et du calibre de résidus de bauxite sur les propriétés fraîches et durcies du béton ont été présentés. De cela les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. Lors des mesures de caractérisation du béton frais sur les différentes recettes développées dans ce projet, les résultats obtenus ont montré que la substitution des résidus de bauxite par du ciment dans la formulation de béton réduit légèrement la fluidité et la teneur en air ;
2. Les bétons de résidus de bauxite ont eu une augmentation plus rapide de la résistance à la compression dans le jeune âge par rapport au béton normal ;

3. Le calibre du grain et la teneur en résidus de bauxite influent sur la résistance du béton. La valeur optimale de résidus de bauxite de 300 μ m dans le béton est de 10% par rapport à la quantité du ciment ;
4. Les résistances en traction étaient quasi similaires à celles des bétons conventionnels. Les mêmes teneurs en résidus de bauxite qui ont donné de bonnes résistances en compression ont donné une bonne résistance en traction ;
5. Les résidus de bauxite peuvent être utilisés efficacement comme matériau de remplacement jusqu'à 20% de la quantité de ciment, ce qui permet une grande utilisation de déchets. Jusqu'à ce pourcentage, les résidus de bauxite n'ont pas d'effet négatif sur les propriétés mécaniques du béton, plutôt la qualité du béton est améliorée en réduisant le temps de prise et en augmentant la résistance en compression et en traction.

3.6. Références

- Al-Amoush, H., & Rajab, J. A. (2018). The use of Electrical Resistivity Tomography to investigate basaltic lava tunnel based on the case study of Al-Badia cave in Jordan. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(2), 161-177.
- Anagnostopoulos, A., Navarro, M. E., Stefanidou, M., Ding, Y., & Gaidajis, G. (2021). Red mud-molten salt composites for medium-high temperature thermal energy storage and waste heat recovery applications. *J Hazard Mater*, 413, 125407. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.125407
- Atan, E., Sutcu, M., & Cam, A. S. (2021). Combined effects of bayer process bauxite waste (red mud) and agricultural waste on technological properties of fired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 43. doi:10.1016/j.jobbe.2021.103194
- Bayat, A., Hassani, A., & Azami, O. (2018). Thermo- mechanical properties of alkali-activated slag–Red mud concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 21(2), 411-433. doi:10.1080/14680629.2018.1500299
- Hong, Q., Wang, P., Chen, Z., Huang, Z., Shen, L., & Song, T. (2021). Evaluation of red mud as oxygen carrier for chemical looping combustion of methane and biomass in fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 222. doi:10.1016/j.fuproc.2021.106964
- Illavarason, P., & Renjit, A. (2018). Clinical evaluation of functional vision assessment by utilizing the visual evoked potential device for cerebral palsy rehabilitation. *Procedia Computer Science*, 132, 128-140.
- Kumar, A., & Kumar, S. (2013). Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. *Construction and Building Materials*, 38, 865-871. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013

- Liu, Han, Y., He, F., Gao, P., & Yuan, S. (2021). Characteristic, hazard and iron recovery technology of red mud - A critical review. *J Hazard Mater*, 420, 126542. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.126542
- Liu, R.-X., & Poon, C.-S. (2016). Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 384-391. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.049
- Massicotte, B. (2017). *Calcul de structure en béton armé - Concepts de base* (4^{ème} édition ed.).
- Milacic, R., Zuliani, T., & Scancar, J. (2012). Environmental impact of toxic elements in red mud studied by fractionation and speciation procedures. In *Sci Total Environ* (Vol. 426, pp. 359-365). Netherlands.
- Panda, I., Jain, S., Das, S. K., & Jayabalan, R. (2017). Characterization of red mud as a structural fill and embankment material using bioremediation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 368-376. doi:10.1016/j.ibiod.2016.11.026
- Paramguru, R. K., Rath, P. C., & Misra, V. N. (2004). Trends in Red Mud Utilization – a Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 26(1), 1-29. doi:10.1080/08827500490477603
- Patel, S., & Pal, B. (2015). Current status of an industrial waste: red mud an overview. *Ijltemas*, 4(8), 1-16.
- Paultre, P. (2017). *Structures en béton armé - 2e édition*. Presses internationales Polytechnique.
- Shetty, K. K., Nayak, G., & Vijayan, V. (2014). Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of selfcompacting concrete. *European Scientific Journal*, 10(21).

- Sun, Y., Li, J.-s., Chen, Z., Xue, Q., Sun, Q., Zhou, Y., . . . Poon, C. S. (2021). Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash: Mechanism and optimization. *Construction and Building Materials*, 287. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122993
- Sunitha, M.Pujar, & Dr.K.B.Prakash. (2014). <Effect-of-Replacement-of-Cement-by-Red-mud-on-the-Properties-of-Concrete.pdf>. *International Journal of Scientific & Engineering Research*.
- 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. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125136
- Ye, J., Hu, A., Ren, G., Chen, M., Tang, J., Zhang, P., . . . He, Z. (2018). Enhancing sludge methanogenesis with improved redox activity of extracellular polymeric substances by hematite in red mud. *Water research*, 134, 54-62.
- Yuan, S., Liu, X., Gao, P., & Han, Y. (2020). A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud. *J Hazard Mater*, 394, 122579. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122579

CHAPITRE 4

CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT EN COMPRESSION DU BÉTON DE RÉSIDUS DE BAUXITE

4.1. Introduction

La relation contrainte-déformation (f_{ci} , ε_{ci}) pour le béton non confiné est une propriété matérielle fondamentale pour la conception et l'analyse d'éléments structuraux (Almusallam et al., 1995 ; Bae et al., 2016 ; Yang et al., 2014). Généralement, dans la relation contrainte-déformation, les branches ascendantes et descendantes sont dépendantes du type de béton, de la résistance à la compression, ainsi que du mécanisme de défaillance de béton. D'un point de vue pratique, c'est à partir de la force ultime de la conception des éléments que la relation contrainte-déformation a été mise au point. Aussi, la connaissance de la déformabilité du béton est nécessaire, par exemple pour calculer les flèches, les contraintes déformations observées, concevoir des sections structurelles, calculer la perte de précontrainte dans les éléments précontraints, etc. Jansen et al. (1997).

Avant d'analyser le comportement pré-pic et post-pic du béton en compression, il faut avoir une bonne connaissance des étapes par lesquelles passe le matériau avant de se rendre au pic de charge. Selon Paultre (2017), la courbe contrainte-déformation d'un béton normal présente un comportement relativement linéaire jusqu'à un niveau de contrainte d'environ $0,4 f'_c$. Le module d'élasticité tangent peut être déterminé à partir d'un point quelconque de la pente de cette partie (courbe bleu sur la figure 4.1). Au-delà de $0,4 f'_c$, des microfissures se développent dans le béton et le comportement devient fortement non linéaire. La courbe monte

à un sommet égal à la contrainte de compression maximale, f'_c , correspondant à un niveau de déformation au pic (ε_p), typiquement estimé égal à 0,0020 mm/mm pour un béton de ciment Portland de résistance normale (f'_c entre environ 20 et 60 MPa). Le module d'élasticité sécant est égal à la contrainte maximale divisée par la déformation au pic. Il est aussi appelé « rapport de contrainte déformation ». Une fissure localisée et un déchargement élastique peuvent être observés dans cette région. De plus, une déformation ne peut pas être correctement définie au niveau de la fissure. La courbe contrainte-déformation typique du béton en compression est illustrée à la Figure 4.1.

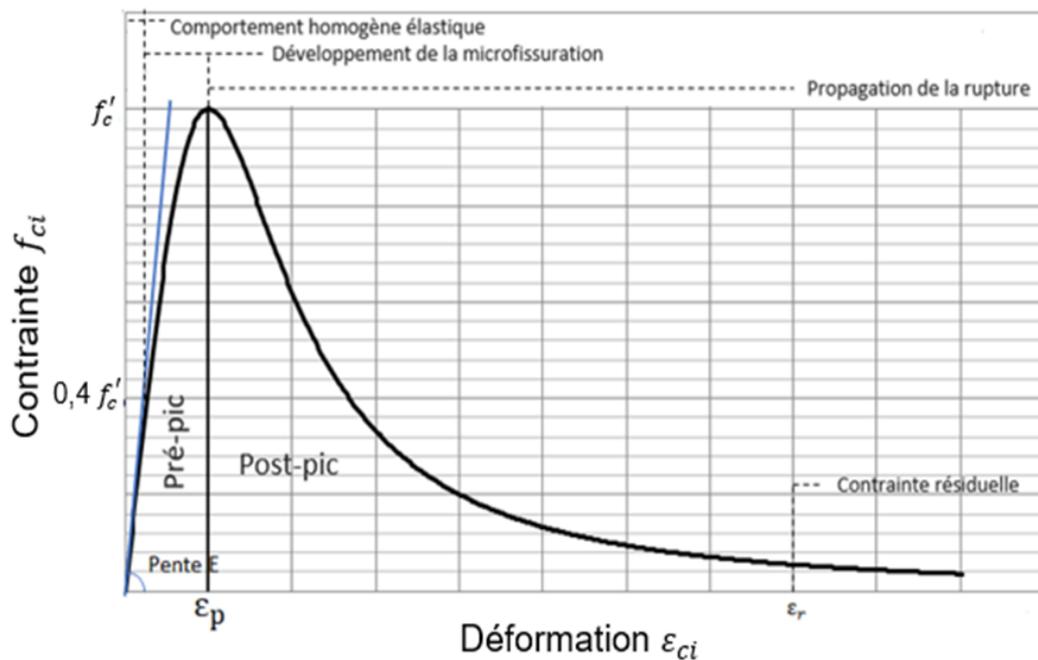


Figure 4.1 : Réponse contrainte-déformation typique du béton de ciment Portland sous compression uniaxiale.

Certains chercheurs ont observé que la réponse contrainte-déformation sous compression uniaxiale peut être influencée par le taux et la durée de chargement, la taille et la forme de l'éprouvette d'essai ainsi que l'âge et la composition du béton

(Newman et al., 2003). Ces paramètres sont donc balisés par différentes normes spécifiques aux essais de compression uniaxiale sur béton (CSA A23.1., 2019 ; CSA A23.2., 2019 ; ASTM C39., 2020).

Pour un béton conventionnel, le comportement du béton en compression uniaxiale peut être intégré à une loi contrainte-déformation comme suit :

$$f_{ci} = (1 - A) \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right) f'_c \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right)^n} \leq A f'_c \quad (4.1)$$

Où :

f_{ci} : Contrainte de compression principale

ε_{ci} : Déformation principale en compression

f'_c : Résistance au pic

ε_p : Déformation au pic

A : Facteur de la résistance résiduelle

n : Paramètre d'ajustement de courbe

À ce jour, plusieurs chercheurs ont proposé différents modèles de comportement permettant de prédire la réponse contrainte-déformation du béton sous sollicitation uniaxiale f_{ci} . Par exemple, Popovics (1973) a fait son étude pour une gamme de béton à résistance normale ($20 \leq f'_c \leq 60$) afin de déterminer la partie pré-pic et post-pic de la courbe contrainte déformation (Equation 4.2).

$$f_{ci} = \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right) f'_c \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right)^n} \quad (4.2)$$

$$n = \frac{E_c}{E_c - \left(\frac{f'_c}{|\varepsilon_p|} \right)} \quad (4.3)$$

Collins et al. (1989) ont modifié le modèle proposé par Popovics (1973) pour des bétons à haute résistance en compression ($f'_c \geq 60$ MPa, Equation 4.4) :

$$f_{ci} = \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right) f'_c \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right)^{nk}} \quad (4.4)$$

Où n est évalué avec l'équation (4.5), $k = 1$ avant le pic et est évalué avec l'équation (4.6) après le pic.

$$n = 0,80 + \frac{f'_c}{17} \quad (4.5)$$

$$k = 0,67 + \frac{f'_c}{62} \geq 1,0 \quad (4.6)$$

Le modèle de Hoshikuma et al. (1997) a initialement été développé pour les poteaux en béton subissant un certain niveau de confinement. Le comportement pré-pic est alors donné par l'équation (4.7) alors que le comportement post-pic est donné par l'équation (4.8).

$$f_{ci} = E_c \cdot \varepsilon_{ci} \left(1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right)^{n-1} \right) \quad (4.7)$$

$$f_{ci} = [f'_c + 0,5E_c(\varepsilon_{ci} - \varepsilon_p)] \geq 0,2f'_c \quad (4.8)$$

Où n est évalué par l'équation (4.3) donnée par Popovics (1973).

Le comportement du béton en compression évalué selon les trois modèles présentés aux équations (4.2) à (4.8) est comparé à la Figure 4.2 ($f'_c = 30$ MPa). Avant le pic, les trois modèles de comportement présentent une allure similaire.

Après l'atteinte de la charge maximale, le modèle de Hoshikuma et al. (1997) présente une chute de résistance suivi par une contrainte résiduelle égale à 20% de la contrainte maximale f'_c . Le modèle de Popovics (1973) et Collins et al. (1989) (Popovics modifié) ont présentés une meilleure tendance de la courbe contrainte déformation.

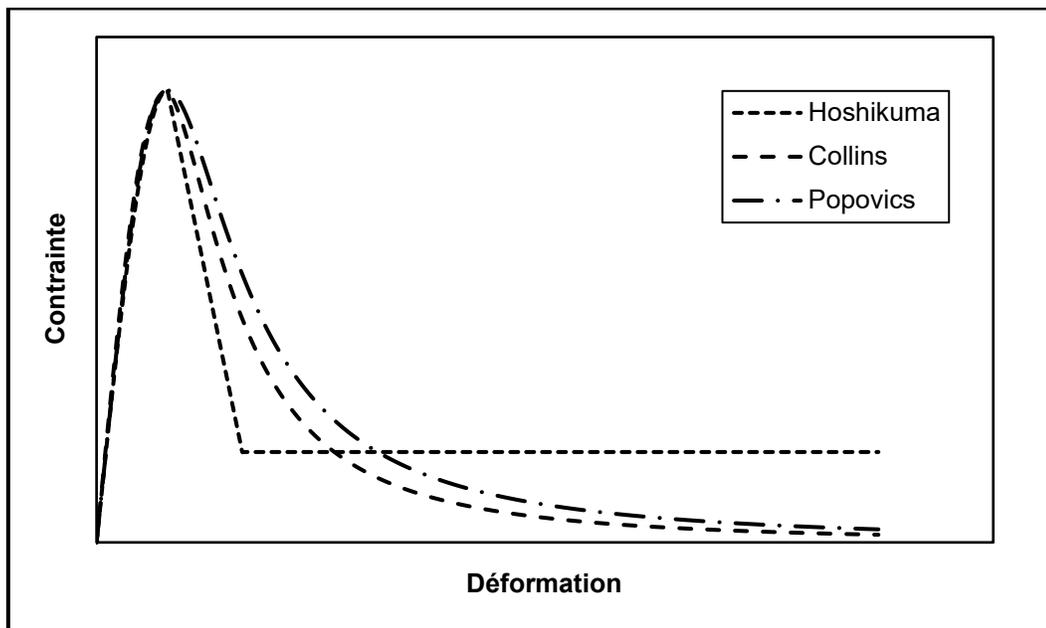


Figure 4.2 :Comportement du béton en compression selon différentes lois.

L'objectif de cette étude est de proposer un modèle de comportement contrainte-déformation simple et pratique pour un béton enrichi de résidus de bauxite à différents pourcentages. Dans cette étude, le modèle de base de la courbe contrainte-déformation est établi par Popovics (1973), c'est la formulation clé qui détermine les pentes des partie ascendantes et descendantes. Dans le comportement d'adoucissement de la branche descendante de la courbe contrainte-déformation, l'effet de résidus de bauxite a été considéré en utilisant le modèle de Popovics (1973). Le paramètre clé du comportement d'adoucissement a été

déterminé par la pente de la partie descendante de la courbe contrainte-déformation. Enfin, les courbes de contrainte-déformation de la partie post pic ont été formulées en fonction de la pente de la partie descendante, la teneur en résidus de bauxite, la résistance et la déformation au pic. La précision du modèle proposé a été évaluée à l'aide d'une erreur quadratique moyenne normalisée obtenue à partir de comparaisons des courbes prédites avec les résultats des tests.

4.2. Méthodologie expérimentale

4.2.1. Système de chargement, installation et système de mesure

Comme mentionné dans le chapitre 3, les cylindres de béton ont été testés sous compression uni axiale selon la norme CSA (2019) à l'aide de la machine d'essai MTS Criterion Model 64 ayant une capacité de 1000 kN. Les éprouvettes ont été chargés par deux méthodes. La première méthode a suivi fidèlement la procédure décrite dans la norme CSA (2019), avec un taux de chargement de 1,14 kN/s et une précharge de 0,8 kN. Pour la deuxième méthode, les essais ont été contrôlés en déplacement avec un taux de déplacement de 0,01 mm/s et une précharge de 0,8 kN. Ce taux de déplacement a été calculé de façon à ce que le taux de chargement soit près de 1,14KN/s dans la partie pré-pic, respectant ainsi la norme CSA A23.3. Les courbes de contrainte-déformation pour chaque mélange ont été obtenues en testant les éprouvettes cylindriques de 76,2 mm (3 po) de diamètre par 152,4 mm (6 po) de haut, conformément à CSA (2019) afin de mesurer certaines propriétés mécaniques. Toutes les éprouvettes ont subi une cure humide d'une durée variant de 7 jours à 180 jours avant d'être mises à l'épreuve. Le système

d'acquisition des données de déformation était réalisé avec un extensomètre vertical de 100 mm (Figure 4.3).



Figure 4.3 : Visuels du tests et échantillons.

4.2.2. Matériaux et fabrication des éprouvettes

La conception du mélange a été réalisée conformément à la norme CSA A23.1 (2019). Le mélange de ciment Portland est pris comme mélange de contrôle. Les mélanges de béton étaient confectionnés en remplaçant le ciment par 5%, 10%, 15% et 20% de résidus de bauxite. Pour les mélanges de résidus de bauxite, il a été nécessaire d'augmenter la teneur en eau de 1,5% pour chaque 5% de résidus de bauxite afin de conserver une maniabilité et un affaissement acceptable. Cette eau supplémentaire requise peut s'expliquer par la haute absorption de l'eau par les résidus de bauxite (Tableau 4.1) devant être compensée. Un comportement

similaire a été observé par d'autres chercheurs (Al-Amoush et al., 2018 ; Illavarason et al., 2018 ; Tang et al., 2018).

Tableau 4.1 : Formulation de béton.

	Pourcentage de Résidus de bauxite	Ciment (Kg)	Granulats fins (Kg)	Gros granulats (Kg)	Résidus de bauxite (Kg)	Eau (L)
Béton témoin	00%	370,0	767,5	1151,3	0	166,5
Résidus de bauxite < 300 µm	05%	351,5	766,0	1149,0	18,5	169,0
	10%	333,0	764,5	1146,5	37,0	171,5
	15%	314,5	762,7	1144,0	55,5	174,0
	20%	296,0	761,1	1141,6	74,0	176,5

Note : Pour tous les mélanges, 1,000 L d'agent entraîneur d'air (air-extra), 0.925 L de dispersant (WR-75) et 0.650 L de superplastifiant (eucon-37)

4.3. Résultats

Cette section comprend les résultats des travaux effectués dans le laboratoire et qui sont divisés en deux parties. La première consiste en la confection du béton et la caractérisation du comportement mécanique des différentes formulations à base de résidus de bauxite. Tandis que la deuxième partie est réservée aux résultats de comportement contrainte-déformations.

4.3.1. Propriétés du béton

L'affaissement, la teneur en air et la masse volumique ont été déterminés selon les normes CSA A23.2 et A23.3 (2019). Les valeurs mesurées pour les mélanges sont présentées au Tableau 4.2. Selon la recette développée du béton témoin, les propriétés à l'état frais ont répondu aux exigences de la norme CSA A23.2. Selon le

Tableau 4.2, il est possible de constater que la substitution du ciment par des résidus de bauxite dans le béton réduit l'affaissement et la teneur en air, donc la pâte est plus ferme. Cette observation est similaire à ce que d'autres auteurs ont observé pour des mélanges similaires (Liu et al., 2016). En revanche, le béton de résidus de bauxite a eu un léger gain en masse volumique par rapport au béton témoin.

Tableau 4.2 : Résultats d'essais à l'état frais.

	Affaissement (mm)	Teneur en air (%)	Masse volumique (kg/m ³)
0% RB (OPC)	83	6,0	2276
5% RB < 300 µm	57	5,6	2310
10% RB < 300 µm	64	5,7	2355
15% RB < 300 µm	65	5,6	2296
20% RB < 300 µm	88	5,9	2298

4.3.2. Réponse contrainte déformation

Afin de mesurer précisément la relation contrainte déformation en compression, les essais de compression uniaxiale utilisés dans cette section ont été pilotés en déplacement. D'après la norme canadienne CSA A23.2, un taux de chargement de 1.14 kN/s \mp 1% doit être respecté pour les essais pilotés en charge. Afin de piloter l'essai de compression en déplacement, ce taux a été converti à un taux de chargement, en déplacement, de 0,01 mm/s. La Figure 4.4 présente les courbes contrainte-déformation pilotées en déplacement pour les différents teneurs en résidus de bauxite et les compare à ceux pilotés en chargement. Les résultats montrent que la résistance et la déformation au pic est similaire pour les spécimens de même mélange quel que soit le mode de pilotage. En revanche, les spécimens

pilotés en chargement développent des oscillations au niveau de la phase pré-pic. Cette oscillation est typique du mode de chargement piloté en charge et souligne l'importance d'un pilotage en déplacement afin de mesurer adéquatement la courbe contrainte-déformation.

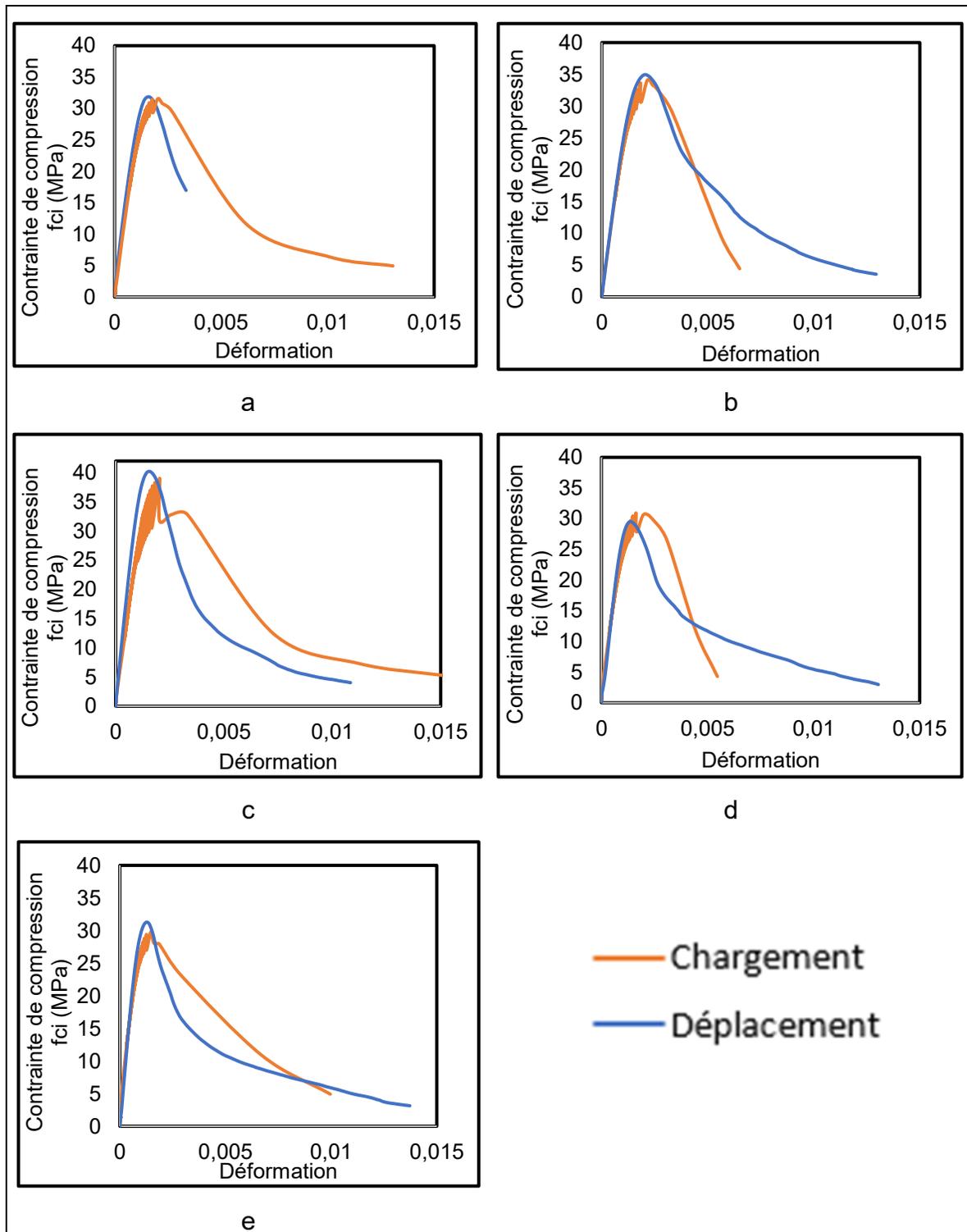


Figure 4.4 : Courbes contrainte-déformation pilotées en chargement et en déplacement pour différentes teneurs en résidus de bauxite : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.

4.3.3. Proposition de modèle pour la courbe contrainte déformation

Le béton peut être qualifié de matériau fragile. En effet, le comportement du béton sous charge est complètement différent de celui des matériaux ductiles comme l'acier. Mais en réalité, le béton diffère des matériaux fragiles idéaux à bien des égards. Dans la mécanique de la rupture moderne, le béton est considéré comme un matériau quasi fragile, cela peut être expliqué sur la base de la fissuration sous-critique qui se produit lors du chargement du béton (Anderson, 2005). La fissuration sous-critique du béton qui précède la rupture ultime entraîne une réponse contrainte-déformation non linéaire et un comportement en courbe R. Ainsi, le béton obtient une dureté à partir d'une rupture sous-critique. Le béton a également une structure hétérogène en raison de la composition inégale des ingrédients qu'il contient (Gross Dietmar et al., 2017). Cela complique également l'analyse du béton.

Le modèle de contrainte-déformation proposé pour le béton non confiné en compression est généralement défini par trois paramètres, comme illustré au Tableau 4.3. Il s'agit de : la résistance maximale (f'_c), la déformation au pic (ϵ_p) et le module d'élasticité (E_c) selon Popovics (1973) et Hoshikuma et al. (1997). En revanche, le modèle modifié par Collins et Porasz est défini par deux paramètres seulement, il s'agit de la contrainte maximale au pic (f'_c) et la déformation de rupture au pic (ϵ_p). Les expressions représentant la relation contrainte-déformation proposée sont mentionnées dans la section (4.1). Il existe un autre paramètre dans la courbe contrainte déformation qui n'était pas pris en considération dans toutes les études précédentes, ce paramètre est la pente de la partie post-pic (Tableau 4.3).

Dans cette étude la pente post-pic été calculée entre 90% et 60% de la contrainte maximale.

Tableau 4.3 : Résultats des courbes contrainte déformation.

Résidus de bauxite	Éprouvette	Résistance f'_c (MPa)	Déformation au pic $\varepsilon_p \times 10^{-3}$	Module élastique E_c (GPa)	Pente post-pic E' (MPa)
0%	1	31,9	1,59	27,6	52,4
	2	30,8	1,17	35,2	96,6
	3	30,5	1,19	35,1	72,3
	4	32,1	1,19	37,3	-
5%	1	34,6	1,63	28,2	-
	2	35,3	1,33	35,0	50,6
	3	35,2	1,31	35,6	76,0
	4	35,0	2,03	23,9	45,7
	5	35,6	1,38	33,7	59,2
	6	33,7	1,31	36,0	34,7
10%	1	37,4	1,75	31,0	71,2
	2	40,2	1,54	35,8	55,2
	3	38,2	1,03	50,3	-
	4	39,6	1,40	38,8	100,1
	5	36,6	1,59	26,5	56,1
	6	38,6	1,17	23,5	-
15%	1	29,3	1,83	34,5	74,4
	2	29,4	1,25	32,6	25,0
	3	29,5	1,36	32,1	42,1
	4	31,6	1,28	37,3	45,3
	5	31,6	1,27	27,0	44,6
20%	1	29,8	1,50	42,3	46,0
	2	29,8	0,89	37,7	42,6
	3	31,3	1,27	37,2	42,8
	4	29,3	1,18	34,1	51,9
	5	32,0	1,32	27,6	98,5

4.3.4. Observations et mode de rupture

La Figure 4.5 présente une comparaison des courbes de contrainte-déformation pour les spécimens du même mélange, les courbes contrainte-déformation subissent une certaine différence dans la phase pré-pic, bien que ce soit la même formulation de béton et que les cylindres eurent subis les mêmes conditions de cure. Il est possible de constater que l'ajout des résidus de bauxite n'exerce que peu d'influence sur la partie pré-pic.

À l'inverse, pour ce qui est de la phase post-pic, les résultats ont montré une grande dispersion allant de l'absence totale de comportement adoucissant (rupture extrêmement fragile) à un comportement très adoucissant avec un bon maintien de la contrainte résiduelle toute en augmentant la quantité de résidus de bauxite. Les spécimens du béton témoin (0% de résidus de bauxite) ont connu en règle générale des ruptures fragiles ou pseudo-fragiles, c'est-à-dire que la courbe s'arrête au pic. En revanche, pour les spécimens de résidus de bauxite, la courbe post-pic s'allonge de plus en plus et la déformation augmente en rajoutant la quantité de résidus de bauxite dans le mélange (Figure 4.5).

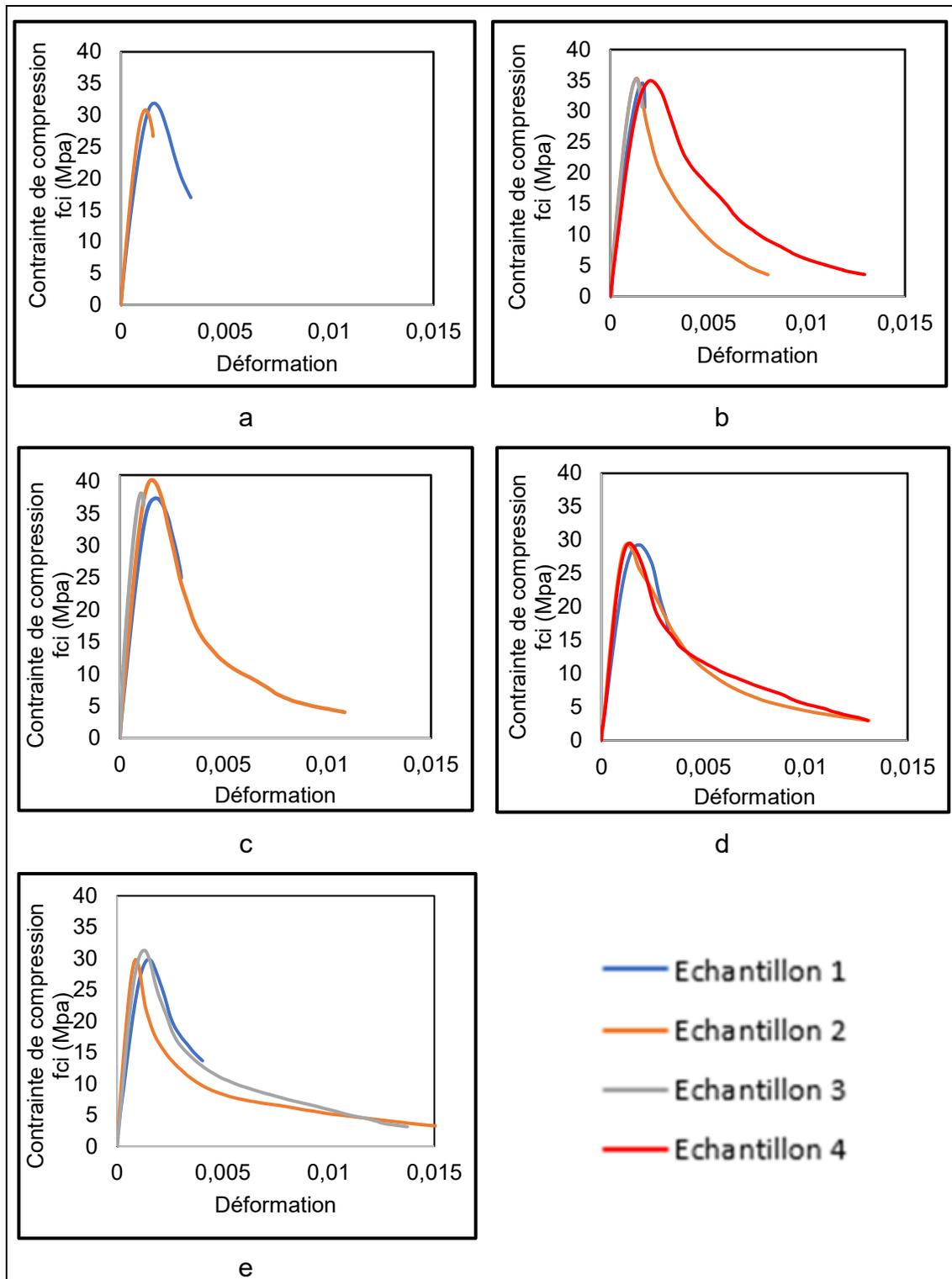


Figure 4.5 : Courbes contrainte-déformation chargée en déplacement pour des teneurs de résidus de bauxite de : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.

Les courbes contrainte déformation ont été normalisées en fonction de leur déformation au pic, soit du ratio $(\frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_p})$ et sont présentées à la Figure 4.6 pour différentes teneurs en résidus de bauxite et pour les essais dont le comportement post-pic a pu être mesuré adéquatement. Cette normalisation permet de mieux comparer les différents types de rupture en fonction de la résistance en compression. Il peut être observé que l'introduction des résidus de bauxite ne semble pas modifier la forme de la courbe établie pour les bétons conventionnels. Plus un béton sera résistant plus la pente post-pic sera élevée, c'est-à-dire plus la rupture sera fragile.

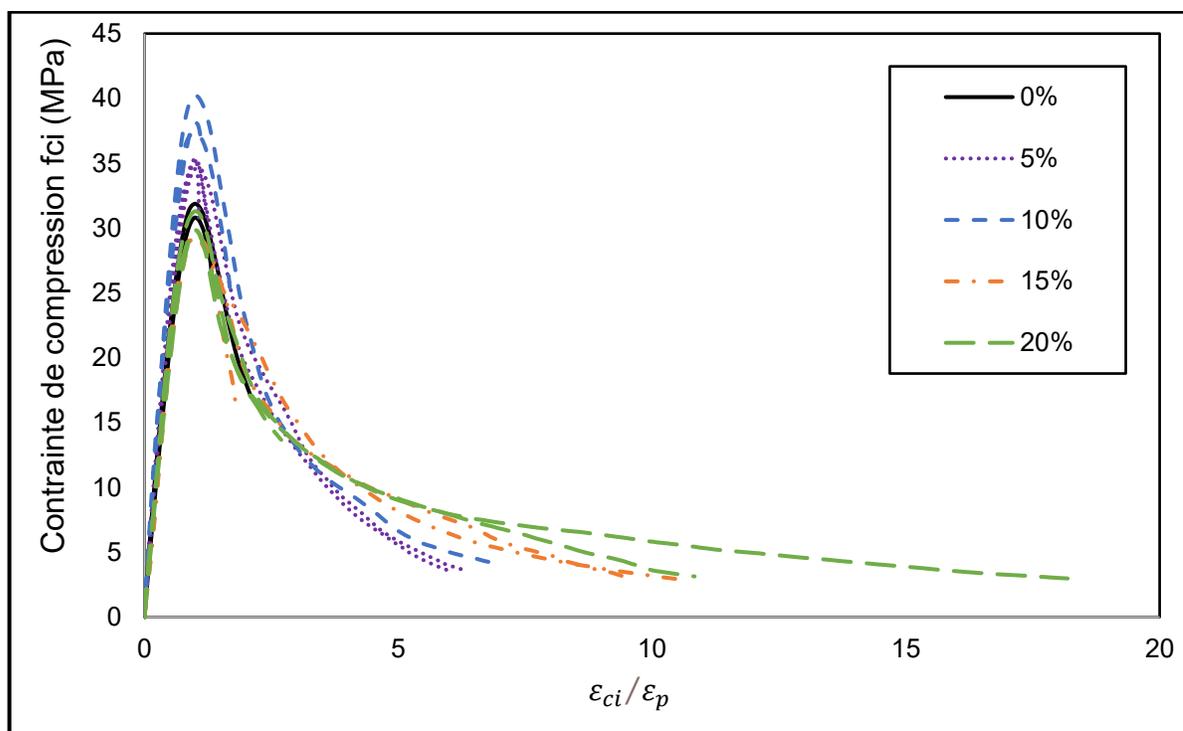


Figure 4.6 : Courbes contrainte-déformation normalisée à différents teneurs en résidus de bauxite.

4.3.5. Développement de la phase Pré-pic

Afin de voir l'effet des résidus de bauxite sur la partie pré-pic du béton, des courbes théoriques et expérimentales avec chacun des pourcentages de résidus de bauxite ont été comparées. La Figure 4.7 représente les courbes contrainte-déformation moyennes de chacune des formulations de béton de la série 300 μm mesurée en déplacement. Les résultats montrent que la teneur en résidus de bauxite n'exerce qu'une influence mineure sur l'allure des courbes expérimentales par rapport aux modèles théoriques.

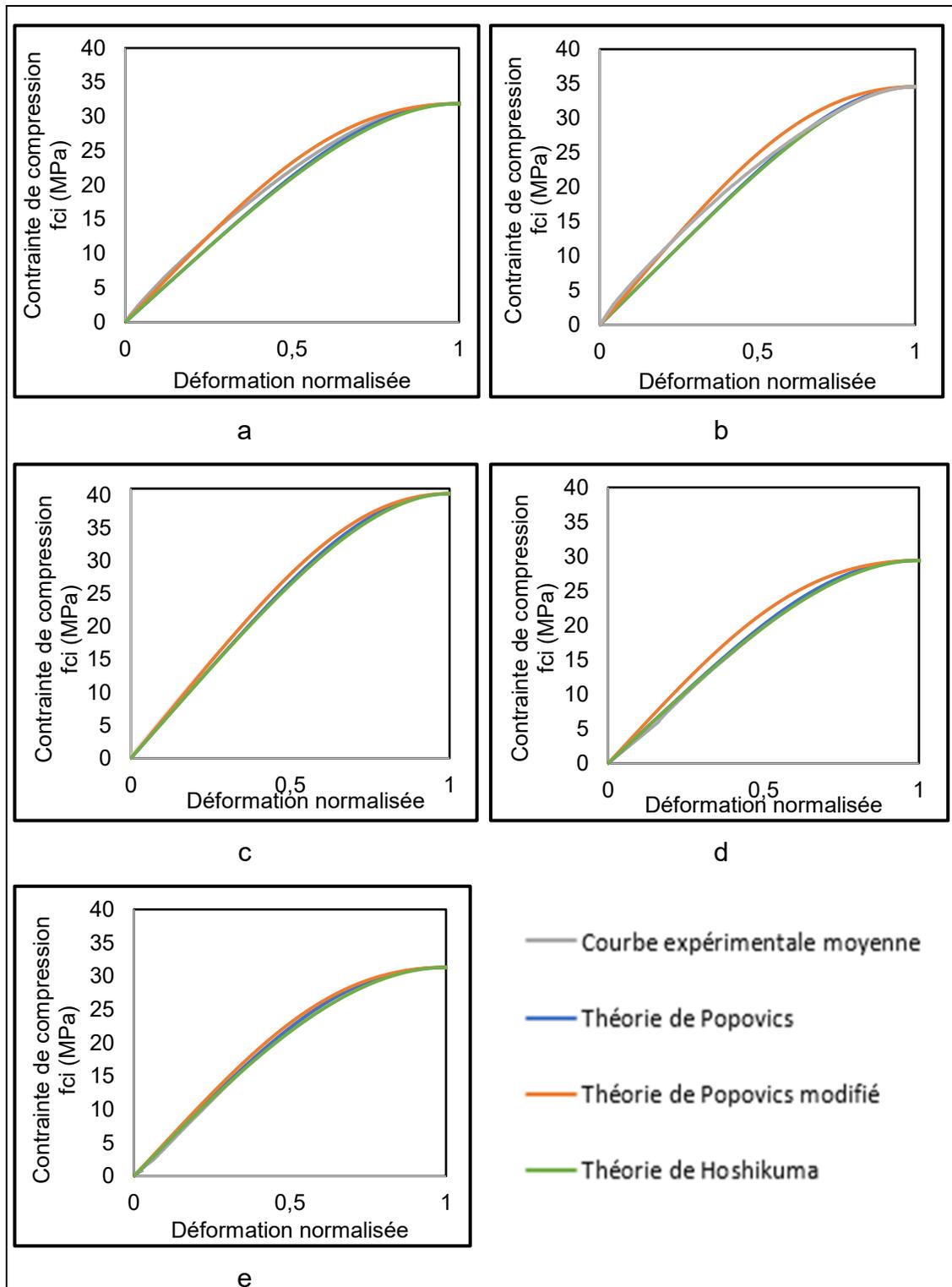


Figure 4.7 : Courbes contrainte-déformation normalisée de la partie pré-pic pour différentes teneurs en résidus de bauxite : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.

À partir des données expérimentales présentées en Figure 4.7, les paramètres régissant les différents modèles permettant d'obtenir la meilleure concordance entre les mesures expérimentales et les prédictions ont été extraits à l'aide d'algorithmes de Nelder-Mead programmés sur logiciel Matlab. La méthode de Nelder-Mead est un algorithme d'optimisation non linéaire, C'est une méthode numérique qui cherche à minimiser une fonction continue dans un espace à plusieurs dimensions. L'un des principaux paramètres extraits influençant le comportement pré pic pour la majorité des modèles est le paramètre n présenté au Tableau 4.4. Il est possible d'y observer que la valeur expérimentale de n est généralement légèrement supérieure à la prédiction théorique prévue par les différents modèles, pour des bétons de ciment Portland conventionnel. En moyenne, le ratio entre les valeurs prescrites par les modèles et celles issues des données expérimentales est de 0,96 (écart type de 0,10) et 0,80 (écart type de 0,18 %) pour les modèles de Popovics et Popovics modifiés respectivement. Bien que le modèle de Popovics semble mieux adapté à la gamme de béton testé, ces résultats ainsi que la comparaison des courbes en Figure 4.7 montrent que les valeurs prescrites par les modèles sont acceptables et peuvent être utilisées pour décrire la courbe ascendante (pré-pic) des bétons de résidus de bauxite.

Tableau 4.4 : Comparaison entre la valeur du paramètre n obtenue à partir des données expérimentales à celles prescrites par les modèles de Popovics et Popovics modifié.

Résidus de bauxite	Éprouvette	f_c (MPa)	Meilleur n expérimental (exp)	n prescrit modèle Popovics (Pop)	Pop/exp	n prescrit modèle Popovics modifié (PopM)	Pop M/exp
0%	1	31,88	3,47	3,44	0,99	2,68	0,77
	2	30,81	3,56	3,39	0,95	2,61	0,73
	3	30,51	4,37	3,71	0,85	2,59	0,59
	4	32,08	5,59	4,19	0,75	2,69	0,48
5%	1	34,55	2,97	3,03	1,02	2,83	0,95
	2	35,33	3,59	3,24	0,90	2,88	0,80
	3	35,16	3,65	3,60	0,99	2,87	0,79
	4	34,96	2,98	3,04	1,02	2,86	0,96
	5	35,57	4,23	4,31	1,02	2,89	0,68
	6	33,72	3,27	3,50	1,07	2,78	0,85
10%	1	37,39	2,91	2,94	1,01	3,00	1,03
	2	40,22	3,28	3,29	1,00	3,17	0,97
	3	38,16	3,61	3,15	0,87	3,04	0,84
	4	39,57	3,67	3,69	1,01	3,13	0,85
	5	36,56	2,24	2,32	1,04	2,95	1,32
	6	38,56	6,18	5,68	0,92	3,07	0,50
15%	1	29,27	2,84	3,00	1,06	2,52	0,89
	2	29,40	3,65	2,71	0,74	2,53	0,69
	3	29,54	3,04	3,35	1,10	2,54	0,84
	4	31,61	5,87	4,33	0,74	2,66	0,45
	5	31,56	3,84	3,84	1,00	2,66	0,69
20%	1	29,84	3,35	3,31	0,99	2,56	0,76
	2	29,81	3,37	2,94	0,87	2,55	0,76
	3	31,30	2,96	3,13	1,06	2,64	0,89
	4	29,28	2,89	3,01	1,04	2,52	0,87
	5	32,01	3,39	3,46	1,02	2,68	0,79
Moyenne					0,96		0,80
Ecart type					0,10		0,18

L'évaluation des précisions des résultats expérimentaux versus la théorie de Popovics et Popovics modifiée ont été évaluées avec l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Dans les domaines des génies, la RMSE est souvent utilisée pour évaluer la qualité de la modélisation à la fois en termes d'exactitude et de précision (Gokceoglu C et al., 2004 ; Jones NL et al., 2003 ; Wise, 2000 ; Zimmerman D et al., 1999). Comme le montre l'équation (4.9), le paramètre RMSE correspond à la moyenne des différences entre le paramètre n obtenu à partir des équations théoriques et la valeur expérimentale de n obtenue par un programme d'optimisation sous logiciel Matlab. Dans cette étude, la valeur RMSE indique l'importance de l'erreur produite entre la théorie existante et les valeurs expérimentales. Une valeur RMSE plus élevée indique une différence entre les valeurs proposées de n et le modèle théorique proposé par Popovics et Collins et Porasz.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (n_{\text{expérimentale}} - n_{\text{théorique}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

Selon l'équation (4.9), l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs de n expérimentales et les valeurs de n calculées théoriquement selon Popovics (1973) est égale à 0,55, contrairement à la théorie de Collins et Porasz qui a modifié celle de Popovics où une erreur quadratique moyenne de 1,38 est obtenue. La faible différence entre les erreurs quadratiques moyennes montrent que le modèle de Popovics (1973) est le plus proche du modèle expérimental.

4.3.6. Développement de la phase Post-pic

La Figure 4.8 compare la réponse contrainte déformation sous compression uniaxiale mesurée dans la partie descendante de la courbe après l'atteinte de la résistance f'_c (post pic) aux prédictions obtenues à partir des modèles théoriques de Popovics, Hoshikuma et Collins et Porasz (voir section 4.1), pour différents mélanges de béton de résidus de bauxite. Il est possible d'observer qu'il existe une certaine différence entre les différentes courbes théoriques et la courbe expérimentale. En effet, les résultats expérimentaux montrent que les modèles prédictifs de comportement post-pic semblent mal adaptés au béton de résidus de bauxite d'où la nécessité de les modifier ou de développer un modèle pour cette partie.

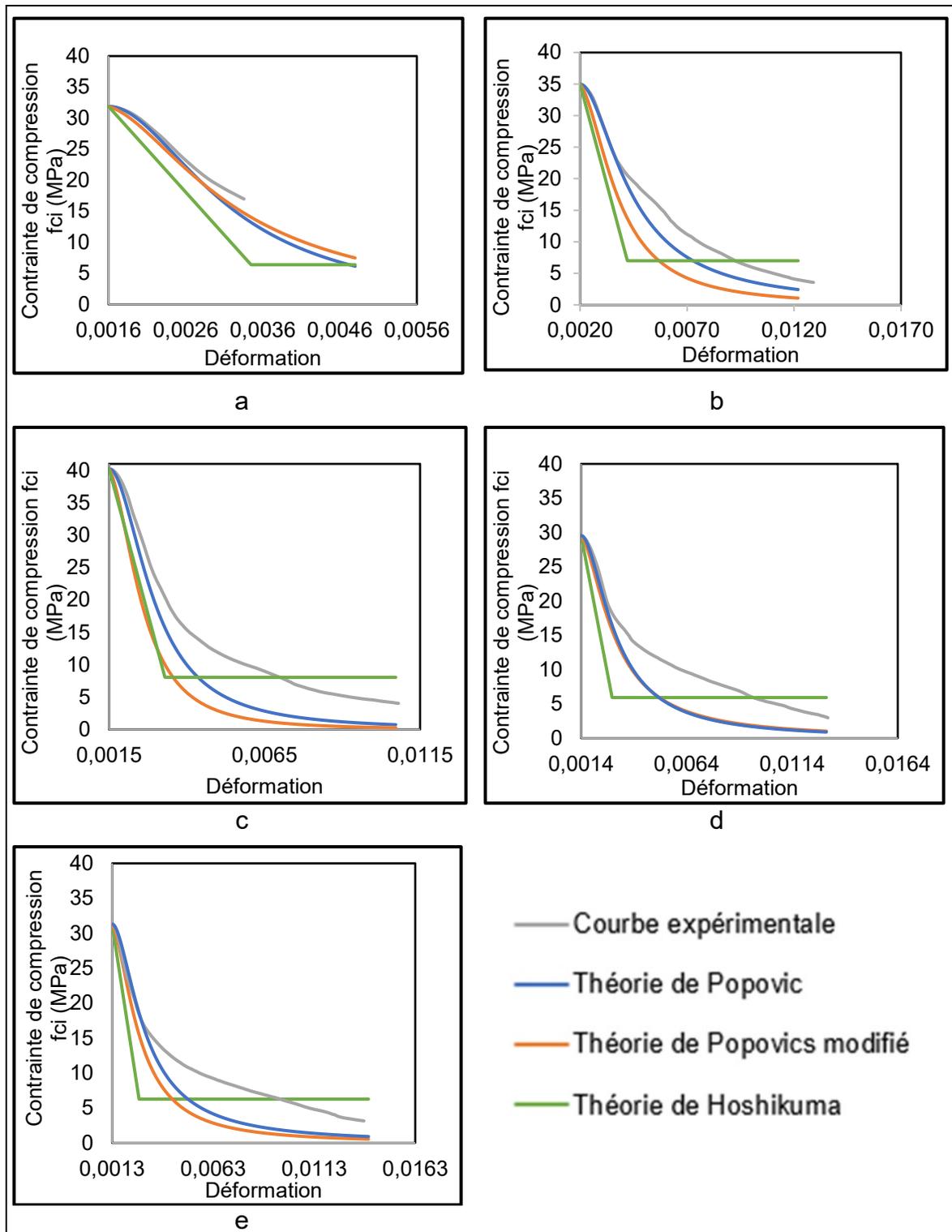


Figure 4.8 : Courbes contrainte déformation de la phase post-pic des bétons de résidus de bauxite mesurée expérimentalement et comparaison aux modèles existants : a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, e) 20%.

Afin de développer un nouveau modèle de prédiction de la partie post-pic de la courbe contrainte déformation pour les bétons de résidus de bauxite, il est nécessaire d'étudier l'effet de la quantité de résidus de bauxite sur la partie post-pic de la courbe contrainte déformation.

4.3.7. Effet de la teneur en résidus de bauxite sur la réponse post-pic

Lors des différents essais de compression uniaxiale pilotés en déplacement, les modes de rupture observés ont été qualitativement classés en trois catégories, à savoir : fragile, pseudo-fragile et ductile. Ils sont définis respectivement par une absence quasi-totale, présence partielle ou relativement importante de capacité à reprendre des efforts lors de la phase post-pic. Cette classification se distingue sur les courbes contrainte-déformation expérimentales par l'aire sous la courbe de la phase post-pic traduisant l'énergie de rupture. De façon générale, l'introduction de résidus de bauxite dans les mélanges semble réduire la fragilité post pic, en passant d'un type de rupture qualifié de fragile pour les bétons à faible teneur de résidus de bauxite (témoin et 5%) à un type de rupture majoritairement qualifié de ductile pour les mélanges avec la plus haute teneur de résidus de bauxite (20 %).

De façon quantitative, l'énergie de rupture (aire sous la courbe post-pic) a été déterminée entre la déformation mesurée au pic et une déformation de 10% de la contrainte maximale, et est présentée à la Figure 4.9 en fonction de la quantité de résidus de bauxite. Les résultats montrent l'augmentation de l'énergie de rupture en fonction de la teneur en résidus de bauxite.

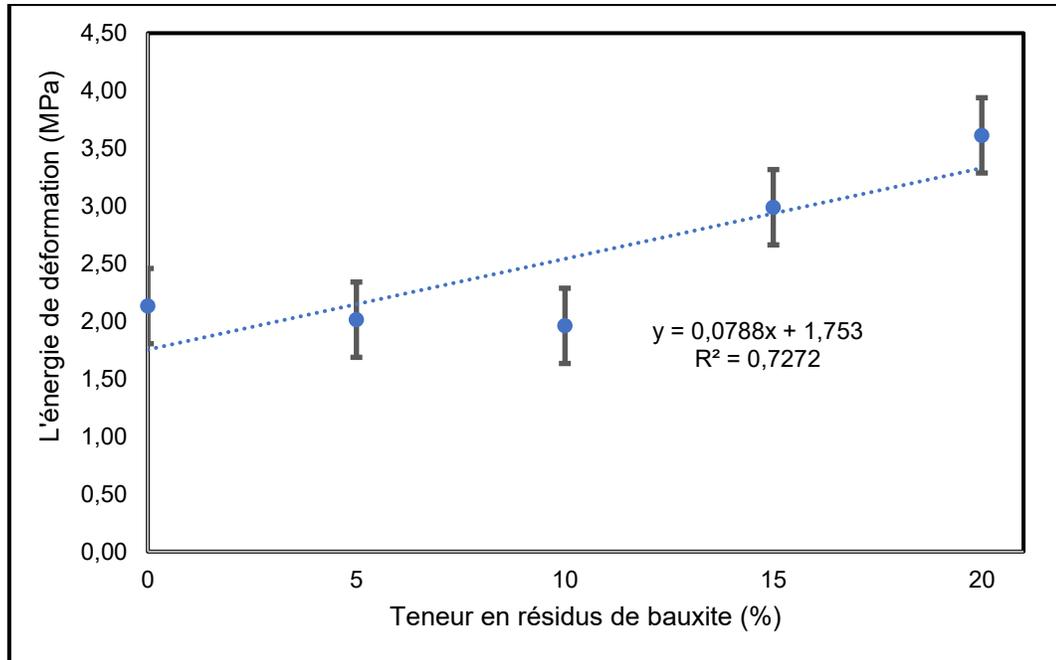


Figure 4.9 : Énergie de rupture moyenne déterminée en fonction de la quantité de résidus de bauxite.

4.3.8. Proposition d'un modèle post-pic adapté au béton de résidus de bauxite

De façon générale et en se basant sur les modèles présentés à la section 4.1, le modèle de comportement post-pic ($\varepsilon_{ci} > \varepsilon_p$) peut s'écrire à partir de l'équation (4.10).

$$f_{ci} = (1 - A) \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right) f'_c \frac{K}{K - 1 + \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right)^K} + A f'_c \quad \text{Si } \varepsilon_{ci} \geq \varepsilon_p \quad (4.10)$$

Dans cette équation, le paramètre k est fonction de la pente de la partie descendante alors que le paramètre A, représente la résistance résiduelle du béton après la rupture. Typiquement, la valeur du paramètre A est d'environ 10% à 20%

pour les bétons de ciment Portland (Wong et al., 2013). Pour les mélanges testés, une résistance résiduelle correspondant à environ 10% de la résistance au pic est généralement obtenue pour des grandes déformations. Une valeur de $A = 0.10$ est ainsi proposée.

Pour évaluer le paramètre k , la pente de la phase post-pic est déterminée entre une contrainte correspondant à arbitrairement 90% et 60% de la résistance au pic (équation 4.11) et proportionnelle à l'énergie de rupture a été utilisée. La pente post-pic peut se définir comme suit, où f_{p90} , f_{p60} , ε_{c90} et ε_{c60} sont respectivement la contrainte à 90% et 60% de la résistance au pic ainsi que les déformations y étant associées.

$$E' = \frac{f_{p90} - f_{p60}}{\varepsilon_{c60} - \varepsilon_{c90}} \quad (4.11)$$

La Figure 4.10 présente la relation entre la pente post-pic moyenne nommée E' et la teneur en résidus de bauxite. Les résultats montrent que la valeur de E' diminue avec l'augmentation de la quantité de résidus de bauxite dans le béton. Cela implique que l'aire sous la courbe augmente. D'après la Figure 4.10, il peut être conclu qu'il y'a une relation linéaire entre la pente post-pic et la teneur en résidus de bauxite avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,724$ défini par la relation (4.12), où RB est la teneur en résidus de bauxite exprimée en pourcentage. Cette relation est valable pour la plage de données expérimentales de teneur en résidus de bauxite. Une limite inférieure à E' est conséquemment fixée à 35 MPa.

$$E' = -1,26 RB + 68,6 \quad (4.12)$$

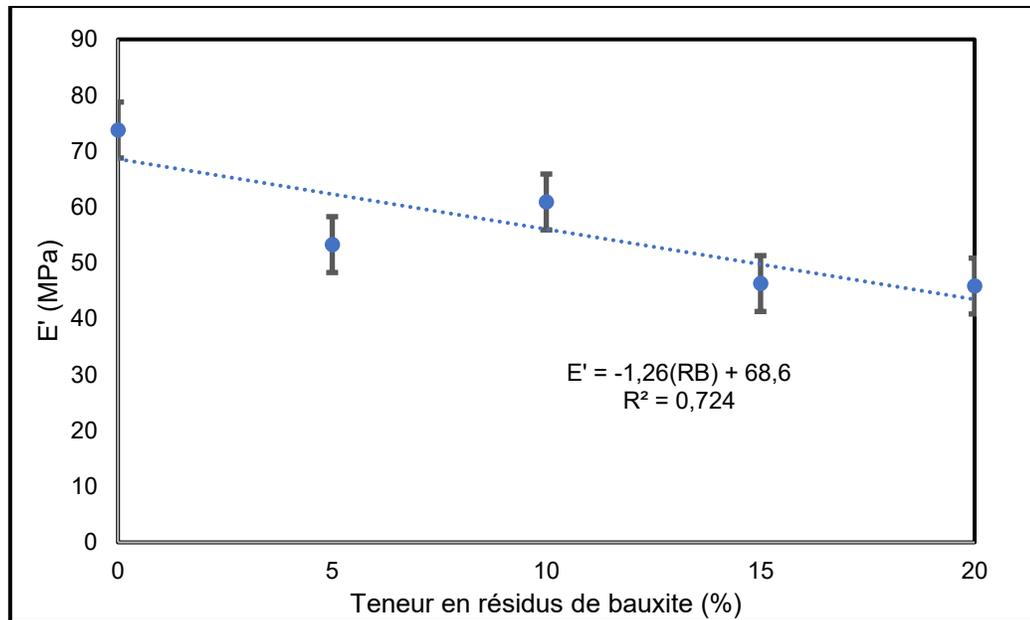


Figure 4.10 : Pente post-pic moyenne en fonction de la teneur en résidus de bauxite.

Après calcul des pentes définies par l'équation (4.11), un programme sous logiciel Matlab a été développé dans le but de trouver la relation entre le coefficient K de l'équation (4.10) et la pente de la partie Post-pic, E' . La relation entre ces deux paramètres est présentée à la Figure 4.11. Il est possible d'observer que la relation entre ces deux paramètres est quasi-linéaire et peut être très précisément prédite par l'équation (4.13), avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,999$.

$$K = \frac{E'}{25} + 1,1 \quad (4.13)$$

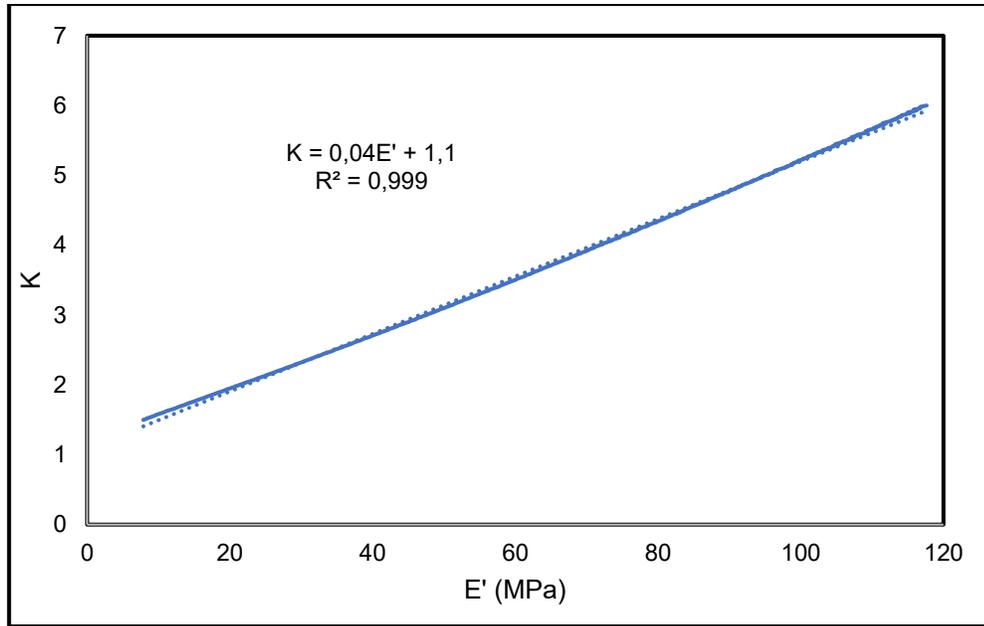


Figure 4.11 : Pente post-pic en fonction du paramètre k.

En remplaçant l'expression de E' dans l'équation (4.13), une relation entre le paramètre k et le pourcentage de résidus de bauxite peut être exprimée par l'équation (4.14).

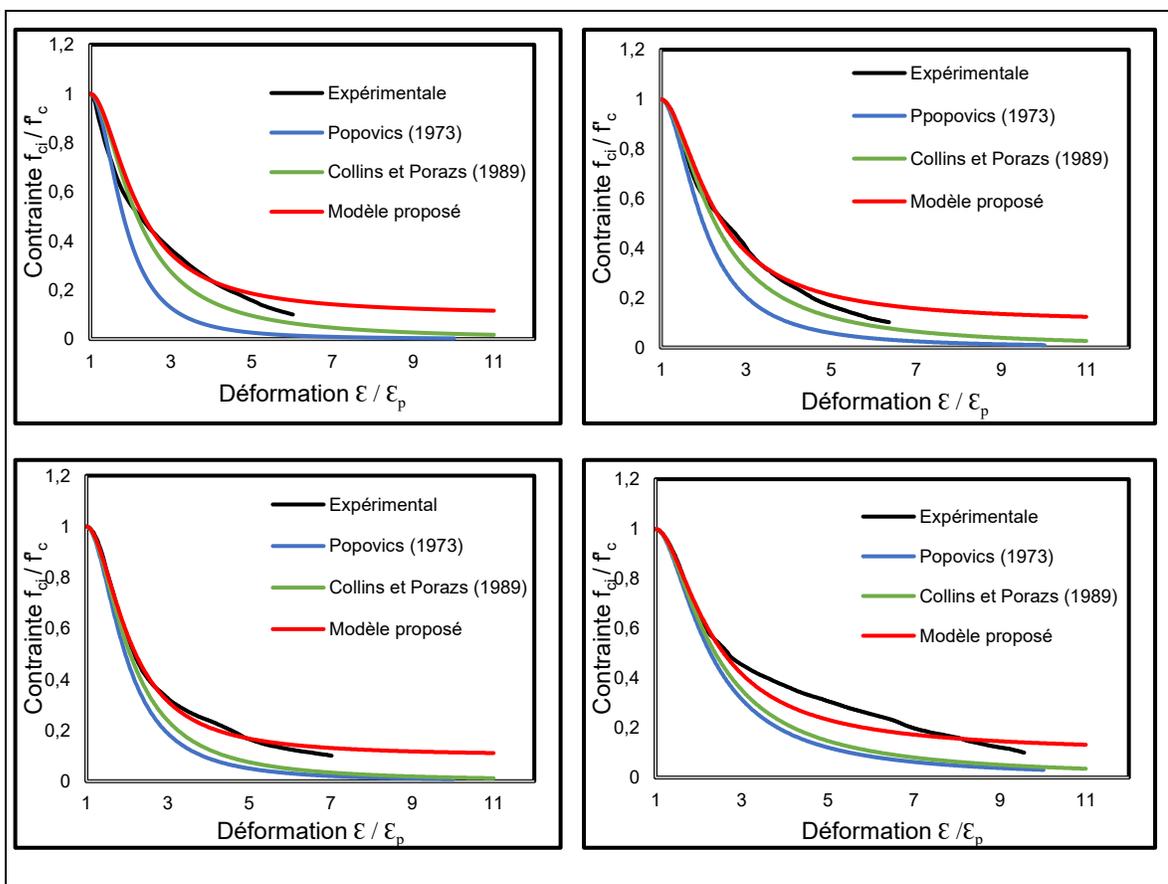
$$K = 3,85 - \left(\frac{RB}{20}\right) \geq 2,50 \quad (4.14)$$

La relation contrainte déformation de la partie post-pic f_{ci} peut-être obtenue de l'équation (4.15), où k est déterminé de l'équation (4.14) selon la teneur en résidus de bauxite.

$$f_{ci} = 0,9 \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p}\right) f'_c \frac{K}{K - 1 + \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p}\right)^K} + 0,1 f'_c \quad (4.15)$$

Afin de mieux comprendre la tendance de l'équation (4.15), des courbes de contrainte-déformation ont été tracées pour les mélanges de résidus de bauxite ainsi

que le béton témoin. La Figure 4.12 présente la compatibilité des données expérimentales de la partie post-pic des courbes contrainte-déformations avec le modèle proposé et les modèles existant dans la littérature. Les résultats montrent que le modèle proposé dans cette étude ainsi que ses paramètres A et k ont une meilleure concordance avec les résultats expérimentaux, contrairement aux modèles proposés dans la littérature tel que celui de Popovics (1973) et de Collins-Porazs (1989).



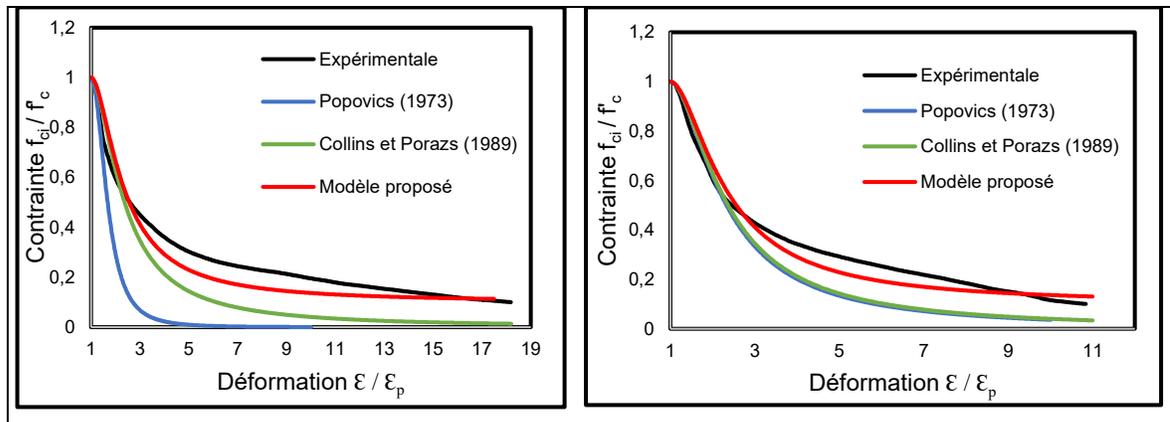


Figure 4.12 : Validation du modèle proposé.

4.4. Conclusion

Cette étude évalue l'effet des résidus de bauxite sur le comportement contrainte déformation du béton à différentes teneurs en résidus de bauxite, ainsi que l'évaluation de l'adéquation d'équations développées dans des études antérieures pour une utilisation dans l'estimation des propriétés matérielles du béton à base de résidus de bauxite. Les résultats de cette étude sont résumés comme suit :

1. La résistance à la compression et le module d'élasticité ont été significativement augmentés avec l'ajout des résidus de bauxite par rapport au béton témoin ;
2. L'analyse des courbes contrainte déformation confirme que les résidus de bauxite n'exercent pas d'influence significative sur la phase pré-pic de la courbe, contrairement à la phase post-pic où les résultats montrent que tout en augmentant la quantité de résidus de bauxite l'angle de la courbe augmente ;

3. Le modèle de Popovics 1973 de la phase pré-pic est le mieux représentatif du comportement de contrainte déformation du béton témoin et du béton de résidus de bauxite ;
4. Le modèle de Popovics ne permet pas de prédire le comportement post-pic des bétons de résidus de bauxite ;
5. Le modèle proposé prend en compte l'effet de résidus de bauxite sur la fragilité de la rupture et l'énergie de rupture ;
6. Lors de cette investigation, des études comparatives et paramétriques ont été entreprises, et les résultats ont été comparés avec les solutions de plusieurs modèles connus dans la littérature. Ils démontrent que le modèle proposé permettent de prédire le comportement de la courbe contrainte déformation du béton de résidus de bauxite ainsi que le béton de ciment Portland.

4.5. Références

- Al-Amoush, H., & Rajab, J. A. (2018). The use of Electrical Resistivity Tomography to investigate basaltic lava tunnel based on the case study of Al-Badia cave in Jordan. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(2), 161-177.
- Almusallam, T. H., & Alsayed, S. H. (1995). Stress-strain relationship of normal, high-strength and lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, pp. 39–44.
- Anderson, T. L. (2005). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*(3e édition ed., pp. 640).
- Bae, B.-I., Choi, H.-K., Lee, B.-S., & Bang, C.-H. (2016). Compressive Behavior and Mechanical Characteristics and Their Application to Stress-Strain Relationship of Steel Fiber-Reinforced Reactive Powder Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-11. doi:10.1155/2016/6465218
- Gokceoglu C, K., Z., & 17(1):61e72. (2004). A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, p. 17(11):61e72.
- Gross Dietmar, & Seelig, T. (2017). *Fracture Mechanics*(Third Edition ed., pp. 376).
- Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., & Taylor, A. W. (1997). Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers. *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 624-633.
- Illavarason, P., & Renjit, A. (2018). Clinical evaluation of functional vision assessment by utilizing the visual evoked potential device for cerebral palsy rehabilitation. *Procedia Computer Science*, 132, 128-140.
- Jansen, D. C., & Shah, S. P. (1997). <Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete.pdf>. *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 25–35.

- Jones NL, Davis RJ, A, S. W., & 41(4):411e9. (2003). Comparison of three-dimensional interpolation techniques for plume characterization. *Ground Water*, p. 41(44):411e419.
- Liu, R.-X., & Poon, C.-S. (2016). Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 384-391. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.049
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park. R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 1804-1826.
- Newman, J., & Choo, a. B. S. (2003). *Properties and Hardening of concrete* (Vol. VOL 1 Part 3). Advanced Concrete Technology.
- Paultre, P. (2017). *Structures en béton armé - 2e édition*. Presses internationales Polytechnique.
- Popovics. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, pp. 583-559.
- Tang, W. C., Wang, Z., Liu, Y., & Cui, H. Z. (2018). Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 178, 288-300. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.171
- Wise. (2000). Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, p. 14(11e12): 1909e1929.
- Wong, P. S., Vecchio, F. J., & Trommels, H. (2013). VECTOR2 & FORMWORKS USER'S MANUAL. *SECOND EDITION*, 347.
- Yang, K.-H., Mun, J.-H., Cho, M.-S., & Kang, T. H. K. (2014). Stress-Strain Model for Various Unconfined Concretes in Compression. *ACI Materials Journal*, 111(4). doi:10.14359/51686631

Zimmerman D, Pavlik C, Ruggles A, & MP., A. (1999). An experimental comparison of ordinary and universal Kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, p. 1999;1931(1994):1375e1990.

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

5.1. Conclusions

Lors de ce travail de doctorat, une investigation a été menée autour de deux parties dont le but principal est d'améliorer la qualité du béton et de recycler le maximum de déchets. L'intérêt est porté sur la valorisation des résidus de bauxite des usines de production d'aluminium du Saguenay-Lac-Saint-Jean dans le béton de ciment Portland et de développer un modèle mathématique qui permet de simuler le comportement en compression uniaxiale du béton en déformation. Pour ce faire, l'influence de la quantité de résidus de bauxite sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons est étudiée en suivant une méthodologie de travail confrontée à des mesures expérimentales en laboratoire. Différents mélanges de béton ont été fabriqués en variant les quantités et le calibre des résidus de bauxite utilisés en substitution du ciment. Des modèles de prédiction du comportement mécanique et de réponse contrainte déformation ont ainsi pu être développés et proposés.

Les principales conclusions de cette thèse sont énumérées dans les points suivants:

1. La synthèse bibliographique réalisé dans le cadre de cette thèse montre qu'il existe plusieurs résidus qui peuvent être utilisés comme agrégats recyclés pour remplacer le gravier, le sable ou les deux en même temps, où peuvent encore être utilisés comme ajouts cimentaires selon la nature du matériau,

dans le but de préserver et de réduire l'impact environnemental des matériaux de construction et d'améliorer certaines propriétés du béton. Toutefois, la revue de littérature a démontré qu'il n'existe que peu d'études sur l'utilisation des résidus de bauxite comme ajouts cimentaires dans la formulation du béton.

2. En ce qui concerne les propriétés à l'état frais de béton à base de résidus de bauxite les résultats montrent que la présence de résidus de bauxite diminue la maniabilité et la teneur en air d'environ 27% et 7% respectivement, pour les mélanges de 300 μm comparativement au mélange témoin sans résidus de bauxite. Cette diminution est plus importante pour les mélanges avec un calibre de résidus de bauxite de 600 μm . En effet, ces mélanges ont subi une diminution d'environ 45% et 25% de la maniabilité et la teneur en air respectivement par rapport au béton témoin sans résidus de bauxite. En revanche, pour les mélanges de 2 mm, la maniabilité et la teneur en air étaient presque similaires à celles du béton témoin. En ce qui concerne les mélanges de résidus de bauxite liquide les résultats ont montré que la maniabilité diminue progressivement avec l'augmentation de la teneur en résidus de bauxite causant une diminution de 25% de la teneur en air. Ceci est dû à la quantité d'eau qui se trouve dans les résidus de bauxite, qui était très difficile à contrôler (en pratique).
3. La résistance à la compression du béton à base de résidus de bauxite a été mesurée à 7, 28, 90 et 180 jours pour la série de 300 μm et à 7 et 28 jours pour les séries de 600 μm , 2 mm et résidus de bauxite sous forme de boue.

Les résultats obtenus montrent le potentiel d'utilisation de cet éco-matériau pour la construction. En effet, le remplacement massique de ciment par 5 et 10 % de résidus de bauxite augmente la résistance à la compression du béton jusqu'à 45 % par rapport au béton témoin à base du ciment Portland. En outre, l'utilisation de 20 % de résidus de bauxite dans le béton diminue sa résistance à la compression, mais sa valeur demeure suffisante pour la construction (plus de 25 MPa).

4. Pour les paramètres élastiques de ce béton, les résultats ont montré que le module d'élasticité des mélanges contenant des résidus de bauxite était généralement légèrement supérieur à celui du béton témoin. Les résultats montrent également que les mélanges de résidus de bauxite sont plus rigides que les prédictions normatives prévues par le modèle de la norme ACI 363 et le modèle de la norme CSA A23.3 (2019). De nouvelles équations développées ont été proposées.
5. L'évaluation de la résistance à la traction des mélanges testés n'a pas montré un effet significatif de la présence de résidus de bauxite sur cette propriété mécanique. Il s'avère ainsi que les différentes équations permettant d'évaluer la résistance à la traction à partir d'autres propriétés, telle la résistance à la compression, développée pour les bétons de ciment Portland, peuvent être utilisées pour les bétons de résidus de bauxite.
6. Les résultats de l'évaluation des modèles de prédiction montrent que l'équation de la résistance à la compression donnée par la norme « fib model

code for concrete structures 2010 » et l'équation du module d'élasticité donnée par la norme CSA pour les bétons de ciment peuvent différer pour les bétons de résidus de bauxite contrairement à l'équation de prédiction de la résistance en traction donnée par la norme CSA qui prédit la résistance en traction du béton de résidus de bauxite, avec un taux d'erreur très acceptable.

7. Un modèle paramétrique permettant de représenter la courbe contrainte déformation sous chargement uniaxial en compression a été proposé. Ce modèle considère l'effet de la teneur en résidus de bauxite sur le comportement pré-pic ainsi que sur la fragilité de la rupture et le comportement post-pic. La comparaison de ce modèle aux essais de compression réalisés en laboratoire pour différentes teneurs en résidus de bauxite montre une bonne concordance.

5.2. Travaux futurs

La revue de littérature présentée ainsi que les questions abordées dans ce travail montrent que le recyclage des résidus de bauxite dans la formulation du béton est un champ de recherche très prometteur et plusieurs travaux peuvent encore être réalisés pour mieux comprendre l'effet de l'ajout de résidus de bauxite à un béton de ciment ainsi que le développement de son potentiel d'utilisation. Dans cette optique, il est recommandé de poursuivre la recherche afin de trouver des réponses aux éléments suivants :

- Évaluer le fluage en compression uniaxiale sous plusieurs niveaux de chargement et à différents âges. Ces essais étaient programmés dans le plan

expérimental de cette thèse mais la situation sanitaire et la fermeture du laboratoire pour une durée de plus d'une année nous ont forcé un ajustement du plan expérimental.

- Il est important d'étudier le comportement du béton de résidus de bauxite à long terme (essais de fluage, fatigue et retrait) soit en compression, en traction et en flexion du béton de résidus de bauxite armé et non armé afin de déterminer ses différents comportements pour assurer la durabilité de ses résistances à long terme.
- Il serait intéressant d'investiguer plus en détail les réactions chimiques qui se produisent entre le ciment, l'eau et les résidus de bauxite dans le mélange afin d'obtenir des informations plus précises sur le rôle des résidus de bauxite dans le mélange, afin de trouver un lien avec les propriétés mécaniques.
- L'étude du comportement de béton de résidus de bauxite dans plusieurs ensembles de conditions environnementaux : à haute température ambiante (+50) ou à basse température ambiante comme en hiver (-45) ainsi que à l'humidité.
- Dans le domaine de la construction, le choix des matériaux de construction utilisés dans les bâtiments est en fonction de plusieurs paramètres, par exemple l'empreinte carbonique du matériau.

Annexe A

Programmes permettant la détermination de la valeur de (n) optimale en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre les courbes théorique et expérimentale :

Programme principal :

```
load data_N
txt='001'; % Le nom du fichier des données
save txt txt
eval(['d=d' txt ';' ])
[fp,I]=max(d(:,1)); % détermination du pic fp et son indice I
k=10;save k k
I1=round(I/k);
d1=d;
d=d1(I1:I,:);
ei=d(:,2);
fi=d(:,1);
figure(1);plot(ei,fi)
ep=ei(end);
n=2.7; % valeur initiale de n avant le lancement de
l'optimisation
er=0; % La valeur initiale du décalage au niveau de la
déformation
fcil=ei/ep*fp*n./(n-1+(ei/ep).^n);
X=fminsearch('erreur',[n er]);
n=X(1)
```

```
er=X(2)
```

le programme principal fait appel au programme ci-dessous afin de calculer l'erreur via la fonction `fminsearch`

Programme de calcul d'erreurs

```
function err=erreur(X)

load data_N
load txt
eval(['d=d' txt ';' ]);
load k
[fp,I]=max(d(:,1));
I1=round(I/k);
d1=d;
d=d1(I1:I,:);
ei=d(:,2);
fi=d(:,1);
ep=ei(end);
n=X(1);
er=X(2);
fci=((ei+er)./(ep+er).*fp.*n)./(n-1+((ei+er)./(ep+er)).^n);
err=mean((fi-fci).^2);% l'erreur quadratique moyenne
figure(2);plot(ei,fi,ei,fci)
axis([0 max(ei)*1.2 0 max(fi)*1.2])%définition des axes
```

Annexe B

La description Matlab ci-dessous montre comment calculer la pente de la phase post-pic de la courbe contrainte-déformation afin de déterminer la relation entre le paramètre k de l'équation (4.13) et la pente post-pic E' :

```
e=0:0.001:10;
fp=100;
e1=e+1;
E'=[];
K=1.5:0.01:6;
for k=K
f=e1*fp*k./(k-1+e1.^k);
figure(1);plot(e,f)
[y,I1]=min(abs(f-90));
[y,I2]=min(abs(f-60));
YB=[YB 30/diff(e([I1 I2]))];
end
figure(2);
plot(K,E')
xlabel('E''')
ylabel('K')
grid on
```

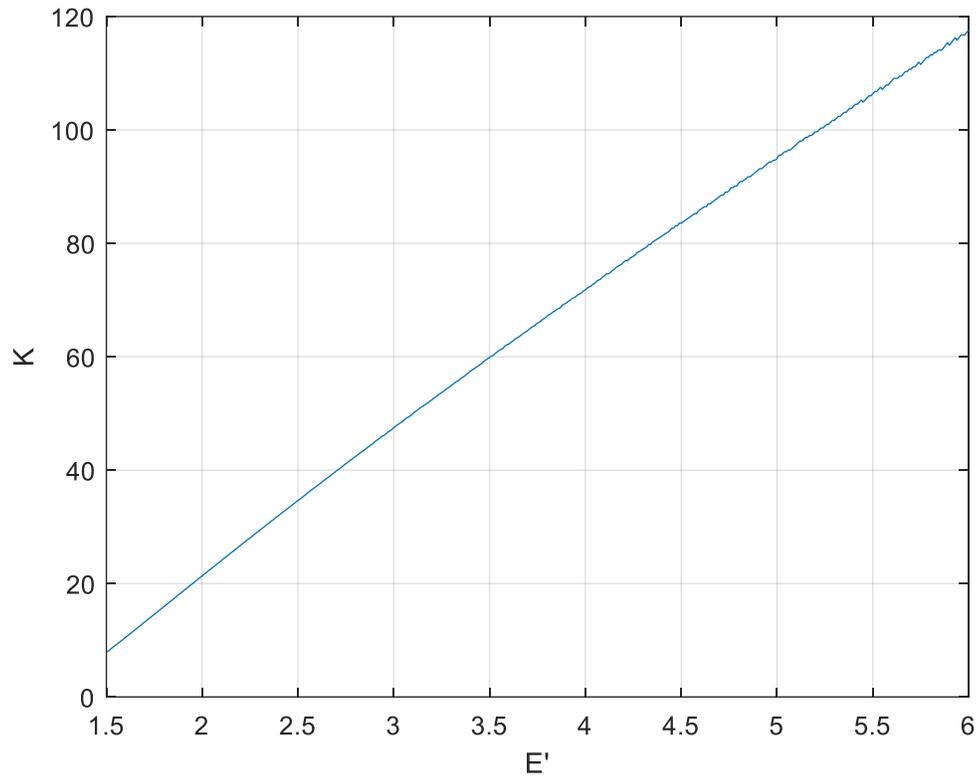


Figure : Pente post-pic E' en fonction du paramètre k

Annexe C

La description Matlab ci-dessous montre comment déterminer la courbe moyenne des courbes contrainte déformation :

```
load Data_brute.mat

X{1}=Serie1(:,1:2:end);
X{2}=Serie2(:,1:2:end);
X{3}=Serie3(:,1:2:end);

Y{1}=Serie1(:,2:2:end);
Y{2}=Serie2(:,2:2:end);
Y{3}=Serie3(:,2:2:end);

xmax=0.0162;
nres=500;
x=(0:xmax/nres:xmax)';

nx=length(x);
y{3}=[];
for temp=1:3
    y{temp}=zeros(nx,size(Y{temp},2));
end
```

```

for k=1:3
    nres=length(X{k}(1,:));
    for j=1:nres
        [~,temp,~]=unique(X{k}(:,j));
        temp=[X{k}(temp,j),Y{k}(temp,j)];

temp=[temp(~isnan(temp(:,1)),1),temp(~isnan(temp(:,1)),2)];
        y{k}(:,j)=interp1(temp(:,1),temp(:,2),x);
    end

S{k}=[x,nanmin(y{k},[],2),nanmean(y{k},2),nanmax(y{k},[],2)];
end

```