



**Développement d'un béton à base du résidu de bauxite et analyse de son comportement
structural pour des tuyaux d'infrastructures urbaines**

**Par :
Émilie Garneau**

Sous la direction de Mathieu Fiset et la codirection de Guy Simard

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

Jury :

Dilip Sakar, UQAC, Président du Jury

Reda Snaiki, Professeur externe, ÉTS Montréal, Membre externe

Fatma Rebaine, Professeur interne, UQAC, Membre externe

Mathieu Fiset, Direction de recherche, UQAC, Membre interne

Guy Simard, Codirection de recherche, UQAC, Membre interne

Québec, Canada

© Émilie Garneau, 2026

RÉSUMÉ

Au Québec, la production du ciment est responsable d'environ 15% de toutes les émissions de GES industriel dans la province. Par ailleurs, la production mondiale d'aluminium engendre l'accumulation d'environ 150 millions de tonnes de résidus de bauxite (RB) par année. Face à ces enjeux, il devient important de développer des solutions novatrices et durables pour valoriser ces matériaux résiduels tout en répondant aux besoins de l'industrie de la construction.

Ce projet de recherche a pour objectif de développer un béton à base de résidus de bauxite en substituant une partie de ses constituants par des résidus de bauxite filtrés-pressés (RB FP) produits au Saguenay–Lac-Saint-Jean, puis, d'analyser le comportement structural de ce béton pour l'utiliser dans la production de tuyaux de béton destiné aux infrastructures urbaines. Pour l'atteinte de cet objectif, des mélanges de béton ont été développés et caractérisés en substituant 5 à 40% du ciment portland par des RB. À partir de cela, des poutres ont été fabriquées afin de connaître le comportement structural de ce matériau. Puis, des tuyaux de béton avec RB ont été fabriqués et testés en laboratoire. L'analyse des résultats a été complétée en comparant les résultats obtenus pour les spécimens avec et sans RB à des modèles numériques faits à l'aide du logiciel d'analyse non-linéaire par éléments finis VecTor2. Cela a permis d'évaluer la pertinence des outils de conception actuels et de comparer les prédictions aux résultats expérimentaux.

Selon les résultats obtenus, il est possible d'utiliser le béton avec RB pour la fabrication de tuyaux destinés aux infrastructures urbaines. En effet, les résultats ont montré que jusqu'à 15% de RB peuvent être remplacés sans avoir un effet significatif sur la résistance à la compression du béton. Également, le malaxage du béton avec RB a un rôle important à jouer sur la résistance du béton avec RB. Finalement, les comparaisons effectuées entre les modèles numériques et les spécimens testés en laboratoire montrent que l'incorporation de RB dans les mélanges de béton n'a pas affecté la capacité des modèles numériques, réalisés avec VecTor2, à représenter le comportement des éléments testés. Donc, les outils de conception peuvent être utilisés tels quels pour le béton avec RB. Ces avancées démontrent que le béton à base de RB constitue une option prometteuse pour la production de tuyaux durables et performants destinés aux infrastructures urbaines.

ABSTRACT

In the province of Québec, cement production accounts for approximately 15% of all industrial greenhouse gas emissions. Globally, aluminum production generates nearly 150 million tonnes of bauxite residue (BR) annually (International Aluminium Institute, 2020). Considering these challenges, it is essential to develop innovative and sustainable solutions that valorise these by-products while meeting the requirements for construction.

The objective of this research is to develop concrete incorporating filtered-pressed bauxite residue (FP BR) produced in the Saguenay–Lac-Saint-Jean region as a partial replacement for mixture constituents, and to analyse the structural behaviour of the BR-concrete for manufacturing concrete pipes. To achieve this goal, concrete mixtures were developed and characterised by replacing 5% to 40% of portland cement with BR. Based on these mixtures, reinforced concrete beams were fabricated and tested to evaluate their shear and flexural behaviour. Subsequently, full-scale BR-concrete pipes were manufactured and tested. Non-linear finite element models of the tested beams and pipes were developed using the Vector2 software and numerical predictions were compared with test results.

The results indicate that BR-concrete can be produced in compliance with mechanical and structural performance requirements, even with relatively high amount of BR. Specifically, up to 15% BR replacement of portland cement can be achieved without a significant reduction in concrete compressive strength, and up to 40% BR can be used with only a moderate strength decrease. Moreover, mixing procedures were found to play a key role in mechanical performance of BR-concrete. Finally, the comparison between numerical and experimental results showed that the structural behaviour of BR concrete beams and pipes can be adequately predicted using existing tools, such as VecTor2. Overall, these findings demonstrate that BR-concrete represents a promising solution for structural concrete and for the manufacture of durable and high-performance concrete pipes.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	ix
REMERCIEMENTS	xii
AVANT-PROPOS	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	1
1.2 OBJECTIFS	2
1.3 CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE	3
1.4 STRUCTURE DU PROJET	4
1.5 STRUCTURE DU MÉMOIRE	5
CHAPITRE 2 ARTICLE 1 : « FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS INCORPORATING BAUXITE RESIDUE »	7
2.1 CONTRIBUTIONS	7
2.2 PRÉSENTATION ET RÉSUMÉ DE L'ARTICLE	7
2.3 APPORT SCIENTIFIQUE	9
2.4 LIENS AVEC LES OBJECTIFS DU MÉMOIRE	9
2.5 INTÉGRALITÉ DE L'ARTICLE	10
2.5.1 ABSTRACT	10
2.5.2 INTRODUCTION	11
2.5.3 RESEARCH SIGNIFICANCE	14
2.5.4 CONCRETE MATERIALS	14

2.5.5	BEAM SPECIMENS FABRICATION AND TESTING	18
2.5.6	RESULTS AND DISCUSSION	21
2.5.7	CONCLUSIONS	30
2.5.8	ACKNOWLEDGMENTS	32
2.5.9	REFERENCES	32
CHAPITRE 3 COMPLÉMENT À L'ARTICLE 1 : CARACTÉRISATION DES MÉLANGES		36
3.1	COMPLÉMENT À LA REVUE LITTÉRAIRE	36
3.1.1	FACTEURS QUI AFFECTENT LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON.....	37
3.1.2	COMPORTEMENT STRUCTURAL	41
3.2	MATIÈRES PREMIÈRES	42
3.2.1	GRANULAT FIN	42
3.2.2	GRANULAT GROSSIER.....	43
3.2.3	ADJUVANTS	45
3.3	CARACTÉRISTIQUES DES MÉLANGES DE BÉTON À L'ÉTAT FRAIS	45
3.4	CARACTÉRISTIQUES DES MÉLANGES DE BÉTON À L'ÉTAT DURCIS.....	46
CHAPITRE 4 ARTICLE 2 : CARACTÉRISATION ET ESSAIS MÉCANIQUES SUR DES TUYAUX EN BÉTON POUR LES INFRASTRUCTURES URBAINES.....		49
4.1	CONTRIBUTIONS	49
4.2	PRÉSENTATION ET RÉSUMÉ DE L'ARTICLE.....	49
4.3	APPORT SCIENTIFIQUE	51
4.4	LIEN AVEC LES OBJECTIFS DU MÉMOIRE.....	51
4.5	INTÉGRALITÉ DE L'ARTICLE	52
4.5.1	INTRODUCTION ET REVUE LITTÉRAIRE	52

4.5.2	PORTÉE DE LA RECHERCHE	64
4.5.3	MATÉRIAUX.....	65
4.5.4	FABRICATION ET ESSAIS SUR TUYAUX DE BÉTON ARMÉ	70
4.5.5	RÉSULTATS ET DISCUSSION	73
4.5.6	CONCLUSION.....	86
4.5.7	RÉFÉRENCES	88
CHAPITRE 5 COMPLÉMENT AUX ARTICLES 1 ET 2 : MODÉLISATION NUMÉRIQUE		90
5.1	INTRODUCTION	90
5.1.1	MODÈLES DE COMPORTEMENT DE VECTOR2.....	91
5.1.2	TYPES D'ÉLÉMENTS	92
5.1.3	MAILLAGE.....	93
5.2	COMPOSANTES DES MODÈLES DES POUTRES TESTÉES AU CHAPITRE 2.....	95
5.3	COMPOSANTES DES MODÈLES DES TUYAUX TESTÉS AU CHAPITRE 4	100
5.4	PARAMÈTRES DE MODÉLISATION.....	103
5.5	RÉSULTATS POUR LES POUTRES.....	106
5.6	RÉSULTATS POUR LES TUYAUX.....	112
5.7	CONCLUSION	119
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....		120
RAPPEL DES OBJECTIFS.....		120
SYNTHÈSE.....		120
TRAVAUX FUTURS		123
LISTE DE RÉFÉRENCES.....		125
ANNEXE 1 ARTICLE DE CONFÉRENCE : DEVELOPMENT OF BAUXITE RESIDUE AND CLASS F FLY ASH BASED GEOPOLYMER CONCRETE.....		131

ANNEXE 2 MÉLANGES DE BÉTON DES POUTRES	140
ANNEXE 3 FICHE TECHNIQUE DES ADJUVANTS	141
ANNEXE 4 FICHE TECHNIQUE DES RÉSIDUS DE BAUXITE	150
ANNEXE 5 MÉLANGES DE BÉTON DES TUYAUX.....	155
ANNEXE 6 FICHE GÉOMÉTRIE DES TUYAUX.....	156
ANNEXE 7 CERTIFICAT DE CONFORMITÉ DE L'ARMATURE.....	157

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1 - REFERENCE CONCRETE MIXTURE PROPORTIONS, IN KG/M ³	15
TABEAU 2 - CHEMICAL COMPOSITION OF BAUXITE RESIDUE.....	16
TABEAU 3 – DIMENSIONS RELATED TO THE FOUR-POINT BENDING TEST.....	20
TABEAU 4 – FAILURE PARAMETERS OF TESTED BEAMS.....	27
TABEAU 5 – DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT FIN DES POUTRES.....	43
TABEAU 6 – DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT GROSSIER DES POUTRES	44
TABEAU 7 – COMPARAISON DU MODULE D'ELASTICITE DES DIFFERENTS MELANGES DES POUTRES AVEC LE MODULE D'ELASTICITE NORMALISE	48
TABEAU 8 – RESISTANCE A LA CHARGE $D_{0,3}$ ET D_{ULTIME} POUR LES DIFFERENTES CLASSES DE TUYAUX (TIRE DE BNQ 2622-126 (2023)).....	58
TABEAU 9 – DOSAGE DU MELANGE DE REFERENCE	65
TABEAU 10 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU RESIDU DE BAUXITE	66
TABEAU 11 – DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT FIN DES TUYAUX	67
TABEAU 12 – DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT GROSSIER DES TUYAUX	68
TABEAU 13 – VALEURS A LA FISSURATION ET A LA RUPTURE POUR LES SECTIONS DE TUYAUX	79
TABEAU 14 –RESISTANCE A LA FISSURATION ET A L'ULTIME DETERMINEES PAR L'ESSAI D'ECRASEMENT RADIAL DES TUYAUX TESTES EN LABORATOIRE ET EN INDUSTRIE, ET COMPARAISON AUX LIMITES DONNEES PAR BNQ 2622-126	86
TABEAU 15 – PROPRIETES DE BETON ENTREES DANS LES DIFFERENTS MODELES DE POUTRES	98
TABEAU 16 - PROPRIETES DE L'ARMATURE VERTICALE (CROCHET) POUR LES POUTRES	99
TABEAU 17 - PROPRIETE DES PLAQUES D'APPUI DE TYPE ACIER STRUCTURAL POUR TOUS LES MODELES DE POUTRE	99
TABEAU 18 – PROPRIETES DE BETON ENTREES DANS LES DIFFERENTS MODELES DE TUYAU.....	102
TABEAU 19 – PROPRIETES DE L'ACIER POUR MODELISER LES SECTIONS DE TUYAU ..	103
TABEAU 20 – PARAMETRES DE CHARGEMENTS POUR LES MODELES DES POUTRES ET DES TUYAUX.....	104
TABEAU 21 – PARAMETRES POUR LES LOIS DE COMPORTEMENT DES MODELES DES TUYAUX	105

TABLEAU 22 - COMPARATIF DES RESULTATS DES MODELES NUMERIQUES ET DES ESSAIS POUR LES POUTRES	108
TABLEAU 23 – PROFONDEUR EFFICACE, D, CALCULE POUR LA RESISTANCE MAXIMALE DES TUYAUX TESTES EN LABORATOIRE	116
TABLEAU 24 – COMPARATIF DES RESULTATS DES MODELES NUMERIQUES ET DES ESSAIS POUR LES TUYAUX.....	117

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 – ORDRE DE LECTURE SUGGERE POUR LE MEMOIRE	6
FIGURE 2 – A) COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE MIXTURES AND B) COMPRESSIVE STRENGTH OVER TIME FOR THE DIFFERENT MIXES	18
FIGURE 3 – CROSS SECTIONS GEOMETRIES B2.6, B3.2 AND B3.5	19
FIGURE 4 – REPRESENTATION OF THE FOUR-POINT BENDING TEST	20
FIGURE 5 – FOUR-POINT BENDING TEST EXPERIMENTAL SETUP OF HALF OF ONE BEAM TEST	21
FIGURE 6 – A) SLUMP AND B) AIR CONTENT FOR THE CONCRETE MIXTURES USED FOR THE BEAMS	22
FIGURE 7 – COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE USED FOR BEAMS.....	23
FIGURE 8 - LOAD-DEFLECTION RESPONSE OF BEAMS WITHOUT AND WITH 15% OR 22% BAUXITE RESIDUE (BR), WITH GEOMETRIES A) B2.6, B) B3.2, AND C) B3.5	25
FIGURE 9 – CRACKING PATTERN FOR TESTED BEAMS	29
FIGURE 10 – COURBE GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT FIN DES POUTRES	43
FIGURE 11 – COURBE GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT GROSSIER DES POUTRES ...	44
FIGURE 12 – PROPRIÉTÉS DES MÉLANGES DE BÉTON À L'ÉTAT FRAIS A) AFFAISSEMENT, B) TENEUR EN AIR ET C) MASSE VOLUMIQUE	46
FIGURE 13 – INSTRUMENTATION DES ÉPROUVETTES POUR LES ESSAIS DE COMPRESSION ET DE MODULE.....	47
FIGURE 14 – RESULTATS DU MODULE D'ELASTICITE POUR LES DIFFERENTS TAUX DE SUBSTITUTION DU CIMENT PAR RB TESTES POUR LES BETONS DES POUTRES	47
FIGURE 15 –PROCESSUS DE FABRICATION PAR COMPRESSION RADIALE (CONDUITES ET PRODUITS BETON, 2021)	53
FIGURE 16 - SCHEMA EXPLICATIF DU PROCESSUS DE FABRICATION DES TUYAUX PAR MOULAGE PAR VIBRATION (CONDUITES ET PRODUITS BETON, 2021)	54
FIGURE 17 – REPARTITION DES EFFORTS DANS UN TUYAU	55
FIGURE 18 – ÉTAPES DE FISSURATIONS DES TUYAUX EN BETON ARME LORS DE LEUR UTILISATION (DANGOL, 2023).....	57
FIGURE 19 – EXEMPLE D'UN ESSAI DE CHARGEMENT DIAMETRAL SUR UN TUYAU DE BETON (MEGACON PRECAST CONCRETE, 2020).....	58
FIGURE 20 – TYPE DE RUPTURES DES TUYAUX LORS DU TEST DE RESISTANCE A 3 POINTS A) RUPTURE EN FLEXION, B) RUPTURE EN CISAILLEMENT (DANGOL, 2023)	59
FIGURE 21 – COURBE GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT FIN DES TUYAUX	67
FIGURE 22 – COURBE GRANULOMETRIQUE DU GRANULAT GROSSIER DES TUYAUX	69

FIGURE 23 – RESISTANCE A LA COMPRESSION A 7 JOURS ET A 28 JOURS POUR LES MELANGES DE BETON	70
FIGURE 24 – COUPE TYPE D'UN TUYAU.....	71
FIGURE 25 – MONTAGE EXPERIMENTAL POUR LES ESSAIS SUR SECTION DE TUYAUX EN LABORATOIRE	73
FIGURE 26 – RESISTANCES EN COMPRESSION A 28 JOURS POUR LES MELANGES FABRIQUES EN LABORATOIRE ET EN INDUSTRIE SELON LES DIFFERENTS POURCENTAGES DE CIMENT SUBSTITUE PAR LES RB	74
FIGURE 27 – EXEMPLE DE BETON AVEC AGGLOMERATIONS DE RB NON DEFAITS POUR UN CYLINDRE AVEC 30% DE RB	75
FIGURE 28 – MODULE D'ELASTICITE SELON LE POURCENTAGE DE CIMENT SUBSTITUE PAR LES RB POUR LES MELANGES DES TUYAUX	76
FIGURE 29 - RELATION CHARGE APPLIQUEE-DEPLACEMENT VERTICAL POUR DIFFERENTES SECTIONS DES TUYAUX FAITS DES MELANGES INCORPORANT EN REMPLACEMENT DU CIMENT A) 0%, B) 15%, C) 30% ET D) 40% DE RB	78
FIGURE 30 – PREMIERES FISSURES ET FISSURATION FINALE DES SECTIONS DE TUYAUX AVEC 0% DE RB.....	80
FIGURE 31 - PREMIERES FISSURES ET FISSURATION FINALE DES SECTIONS DE TUYAUX AVEC 15% DE RB.....	81
FIGURE 32 - PREMIERES FISSURES ET FISSURATION FINALE DES SECTIONS DE TUYAUX AVEC 30% DE RB.....	82
FIGURE 33 - PREMIERES FISSURES ET FISSURATION FINALE DES SECTIONS DE TUYAUX AVEC 40% DE RB.....	83
FIGURE 34 – IDENTIFICATION DES AGGLOMERATIONS DE RB SUR LES PAROIS DE LA SECTION DE TUYAU RC15-2	85
FIGURE 35 – ÉLEMENTS BARRE POUR LES ELEMENTS DE RENFORCEMENT DES MODELES DE VECTOR2 (WONG ET AL., 2013)	93
FIGURE 36 – ÉLEMENTS TRIANGULAIRES POUR LE MAILLAGE DANS VECTOR2 (WONG ET AL., 2013)	94
FIGURE 37 - ÉLEMENTS RECTANGULAIRES POUR LE MAILLAGE DANS VECTOR2 (WONG ET AL., 2013)	94
FIGURE 38 - ÉLEMENTS QUADRILATERES POUR LE MAILLAGE DANS VECTOR2 (WONG ET AL., 2013)	95
FIGURE 39 – MAILLAGE DES POUTRES A) B2.6, B) B3.2 ET C) B3.6.....	97
FIGURE 40 – MAILLAGE ET CONDITIONS D'APPUI DU MODELE D'UN QUART DE SECTION DE TUYAU TESTE EN LABORATOIRE	101

FIGURE 41 –COMPORTEMENT EFFORT TRANCHANT–DEPLACEMENT VERTICAL DES MODELES NUMERIQUES (MOD) ET DES ESSAIS EN LABORATOIRE (LAB) POUR LES GEOMETRIES DE POUTRES A) B2.6, B) 3.2 ET C) B3.5	107
FIGURE 42 – COMPARAISON DE LA FISSURATION POUR LES POUTRES B2.6, B3.2 ET B3.5	110
FIGURE 43 – COMPORTEMENT EFFORT TRANCHANT–DEPLACEMENT VERTICAL DES MODELES DES POUTRES B3.5 AVEC RETRAIT (MOD RETRAIT) ET DES ESSAIS DE LABORATOIRE (LAB).....	111
FIGURE 44 – COMPORTEMENT CHARGE-DEPLACEMENT VERTICAL DES SECTIONS DES TUYAUX PREDITS NUMERIQUEMENT ET OBTENU DES ESSAIS DE LABORATOIRE POUR LES DIFFERENTS MELANGES DE BETON A) RC0, B) RC15, C) RC30, D) RC40.....	113
FIGURE 45 – COMPORTEMENT CHARGE-DEPLACEMENT HORIZONTAL DES SECTIONS DES TUYAUX PREDITS NUMERIQUEMENT ET OBTENU DES ESSAIS DE LABORATOIRE POUR LES DIFFERENTS MELANGES DE BETON A) RC0, B) RC15, C) RC30, D) RC40.....	114
FIGURE 46 – PROFONDEUR EFFICACE, D, DE L'ARMATURE POUR LE SOMMET ET LE FLANC DROIT DU TUYAU	115
FIGURE 47 – FISSURATION A LA RUPTURE DES SECTIONS DES TUYAUX PREDITE NUMERIQUEMENT, A) RC0, B) RC15, C) RC30 ET D) RC40	118

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je tiens à remercier infiniment mon directeur de recherche, M. Mathieu Fiset, pour sa confiance, sa grande disponibilité, ses nombreux encouragements tout au long de ce projet et pour la réponse à mes nombreuses questions. Je désire également adresser mes remerciements à mon co-directeur de recherche, M. Guy Simard, pour sa curiosité et sa passion dans le projet ainsi que pour ses mots d'encouragements.

J'aimerais aussi remercier Jean-Benoît Darveau qui m'a aidé pour les mélanges de béton, mais qui a aussi apporté un soutien et des conseils pertinents tout au long du projet.

Je tiens également à remercier David Noël pour son support, pour son aide pour les mélanges de béton et la réalisation des nombreux essais. Grâce à lui, des tuyaux ont pu être testés pour la première fois à l'UQAC. J'aimerais aussi remercier Yannick Gagnon et Patrice Paquette qui ont aussi aidé à rendre possible la réalisation des différents essais en laboratoire.

Ensuite, je voudrais aussi remercier le Centre universitaire de recherche sur l'aluminium (CURAL), pour l'environnement de recherche agréable et de m'avoir permis de réaliser ce projet. Merci à Reza Jafari, coordonnateur du partenariat RT-UQAC pour le volet valorisation, de m'avoir permis de réaliser ce projet de maîtrise. J'aimerais aussi remercier Joëlle Lachance qui a été d'une grande aide dans la logistique. Merci à Véronique Savard et Pascal Vandal pour leurs encouragements et leur soutien. Merci également à toute l'équipe du CURAL étudiants et techniciens pour leurs conseils et le bel esprit d'équipe.

Merci à l'entreprise Rio Tinto (RT) pour le support financier, le temps et l'expertise des chargés de projets. Je tiens à remercier Mathieu Girard, Simon Laprise et leur équipe de la société Béton Préfabriqué Du Lac (BPDL) pour leur implication, leur expertise technique sur le béton, pour le temps qu'il nous ont donné et pour l'opportunité de la fabrication des tuyaux en usine et toute la logistique qui est venue avec.

De plus, je désire souligner l'important soutien financier des bourses universitaires MITACS, de la bourse Alexander-Graham-Bell Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), de la bourse de maîtrise en recherche B1X du Fonds de recherche du Québec (FRQNT) ainsi que le support de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), du centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), du centre de recherche sur l'aluminium REGAL et le groupe de recherche risque, ressources eau (R2Eau) de l'UQAC.

Je remercie aussi ma famille et mes amis pour leur support et leur encouragement à terminer ma maîtrise. J'aimerais faire une mention spéciale à mon conjoint Gabriel Lapointe, pour son soutien indéfectible dans les hauts comme dans les bas, et pour avoir toujours cru en moi.

Finalement, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont directement ou indirectement contribué à la réalisation de ce projet. Ce fut un privilège de collaborer avec des personnes aussi compétentes et passionnées.

AVANT-PROPOS

Ce projet de maîtrise est né d'un stage d'été en recherche effectuée au CURAL en 2023, au cours duquel j'ai pu approfondir les premières étapes du travail scientifique et m'intégrer à une équipe de recherche. Au cours de cet été, j'ai rédigé un article de conférence et j'y agis comme deuxième auteure. Cet article de conférence a été publié à : *The 12th ACI/RILEM International Conference on Cementitious Materials and Alternative Binders for Sustainable Concrete* (ICCM2024). Cet article examine l'utilisation du résidu de bauxite, matière résiduelle à l'étude pour le présent mémoire, comme liant géopolymère dans le béton. Ma contribution à cet article a consisté à mener, fabriquer et caractériser certains des mélanges de béton géopolymère à l'étude, à rédiger la première version du manuscrit et à appliquer les révisions demandées. Ce travail a servi d'inspiration pour ce projet de maîtrise et la version publiée de l'article se retrouve à l'Annexe 1.

Le mémoire présenté a été réalisé dans le cadre de mon projet de maîtrise au sein du Centre de recherche sur l'aluminium (CURAL) de l'Université du Québec à Chicoutimi, en collaboration avec les partenaires industriels Rio Tinto et Béton Préfabriqué du Lac (BPDL). La collaboration avec Rio Tinto a permis d'avoir accès aux résidus de bauxite et d'avoir leur expertise. La collaboration avec BPDL a permis la fabrication de tuyaux en usine. Cette recherche s'inscrit dans les projets de valorisation des résidus de bauxite du partenariat entre le CURAL et Rio Tinto.

Ce mémoire est présenté sous une forme de mémoire par articles. Le corps du mémoire contient deux articles de journaux présentés sous forme de chapitres distincts. Le premier article présenté au chapitre 2 s'intitule : *Flexural and Shear Behaviour of Reinforced Concrete Beams Incorporating Bauxite Residue*. Cet article a été publié le 13 avril 2026 dans le journal *Materials and Structures* (journal de quartile Q1, facteur d'impact 1,092). Mon rôle comme première auteure a été de mener les travaux de recherche, d'analyser les résultats et de rédiger la première version du manuscrit que j'ai soumis à l'éditeur. Le second article présenté au chapitre 4 s'intitule : *Caractérisation et essais mécaniques sur des tuyaux en béton pour les infrastructures urbaines*. Cet article sera soumis ultérieurement à *Journal of Structural Engineering* (journal Q1, facteur d'impact 1,349). Mon rôle comme première auteure a été de mener les travaux de recherche, d'analyser les résultats et de rédiger la première version du manuscrit en français présenté dans ce présent mémoire.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde (Ashley & Lemay, 2008), entre autres pour la construction de bâtiments, de ponts, d'ouvrages d'art et de routes. Les principaux constituants du béton sont les granulats, le ciment, l'eau et les adjuvants. Le principal constituant responsable des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le béton est le ciment portland. En effet, la production d'une tonne de ciment contribue à la génération directe d'environ une tonne de GES (Naik, 2008). Cette génération est principalement due au processus très énergivore de calcination clinker duquel est issu le ciment portland (Rességuier, 2024). Étant donné que la quantité de béton utilisée mondialement tend à croître année après année, sans signe de ralentissement, il est attendu que l'utilisation de ce matériau sera encore prédominante pour longtemps. Afin de réduire l'apport en GES de l'industrie du béton, plusieurs chercheurs ont proposé de nouveaux ajouts cimentaires permettant de réduire la quantité de ciment, ou simplement de nouveaux types de liants sans ciment (Tremblay, 2021). Le résidu de bauxite (RB) a été identifié par certains chercheurs comme ajout cimentaire potentiel. Mondialement, la production d'aluminium engendre l'accumulation d'environ 150 millions de tonnes de RB par année (International Aluminium Institute, 2020). La majorité de ces résidus sont accumulés dans des sites de disposition contrôlés, ce qui impacte les écosystèmes et les milieux. Ce résidu se retrouve d'ailleurs en très grande quantité dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean au Québec (Canada), et l'accumulation cumulée de millions de tonnes par année pose des défis environnementaux majeurs pour la région. Face à ces enjeux, l'utilisation du résidu de bauxite comme ajout cimentaire dans le béton se présente comme une solution novatrice et durable permettant de valoriser ces matières résiduelles tout en répondant aux besoins de l'industrie de la construction. C'est en lien avec ces enjeux que s'inscrit le projet qui, de façon générale, vise à étudier la performance du RB filtré pressé produit dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire, pour la fabrication d'un béton répondant à des exigences de performances structurales.

1.2 OBJECTIFS

L'objectif général de ce projet est de développer un béton à base de résidu de bauxite filtré-pressé (RB FP) produit au Saguenay–Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire, pour une utilisation structurale, et pour la fabrication de tuyaux de béton destinés aux infrastructures urbaines. Pour atteindre cet objectif, les 5 sous-objectifs (SO) suivants sont visés :

SO1 : Développer et caractériser à l'état frais et durci un béton à base de ciment portland maximisant le RB FP produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire, dont les performances mécaniques permettent son utilisation à des fins structurales et pour la fabrication de tuyaux de béton ;

SO2 : Évaluer la performance en flexion-cisaillement de poutres armées composées du béton de RB développé ;

SO3 : Concevoir et évaluer la performance d'un élément d'infrastructure urbaine (tuyau de béton) composé du béton de RB développé ;

SO4 : Mieux comprendre l'effet du RB comme ajout cimentaire sur les propriétés mécaniques du béton ainsi que les répercussions sur le comportement structural en flexion-cisaillement observables à l'échelle des tuyaux d'infrastructure urbaine ;

SO5 : Évaluer la performance des outils et des méthodes de conception conventionnelles utilisés en génie civil, prescrits pour les éléments faits de béton de ciment portland, pour les éléments constitués du béton de RB développé.

1.3 CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE

Jusqu'à ce jour, la majorité des travaux portant sur l'incorporation de RB dans le béton se limitent principalement à des essais sur matériau, par la caractérisation des propriétés sur des éprouvettes de mortier ou de béton conventionnel. Dans la littérature recensée, présentée ultérieurement au chapitre 2 et au chapitre 4, un seul auteur a étudié le comportement du béton de RB à l'échelle structurale, avec un nombre très limité d'essais (3) sur de petits éléments structuraux, soient des poutrelles montrant toutes un mode de rupture en flexion, un mode de rupture qui est dicté par la performance de l'armature en acier plutôt que par celle du béton.

Ce projet de recherche se distingue à quatre principaux niveaux. Le projet propose d'abord une approche novatrice pour la valorisation du RB comme ajout cimentaire dans un nouveau béton sans affaissement pour tuyaux d'infrastructure urbaine. Très peu de recherches ont étudié le RB spécifique produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire et aucune n'a porté sur un béton sans affaissement. Le béton sans affaissement développé pour les tuyaux de béton représente donc une contribution scientifique novatrice importante. Ensuite, l'étude du comportement en flexion-cisaillement sur poutre renforcée de béton de RB et sur les éléments courbes de tuyaux représente un apport scientifique important, par l'ajout d'un nombre significatif de résultats expérimentaux sur poutres (9) et sur sections de tuyaux (12) permettant d'apprécier différents taux de substitution du ciment par du RB, et différentes configurations de chargement et de modes de rupture (flexion et cisaillement) caractéristiques des structures de génie civil. Parallèlement, l'analyse numérique des pièces testées en laboratoire apporte une meilleure compréhension du comportement observé et elle permet de valider pour la première fois un outil de conception typique appliqué au béton de RB, ce qui représente à la fois une contribution scientifique et pratique. L'étude de faisabilité de la fabrication à l'échelle industrielle repousse finalement les contributions scientifiques susmentionnées à un niveau pratique et appliqué, et elle apporte de nouvelles connaissances sur les performances et les limites d'utilisation du RB dans le béton.

1.4 STRUCTURE DU PROJET

Afin d'atteindre les objectifs de ce projet, celui-ci a été structuré en quatre étapes principales. Après avoir effectué une revue de la littérature sur l'utilisation des résidus de bauxite (RB) dans le béton, la première étape consiste à développer, optimiser et caractériser des mélanges de béton intégrant ces résidus en substitution partielle du ciment. Cette phase comprend des essais en laboratoire pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques des mélanges, tels que la résistance à la compression, la maniabilité, la durabilité et la microstructure.

Une fois les mélanges caractérisés et validés, la deuxième étape porte sur la fabrication et les essais de poutres en béton armé contenant des RB. Ces essais de chargement visent à analyser l'impact des résidus de bauxite sur le comportement structural en flexion-cisaillement du béton de RB renforcé, notamment en termes de capacité portante, de ductilité, de fissuration et de mode de rupture. Les résultats obtenus permettront de juger de la pertinence de ce matériau pour des éléments structuraux soumis à des sollicitations réelles.

Sur la base des performances observées lors des essais sur poutres, la troisième étape consiste à caractériser les mélanges de béton sans affaissement avec RB, puis à fabriquer et tester des tuyaux faits de ce béton et destinés à être utilisés dans les infrastructures publiques, telles que les réseaux d'égouts ou de drainage. Ces essais permettront de vérifier que les tuyaux répondent aux exigences des normes techniques en vigueur (résistance mécanique, étanchéité, durabilité), tout en confirmant les conclusions tirées des essais précédents sur poutres concernant l'effet des RB sur les propriétés structurelles.

Enfin, la quatrième et dernière étape du projet vise à comparer les résultats expérimentaux obtenus sur les poutres et les tuyaux avec ceux issus de simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel VecTor2. Cette analyse permettra d'évaluer la capacité des outils de modélisation existants à prédire le comportement de structures en béton incorporant des RB.

1.5 STRUCTURE DU MÉMOIRE

Afin de rendre la lecture de ce mémoire plus fluide et d'en faciliter la compréhension, un aperçu de sa structure est présenté ci-dessous :

Le chapitre 1 introduit le projet en situant son contexte scientifique et environnemental, en posant la problématique qui a motivé l'étude et en définissant les objectifs poursuivis. Cette première partie vise à établir les fondements du projet de recherche.

Le chapitre 2 présente un article scientifique publié, intitulé *Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Incorporating Bauxite Residue*. Cet article publié dans le journal *Materials and Structure* expose en détail les résultats expérimentaux des essais de flexion réalisés sur des poutres en béton. Il compare les performances des poutres fabriquées avec du béton témoin à celles intégrant des pourcentages variables de résidu de bauxite (RB), en analysant les différences observées tant sur le plan mécanique que structural.

Le chapitre 3 vient compléter et enrichir les résultats présentés dans le chapitre 2. Il propose un complément à la revue de littérature, puis décrit les matériaux utilisés pour la fabrication des poutres ainsi que la caractérisation détaillée des différents mélanges de béton, en mettant particulièrement l'accent sur leurs propriétés physiques, mécaniques et de durabilité.

Le chapitre 4 présente un second article scientifique, intitulé : Caractérisation et essais mécaniques sur des tuyaux pour les infrastructures urbaines. Ce chapitre élargit le champ d'études en s'intéressant aux applications du béton à base de RB dans la fabrication de tuyaux d'infrastructures urbaines. Il comprend à la fois la description des mélanges spécifiques utilisés et l'analyse des résultats des essais mécaniques menés sur ces éléments structuraux.

Enfin, le chapitre 5 constitue un chapitre complémentaire liant les deux précédents articles (chapitre 2 et chapitre 4) par une approche numérique. Il compare les résultats expérimentaux

obtenus pour les poutres et les tuyaux à ceux issus de modélisations numériques réalisées à l'aide du logiciel VecTor2. Cette comparaison permet d'approfondir la compréhension du comportement structural du béton contenant du résidu de bauxite et d'en évaluer le potentiel pour une utilisation à des fins structurales.

Le schéma suivant propose un ordre de lecture recommandé pour une compréhension optimale du mémoire :

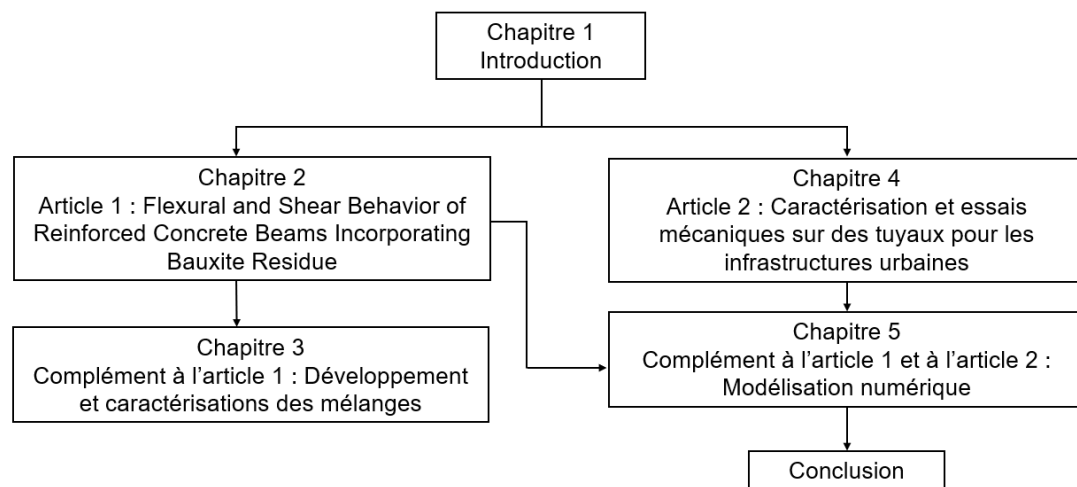


Figure 1 – Ordre de lecture suggéré pour le mémoire

CHAPITRE 2

ARTICLE 1 : « FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS INCORPORATING BAUXITE RESIDUE »

Garneau, E. ^(a), Fiset, M. ^(b), Darveau, J-B ^(c), Simard, G. ^(d)

(a) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, emilie.garneau1@uqac.ca (Corresponding author)

(b) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, Mathieu_fiset@uqac.ca

(c) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, jbdarvea@uqac.ca

(d) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, Guy_simard@uqac.ca

Article publié le 13 avril 2026 dans le journal Materials and Structure. Ce journal est de Quartile Q1 en génie civil et génie des structures.

2.1 CONTRIBUTIONS

Les contributions de l'étudiante ^(a) comme première auteure sont les suivantes :

- Revue de l'état de l'art ;
- Essais en laboratoire (fabrication des spécimens expérimentaux, réalisation des essais en laboratoire, collecte des données) ;
- Analyse et traitement des résultats ;
- Création des figures et graphiques ; Rédaction du manuscrit initial et des manuscrits révisés ;
- Soumission.

2.2 PRÉSENTATION ET RÉSUMÉ DE L'ARTICLE

Cet article porte sur l'évaluation expérimentale de la performance structurelle de poutres en béton armé fabriquées avec du béton contenant des résidus de bauxite (RB) utilisés comme

remplacement partiel du ciment portland. L'objectif principal est d'analyser l'influence de cette substitution sur le comportement en flexion et en cisaillement des poutres.

Dans cette étude, le ciment portland d'un mélange de béton de référence a été remplacé par des taux variant de 0 % (mélange de référence) à 25 % de résidus de bauxite, et la résistance à la compression a été mesurée après 7, 28 et 790 jours. Trois séries de trois poutres en béton armé, fabriquées à partir des mélanges sélectionnés (un de référence et deux contenant des RB), ont été testées sous un chargement à quatre points. Les résultats montrent qu'une augmentation de la teneur en RB entraîne une diminution de la résistance à la compression du béton. Des essais de compression ont été réalisés après plus de deux ans (790 jours) sur des cylindres conservés dans des contenants hermétiquement scellés. Les résultats ont montré une diminution de la résistance à la compression pour tous les mélanges de béton. Cette réduction devient plus marquée à mesure que la teneur en RB augmente. Par la suite, le comportement en flexion - cisaillement des poutres a été étudié et comparé à celui des poutres du mélange de ciment portland de référence (sans résidu de bauxite). Les poutres contenant du RB, critiques en cisaillement, ont présenté une résistance au cisaillement inférieure à celle des poutres sans RB. Pour les poutres élancées sans armature transversale, la résistance au cisaillement dépend principalement des propriétés mécaniques du béton, notamment de la résistance en traction (généralement proportionnelle au radical de la résistance à la compression) et de l'enchevêtrement des granulats aux fissures. Pour le béton utilisé dans ce projet, l'augmentation de la proportion de ciment remplacé par les RB entraîne une réduction de la résistance à la compression, ce qui diminue la résistance en cisaillement des poutres. Enfin, la résistance mesurée pour les poutres en béton armé testées a été comparée à la résistance nominale prédite selon les normes CSA A23.3 (2024), fib Model Code 2010 (fib, 2013) et ACI-318-19 (2019). Les résultats montrent que les différentes méthodes de calcul permettent de prédire la capacité des poutres en béton armé contenant des RB, les différences observées étant attribuables au modèle de calcul lui-même plutôt qu'à la présence de RB dans le béton.

2.3 APPORT SCIENTIFIQUE

À ce jour, très peu de recherches ont étudié le RB spécifique produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire. Le présent article constitue ainsi la première étude à examiner expérimentalement le comportement en flexion et en cisaillement de poutres en béton armé intégrant ce RB. Cet article se distingue également par l'ampleur de son plan expérimental. En effet, celui-ci comprend neuf essais sur poutres permettant d'analyser différents taux de substitution du ciment par le RB, diverses géométries de poutres, plusieurs configurations de chargement (rapport a/d) ainsi que différents modes de rupture, en flexion et en cisaillement, représentatifs des structures de génie civil. Finalement, cette recherche se démarque par la comparaison des résultats expérimentaux des poutres de béton avec RB aux prédictions des codes de conception en vigueur, le tout, dans le but d'évaluer la pertinence et la fiabilité des approches normatives pour ce béton innovant.

2.4 LIENS AVEC LES OBJECTIFS DU MÉMOIRE

Comme mentionné précédemment, la première étape du projet consiste à développer, optimiser et caractériser des mélanges de béton intégrant les RB en substitution partielle du ciment. Puis, une fois les mélanges caractérisés et validés, la deuxième étape porte sur la fabrication et l'essai de poutres en béton armé contenant des RB.

Cet article porte sur la caractérisation des mélanges de béton intégrant les RB et sur la fabrication et l'essai de poutres en béton armé contenant des RB, donc il répond directement à ces étapes du projet. Également, ces étapes permettent aussi de répondre aux sous- objectifs 2 et 5 du projet qui sont d'évaluer la performance en flexion-cisaillement de poutres armées composées du béton de RB développé. Puis d'évaluer la performance des outils et des méthodes de conception utilisées en génie civil pour les éléments constitués de béton où une partie du ciment est substituée par des RB.

2.5 INTÉGRALITÉ DE L'ARTICLE

2.5.1 ABSTRACT

This paper investigates the structural performance of reinforced concrete beams incorporating bauxite residue (BR) as a partial replacement for cement, with a specific focus on the flexural and shear behaviour. First, portland cement in a reference concrete mixture was replaced with 0% (reference) to 25% bauxite residue and compressive strength was determined at 7, 28 and 790 days. Three series of three reinforced-concrete beams made with selected concrete mixtures (one 1 reference and two with bauxite residue) were tested under four-point loading. The results show that increasing the bauxite residue content reduces concrete compressive strength. Compressive tests were carried out after more than two years (790 days) for cylinders stored in hermetically sealed container and results showed a decrease in compressive strength for all the concrete mixtures. This reduction becomes more pronounced with higher BR content. Then, the flexural and shear behaviours of beams were investigated and compared with those made using the reference portland cement mix. Shear-critical beams with bauxite residue exhibited a lower shear capacity compared to the beams without bauxite residue. For beams without shear reinforcement, shear resistance primarily depends on the concrete mechanical strength, through tensile strength and aggregate interlock for slender beams. For the concrete used in beams of this project, increasing the proportion of cement replaced with BR leads to a decrease in compressive strength, which in turn reduces the shear carrying capacity of beams. Finally, the load-carrying capacity obtained for the tested reinforced concrete beams was compared with the nominal capacity predicted using standards CSA A23.3 (2019), and the fib model code 2010 (International Federation for Structural Concrete, 2013), and ACI-318-19(22) (2019). The results show that the different calculation methods can be used to predict the capacity of reinforced concrete beams with BR. The bias is attributable to the calculation model itself rather than to the presence of BR.

Keywords: Bauxite residue, cement replacement, reinforced concrete beams, flexural and shear behavior, mechanical properties

2.5.2 INTRODUCTION

Concrete is recognised as the most widely used construction material (Ashley & Lemay, 2008). The production of one tonne of portland cement in concrete however produces approximately one tonne of greenhouse gas (GHG) (Durastanti & Moretti, 2020; Elehinafe et al., 2022; Naik, 2008). Since concrete will most likely remain a crucial material for the foreseeable future, the replacement of cement with by-products has been identified by these authors as a solution to lower the environmental impact of concrete.

Numerous studies have explored the replacement of cement with different industrial by-products in concrete. Among them, cement has been substituted with ground granulated blast furnace slag (GGBFS), silica fume, and fly ash for more than fifty years. When added to concrete, these industrial by-products are known to contribute to pozzolanic reactions, which improve the concrete mechanical properties and durability (Al-Jabali et al., 2024; Bentur & Goldman, 1989; Halstead, 1986; Palaniappan & Govindasamy, 2021; Umniati & Risdanareni, 2017). As concrete properties improve, these industrial by-products are in great demand. Ongoing research seeks to find other by-products to replace part of the cement, which could not only improve the properties of concrete, but also reduce its ecological footprint. More recently, waste glass (Aladdine et al., 2009; Patel et al., 2015), steel dust (Jahami et al., 2023), and bauxite residue (BR) have been used to replace portland cement in concrete with promising results.

Globally, aluminum production generates approximately 150 million tonnes of BR annually (International Aluminium Institute, 2020). This vast quantity of BR is typically stored in controlled disposal sites. This residue is also produced by the refinery of Rio Tinto in the Saguenay–Lac-Saint-Jean region of Quebec, Canada, and could represent an important source of material with potential valorisation in concrete.

Brahami (2023); Hou et Wu (2021); Qureshi et Ahmad (2022); Tang et Wang (2018) have replaced 5 to 20% (weight ratio) of cement with BR in normal-strength concrete (compressive

strength, f'_c , of about 20 to 40 MPa). Their results showed that the workability of concrete with BR, determined by slump test, decreases with the replacement of cement with BR.

Regarding the compressive strength, Brahami (2023) observed that replacing 5 and 10% of the cement with BR increased the compressive strength by about 17%, compared to a reference concrete without BR. However, for replacement ratios of 15 and 20%, a decrease in compressive strength by about 17% was observed. Metilda et Selvamony (2015) achieved the highest compressive and tensile strength by replacing 15% of the cement with BR, compared to a reference concrete mixture without BR. For replacement ratios from 0 to 15%, these authors observed that the concrete strength increased proportionally to the BR-to-cement replacement ratio. For replacement ratios above 15%, concrete strength decreased across all tests.

Venkatesh et al. (2020) investigated the replacement of cement with BR at proportions of 5, 10, 15, and 20%. The highest compressive strength was achieved at a 10% replacement level with an increase of 10.4% compared to the reference concrete. At replacement ratios of 15 and 20%, compressive strength decreased. The authors attributed this decrease to an insufficient cement hydration caused by the high BR content. Rathod et al. (2013) substituted 5% to 40% of cement with BR. Up to a substitution of 25%, the compressive strength remained above the one determined for the reference concrete mixture, and with 5% substitution ratio the concrete mixture exhibited a 33% increase in strength. Similarly, Viyasun et al. (2021) conducted experiments by replacing 10, 20, and 30% of cement with BR and observed a 9.3% increase in compressive strength for 20% replacement. Further increase in BR percentage did not result in any additional increase in concrete compressive strength. Palaniappan et Govindasamy (2021) observed that the concrete mixtures with 10% and 15% BR replacement exhibited compressive strengths approximately 10 to 12.5% higher than the reference concrete mixture without BR, while concrete with 5% BR exhibited compressive strength similar to the reference concrete. These authors also examined the flexural performance of reinforced concrete beams incorporating these BR concrete mixtures. Four-point bending tests were carried out on rectangular beams (1100 × 150 × 100 mm) reinforced with two 8 mm diameter steel bars at both

top and bottom, and 6 mm diameter stirrups spaced at 120 mm. All tested beams showed similar first cracking load, while the flexural capacity of beams with 5%, 10% and 15% BR increased by 20, 32.5 and 2.5% compared to the beam with the reference concrete mixture without BR, respectively. It is interesting to note that these increases in beam flexural strength and compressive strength differ.

Some researchers have also obtained strength reductions for normal-strength concrete with BR. Nikbin et al. (2018) conducted experiments on lightweight concrete incorporating BR as a partial replacement of cement at levels ranging from 5 to 25%. The results showed that compressive strength tends to decrease as the BR content increased, with up to 30% reduction with 25% of BR. A 4.1% reduction in compressive strength for a mixture with 10% of BR was also reported by Oltulu et Alameri (2019).

Dodoo-Arhin et al. (2017) tested mortar in which 5 to 25% of the cement was replaced with BR. For all mixtures, compressive strength decreased compared to the reference mix. The reductions ranged from 0.5 to 35.4%.

For high-strength concrete (f'_c of about 50 MPa), Tang et Wang (2018) tested self-compacting concrete and replaced 12.5, 25 and 50% of cement with BR. They found a negligible effect on compressive strength and Young's modulus at 28 days. However, concrete incorporating BR generally exhibited higher strength than the reference concrete at 56 and 90 days. Liu et Zhang (2011) investigated concrete incorporating calcined BR replacing 10, 20, 30 and 40% of cement. They found that the mixtures with BR showed compressive strength similar to the reference at 7 and 28 days, and higher strength at 56 and 90 days for the mixtures with 30 and 40% BR replacement. For ultra-high-performance concrete ($f'_c > 120$ MPa at 28 days) with BR, Hou et Wu (2021) however observed a gradual reduction in compressive strength for replacement ratios of 20, 40 and 60%.

2.5.3 RESEARCH SIGNIFICANCE

Industrial by-products, such as fly ash, silica fume, and GGBFS, have been used in structural concrete for decades, and past research has shown that their use positively affects the mechanical properties of concrete, as well as the structural performance of reinforced concrete beams. Ongoing research focuses on the use of new by-products to replace cement in concrete. Although numerous studies have examined the incorporation of these by-products into concrete, there is still limited understanding of their impact on the flexural and shear behaviour of reinforced concrete members, especially when bauxite residue is used to replace cement in concrete. This paper seeks to address this gap by first examining the short- and long-term mechanical performance of portland cement concrete incorporating 5 to 25% BR, based on compressive tests performed at 7, 28, and 790 days. Then, unlike previous studies that primarily focused on material-level properties or non-structural applications, this research examines the structural behaviour of full-scale rectangular reinforced concrete beams incorporating BR. These beams were tested under four-point loading at different shear span-to-depth ratios to examine their flexural and shear performance. Results will be compared to reference beams without BR as well as to CSA, fib, and ACI code predictions. The examination of the influence of material performance on the structural behaviour and code predictions offers original contributions toward the safe and sustainable implementation of BR in structural concrete applications.

2.5.4 CONCRETE MATERIALS

2.5.4.1 MATERIALS

A normal-strength concrete mixture (CSA A23.3, 2024) with portland cement type GU identified as BR0 was used as a reference. The fine and coarse aggregates came respectively from St-Henri and Bergeronne (QC, Canada). The water-to-binder ratio was 0.39 for the mixture BR0, including the superplasticizer (type TM Viscocrete 1000) and the air-entraining admixture (type TM Sika air 60). The proportions of the reference mixture are given in Tableau 1.

Tableau 1 - Reference concrete mixture proportions, in kg/m³

Cement	400
Bauxite residue	0
Fine aggregate (5 mm – 80 µm)	825.9
Coarse aggregate (5-14 mm)	950
Superplasticizer	2.60
Air-entraining admixture	0.15
Water	157.8

The concrete mixtures with BR are based on the reference mixture, except that the cement was replaced with BR (by mass) at substitution ratios of 5, 10, 15, 20, 22, and 25%. Also, the amount of superplasticizer and air-entraining agent was adjusted proportionally to the amount of cement and replaced with water. These mixtures are referred to as BR5, BR10, BR15, BR20, BR22, and BR25, respectively. The selected substitution ratios were based on the results previously obtained by Brahami (2023). The BR used in this research is an aluminium by-product produced at the Vaudreuil factory (Saguenay, Canada) from the alumina extraction through the Bayer process (Brough & Jouhara, 2020). BR is produced following the decantation stage of the slurry resulting from the extraction of the aluminium from bauxite by the Bayer process. BR used in this research was dried through pressure filtration to achieve solid fraction exceeding 65wt% (Savard, 2018). The BR used has a density of 3240 kg/m³ and a fineness of 8 micrometres. Tableau 2 presents the chemical composition of the used BR.

Tableau 2 - Chemical composition of bauxite residue

Composition	Mass ratio (%)
Na₂O	6.82
MgO	0.10
Al₂O₃	19.65
SiO₂	13.10
P₂O₅	0.14
SO₃	0.17
K₂O	0.09
CaO	1.85
TiO₂	4.51
V₂O₅	0.15
Cr₂O₃	0.09
MnO	0.02
Fe₂O₃	40.37
ZnO	0.00
ZrO₂	0.19
Ignition lost	11.81

2.5.4.2 CONCRETE MIXTURES FABRICATION PROCEDURE

The following methodology was followed to prepare 20 liters of the concrete mixtures. BR was first placed in a container with about two-thirds of the mixing water. This mixture was stirred for 5 to 10 minutes with a mixing paddle to break down any BR particle agglomerations, then set aside. The sand and coarse aggregate were added and mixed in the concrete mixer. The water and BR mixture previously prepared, along with the air-entraining agent, were then added to the mixer and mixed for

an additional minute, followed by the addition of the required amount of portland cement. The BR container was cleaned with the remaining mixing water, which was then added in the mixer. After the mixing process was completed, air content and slump were determined for all concrete mixtures in accordance with CSA A23.1/A23.2 (2024) 4C and CSA A23.1/A23.2 (2024) 5C. 8 standard cylinders (75 x 150 mm) were cast, moist cured (100% RH, 23°C) up to 28 days to determine the compressive strength in accordance with CSA A23.1/A23.2 (2024) 3C at 7, 28, and 790 days (cylinders stored in hermetically sealed container under ambient conditions after 28 days).

2.5.4.3 COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE MIXTURES

The average compressive strength determined for the concrete mixtures is presented in Figure 2a (average of three cylinders at 7 and 28 days, and two cylinders at 790 days, except for the mix with 5% RB, for which no cylinders remained at 790 days). As presented, the higher the BR content in the concrete mixture, the lower the compressive strength. This decrease becomes more pronounced in mixtures with 15% BR or more. The decrease in compressive strength comes from the reduction of cement content and its replacement by BR, a less-reactive material. Comparable results have been reported by Brahami (2023), Metilda et Selvamony (2015), Nikbin et al. (2018), Oltulu et Alameri (2019).

Figure 2b presents the compressive strength over time for the different mixes. Mixtures containing 0, 5 and 10% BR show a more pronounced increase in compressive strength from 7 to 28 days. In contrast, for mixtures with 15, 20, 22, and 25% BR, the curing between 7 and 28 days has a less significant effect on the compressive strength. A decrease in compressive strength is observed between 28 and 790 days for all concrete mixtures, and this reduction becomes more pronounced with higher BR content. For the mixture without BR, the compressive strength decreases from 52.2 to 51.4 MPa, whereas it decreases from 33.2 to 26.2 MPa for the mixture with 22% BR. As observed by several researchers, storage conditions can have a significant influence on the development of mechanical strength in concrete. In the present study, the specimens were stored in air under sealed conditions from 28 to 790 days, without any external moisture supply. Under similar conditions,

several authors have reported a reduction in the mechanical strength of ordinary portland cement concrete (without BR) due to the cessation of hydration and shrinkage (Bingöl & Tohumcu, 2013; Newman, 2003; Prem et al., 2013; Price, 1951; Rodríguez-Álvaro et al., 2025; Sajedi et al., 2012). Further investigations are required to better understand the effect of curing condition on the long-term strength development of BR concrete.

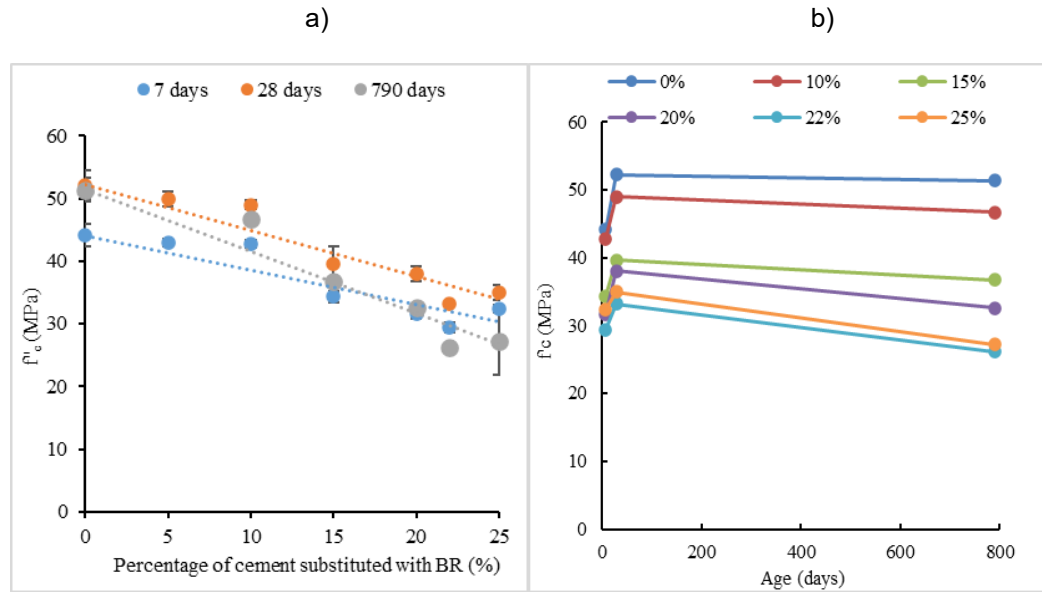


Figure 2 – a) Compressive strength of concrete mixtures and b) Compressive strength over time for the different mixes

2.5.5 BEAM SPECIMENS FABRICATION AND TESTING

2.5.5.1 CONCRETE MIXTURES USED FOR BEAMS

Based on the compressive strength results shown in Figure 2, three different concrete mixtures were selected for the beam tests. The mixture BR0 (i.e., without BR) was chosen as the reference. The mixture BR15 was selected because it presents an interesting balance between BR content and compressive strength. Additionally, according to Palaniappan et Govindasamy (2021), a 15% substitution ratio might even lead to an increase in flexural strength compared to the reference mixture BR0. Finally, the mixture BR22 was chosen as it maximizes the BR content without causing a significant loss in the compressive strength of the concrete.

For the fabrication of the beams, the same concrete mixing procedure was used, but for a volume of 100 litres. Similarly, the same characterisation tests were carried out on both fresh and hardened concrete, except for the compressive strength, which was determined on three cylinders at the day of the beam tests.

2.5.5.2 DESCRIPTION OF THE BEAM SPECIMENS

Three different reinforced concrete (RC) beam geometries identified B2.6, B3.2, and B3.5, and presented in Figure 3 were selected based on Collins et al. (2008) to observe shear and flexural failures (similar to beam 976 tested by Kani (1979), beam 1326 tested by Mansur et al. (1986) and beam 1420 tested by Shioya et al. (1990)). Each of the three selected concrete mixtures was used to fabricate and test one beam of each geometry, resulting in a total of nine reinforced concrete beams identified for example, B2.6-BR0, where B2.6 refers to the beam geometry (B2.6, B3.2, and B3.5) and BR0 refers to the concrete mixture (BR0, BR15, and BR22).

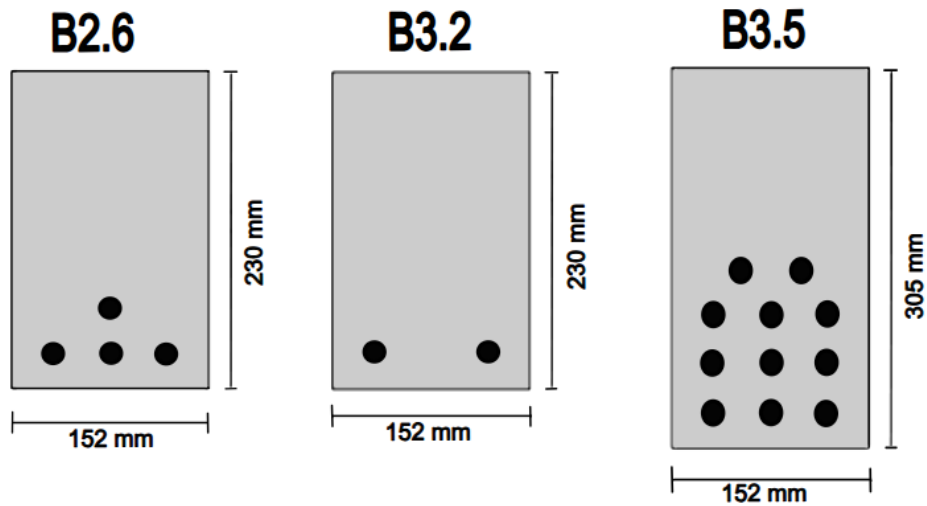


Figure 3 – Cross sections geometries B2.6, B3.2 and B3.5

All beams have a width, b , of 152 mm and were reinforced with 10M longitudinal reinforcing bars (11.3 mm diameter, 100 mm² cross-section area). For the reinforcing bars, a clear cover of 35 mm was used, while the bars vertical spacing was 41 mm. The average tested yield strength (average

of 3 tests), f_y , and the Young modulus, E_s , of the 10M – 400W steel grade reinforcing bars were 453 MPa and 213 GPa (CSA G30.18, 2021), respectively.

2.5.5.3 EXPERIMENTAL SETUP

All beams were tested according to the four-point bending test as illustrated in Figure 4. Each beam was simply supported on steel plates with dimensions of 127 × 140 × 25.4 mm (length × width × thickness). The load, V , was applied on two steel plates, both having the same dimensions and installed at a distance, a , from the centre of the nearest support. The distance, a , and the beam span, L , and the effective flexural depth, d , are presented in Tableau 3. This testing configuration results in a/d ratios of 2.6, 3.2 and 3.5 for beams B2.6, B3.2 and B3.5, respectively.

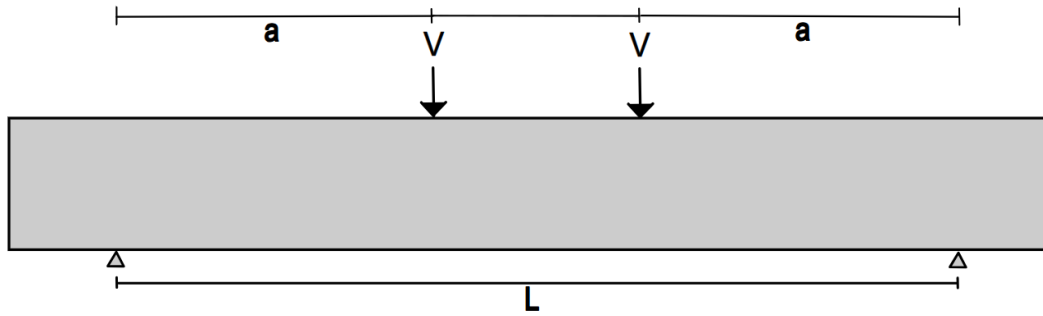


Figure 4 – Representation of the four-point bending test

Tableau 3 – Dimensions related to the four-point bending test

Beam geometry	B2.6	B3.2	B3.5
a (mm)	480	630	750
L (mm)	1260	1560	2000
d (mm)	184	194	213
a/d	2.6	3.2	3.5

For the beam tests, the load was applied quasi-statically at a loading rate of 0.1 mm/min. This loading rate was determined in order to reach failure in about 40 minutes. Each test was paused five times to monitor the beam cracking and take measurements. Deflection, Δ , was measured at mid-

span using a laser (Figure 5). The test was considered complete after shear or flexural failure occurred, and the load had decreased significantly.

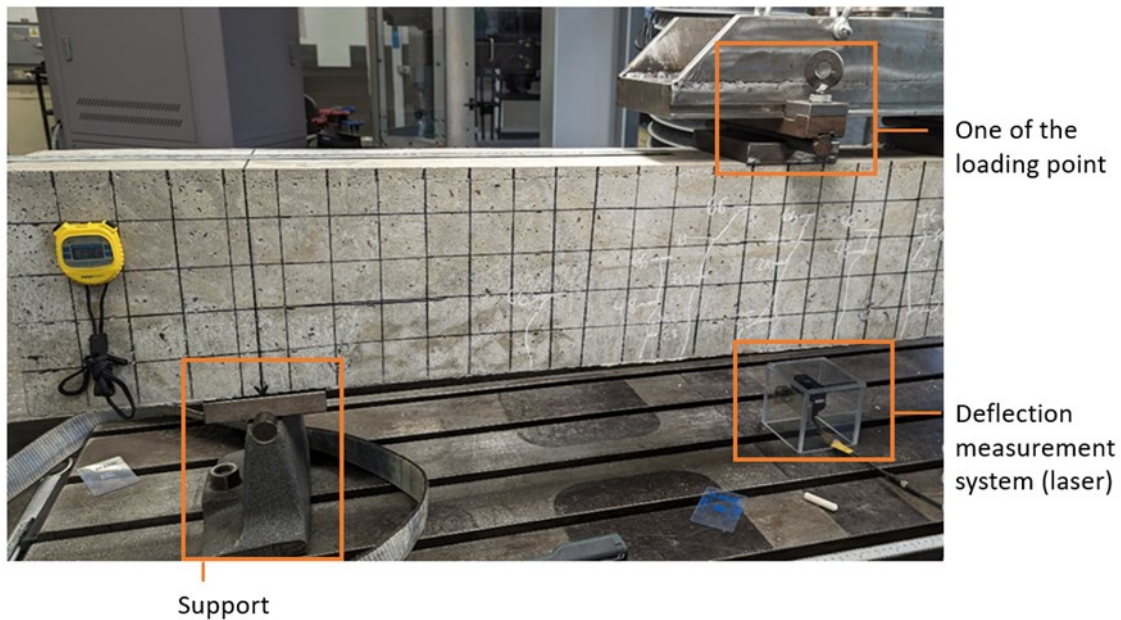


Figure 5 – Four-point bending test experimental setup of half of one beam test

2.5.6 RESULTS AND DISCUSSION

2.5.6.1 PROPERTIES OF CONCRETE USED FOR BEAMS

Figure 6 presents the slump (Figure 6a) and air content (Figure 6b) for the concrete mixtures used for beams, and Figure 7 presents their compressive strength. It can be seen that the mixtures without BR (BR0) and with 15% of BR (BR15) achieved the target slump value of $180 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$, whereas the BR22 mixture exhibited lower slump values. These results are consistent with previous studies that also reported a decrease in slump with increasing BR content in the mixtures (Brahmi, 2023; Hou & Wu, 2021; Qureshi & Ahmad, 2022; Tang & Wang, 2018). An adequate slump generally results in an improved workability, facilitates concrete placement in the formwork, and minimises the risk of void formation, thereby contributing to a more representative strength assessment.

Regarding the air content results, all mixtures present an air content withing approximately 4 to 6%, with only minor variations, except for the concrete mixture with 22% of BR used in beam B3.2-BR22, which showed a higher air content (about 10%). This increase is attributed to a slight deviation in the added amount of air-entraining admixture from the intended mix proportions for this specific batch. The voids in the cementitious matrix caused by entrained air do not contribute to the mechanical strength of the concrete, and the higher air content in this specific mixture may thereby reduces its compressive strength.

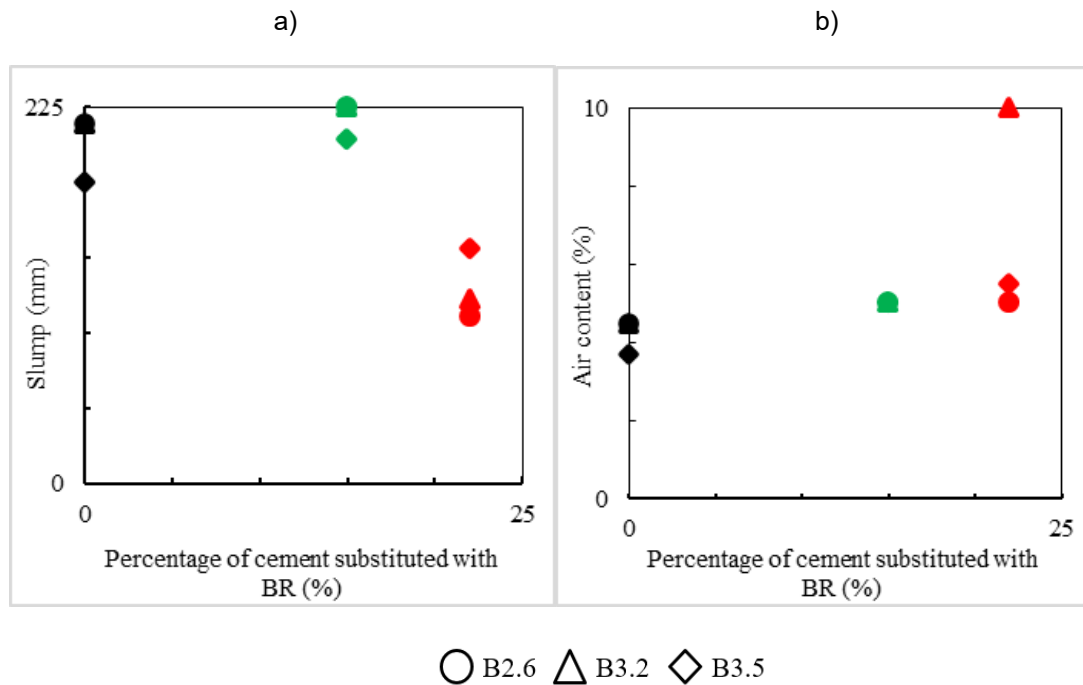


Figure 6 – a) Slump and b) air content for the concrete mixtures used for the beams

As observed in Figure 7, the compressive strength measured on the day of the beam testing decreases when the portion of cement substituted with BR increases. This reduction in strength is consistent with the results presented in section 3. An average reduction of 35% is observed for the concrete mixture with 15% BR, while the mixture with 22% BR shows an average reduction in compressive strength of 40%. The lower compressive strength of mixture BR22 for the geometry B3.2 could be explained by its higher air content.

The more pronounced decrease in the compressive strength of the concrete used in the beams can be attributed to the mixing conditions. A larger capacity mixer, filled to its maximum mixing capacity specified by the manufacturer and operating at a lower rotation speed, was used to cast the beams due to the need for a larger volume of concrete. This may have reduced the mixing efficiency (Dils et al., 2012; Ferraris, 2001), thereby leading to a decrease in the mechanical strength of the concrete compared to the results previously obtained (Figure 2).

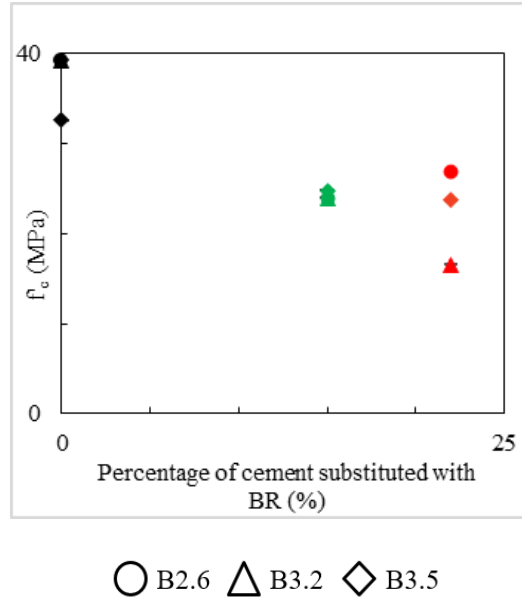


Figure 7 – Compressive strength of concrete used for beams

2.5.6.2 LOAD-DEFLECTION RESPONSE

Figure 8 presents the shear, V , versus deflection, Δ , response of tested RC beams, while Tableau 4 presents their load capacity and deflection at failure, and Figure 9 presents the corresponding cracking pattern. The analysis of cracking provides insights into the failure mechanisms of tested beams.

As shown in Figure 8, the stiffness (slope of the V - Δ response) is similar for all beams with the same geometry up to first cracking (V around of 10 kN). Generally, the load at first cracking, which corresponds to the first decrease in the beam stiffness in Figure 8, decreased as the BR content

increased. For example, for the beam geometry B3.2, the load at first cracking decreased from 14 kN to 9 kN as the BR content increased from 0% (B3.2-BR0) to 22% (B3.2-BR22).

Once loading resumes, the beam response remains mostly linear until a significant reduction in the beam stiffness, corresponding to the propagation and widening of critical cracks. It can be noted that the slight load drops observed during this linear phase are due to loading pauses required to monitor cracks progression.

Beam B2.6-BR0 (without BR) exhibited a flexural failure, characterized by a long ductile plateau in the beam response, from $V = 59$ to $V = 73.5$ kN, followed by a gradual reduction in the load. It is the crack that led to the failure of the beam. During this plateau, vertical cracks propagated and widened from the bottom to the top of the beam. It is the crack that led to the failure of the beam. The crack pattern at failure (Figure 9) indicated that both flexure and shear significantly affected beam B2.6-BR0 since one large vertical crack was observed at mid-span as well as one large diagonal crack at each beam side. Beam B2.6-BR0 is the only specimen exhibiting this typical flexural failure behaviour; all other tested beams exhibited a brittle shear failure, generally characterized by a sudden drop in the load and the propagation and widening of a diagonal crack on one side, except for beam B3.5-BR15 and B3.5-BR22, in which one diagonal crack developed on each side (see Figure 9). The propagation and widening of these two diagonal cracks correspond to the peaks preceding maximum load in Figure 8c for these beams.

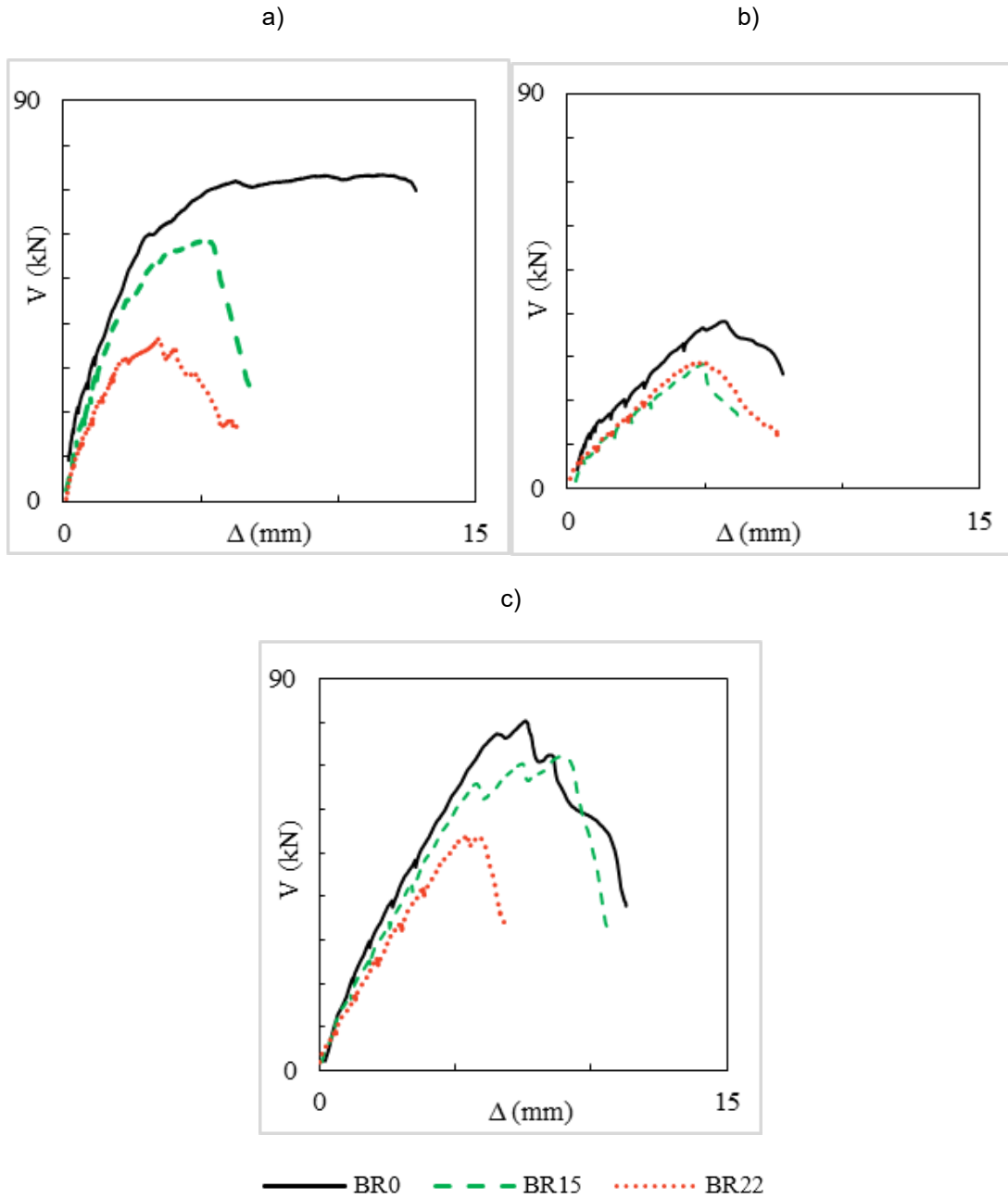


Figure 8 - Load-deflection response of beams without and with 15% or 22% bauxite residue (BR), with geometries a) B2.6, b) B3.2, and c) B3.5

In general, the load capacity, V_u , as well as the deflection at failure, Δ_u , of tested beams presented in Tableau 4 decrease with increasing the BR content. For the beam geometry B2.6, V_u decreased from 73.5 kN, for the reference concrete (B2.6-BR0), to 58.5 kN for the beam B2.6-BR15, and 36.7 kN for the beam B2.6-BR22, which represents a reduction of 20.4% and 50.1% when

15% and 22% of BR were used, respectively. The significant decrease in strength observed for the beam B2.6-BR22 could be attributed to an anchorage issue with the reinforcement such as an anchorage failure, as indicated by the sudden propagation of an horizontal splitting crack along longitudinal bars and near the support at failure (see Figure 9). For beam B2.6-BR22, the combination of a shorter span and a higher BR content caused the failure mode to shift from flexural and shear failure to anchorage failure. This transition from flexural to shear failure also explains the significant reduction in deflection at failure observed in beams B2.6-BR15 and B2.6-BR22 incorporating BR, compared to the reference beam B2.6-BR0 without BR (see Tableau 4). For the beam geometries B3.2, V_u decreased by about 24.7% regardless of the BR content ($V_u = 38.1$ kN, 28.7 kN and 28.6 kN for the beams B3.2-BR0, B3.2-BR25, and B3.2-BR22, respectively), while Δ_u , slightly decreased from 5.7 mm for the beam without BR to 4.7 mm for the beam with 22% BR (B3.2-BR22). For the beam geometry B3.5 with a higher shear span-to-depth ratio of 3.52, V_u decreased by 9.8% and 32.6% when 15% and 22% of BR were used to replace cement. The deflection Δ_u increased from 7.6 mm (B3.5-BR0) to 9.0 mm when 15% BR is used, while it decreased to 5.5 mm when 22% BR is used (beam B3.5-BR15).

Tableau 4 – Failure parameters of tested beams

Beam	Test results				Standard predictions			Comparison		
	Failure mode	V_u (kN)	Δ_u (mm)	$V_u/(bd\sqrt{f'_c})$	$V_{n,csa}$	$V_{n,ACI}$	$V_{n,fib}$	$V_u/V_{n,csa}$	$V_u/V_{n,ACI}$	$V_u/V_{n,fib}$
B2.6-BR0	Flexural	73.5	9.7	0.42	37.8	29.1	37.8	1.94	2.53	1.94
B2.6-BR15	Shear	58.5	5.2	0.43	31.8	22.7	31.8	1.84	2.58	1.84
B2.6-BR22	Shear/anchorage failure	36.7	3.5	0.23	33.1	24.1	33.1	1.11	1.52	1.11
B3.2-BR0	Shear	38.1	5.7	0.21	26.5*	26.6*	23.4*	1.44	1.43	1.63
B3.2-BR15	Shear	28.7	5.0	0.2	25.4*	24.0	22.9*	1.12	1.20	1.25
B3.2-BR22	Shear	28.6	4.7	0.24	23.3	19.9	23.3*	1.23	1.44	1.28
B3.5-BR0	Shear	80.3	7.6	0.43	55.2	30.7	56.5	1.45	2.61	1.42
B3.5-BR15	Shear	72.4	9.0	0.45	49.6	26.8	50.8	1.46	2.70	1.43
B3.5-BR22	Shear	54.1	5.5	0.34	48.7	26.2	49.8	1.11	2.06	1.09
Average:								1.41	2.01	1.44
Coefficient of variation:								0.22	0.30	0.21

* Flexural failure dominance

These results suggest that the addition of BR more significantly affects shear capacity of beams than flexural capacity. For beams without shear reinforcement, shear resistance primarily depends on the concrete mechanical strength, through tensile strength and aggregate interlock for slender beams (a/d greater than approximately 2.5 to 3.0), and through diagonal compressive strength for deeper beams (ACI-318-19, 2019; Bresler & MacGregor, 1967; Cavagnis et al., 2015; Yang et al., 2003). For these shear critical members, reduction in shear strength typically leads to a reduced deflection at failure. Flexural capacity primarily depends on the tensile strength (yield strength) of the longitudinal reinforcing bars, with concrete strength having a minimal effect.

As shown in Figure 2 and in Figure 7 for the concrete used in beams, increasing the proportion of cement replaced with BR leads to a decrease in compressive strength, which in turn reduces the shear carrying capacity of beams. This reduction in shear capacity shifts the observed failure mode from ductile flexural for beam B2.6-BR0 to brittle shear for beams B2.6-BR15 and B2.6-BR22. The reduction in carrying capacity of the other shear-critical beams can also mainly be attributed to the decrease in concrete strength.

The shear stress at failure normalized with the concrete compressive strength, $V_u/bd\sqrt{f'_c}$, is presented in Tableau 4. Except for the beam B2.6-BR22, for which it appears that longitudinal reinforcement anchorage limited the capacity, beams with the same geometry generally exhibit a similar normalized shear stress at failure. More specifically, all beams with 15% BR exhibited similar or slightly higher normalized shear stress than that of the reference concrete beams without BR. Increasing the BR content to 22% BR slightly increased the normalized shear stress supported by beam B3.2-BR22, while this normalized stress decreased by 21% for beam B3.5-BR22 compared to the reference beam B3.5-BR0 (1-0.34/0.43). The reduction in strength of beam B3.5-BR22 can be explained by the complete cracking of the beam after the diagonal crack appeared, whereas for beams B3.5-BR0 and B3.5-BR15, after the first crack appeared, there was a resumption of forces in the beam.

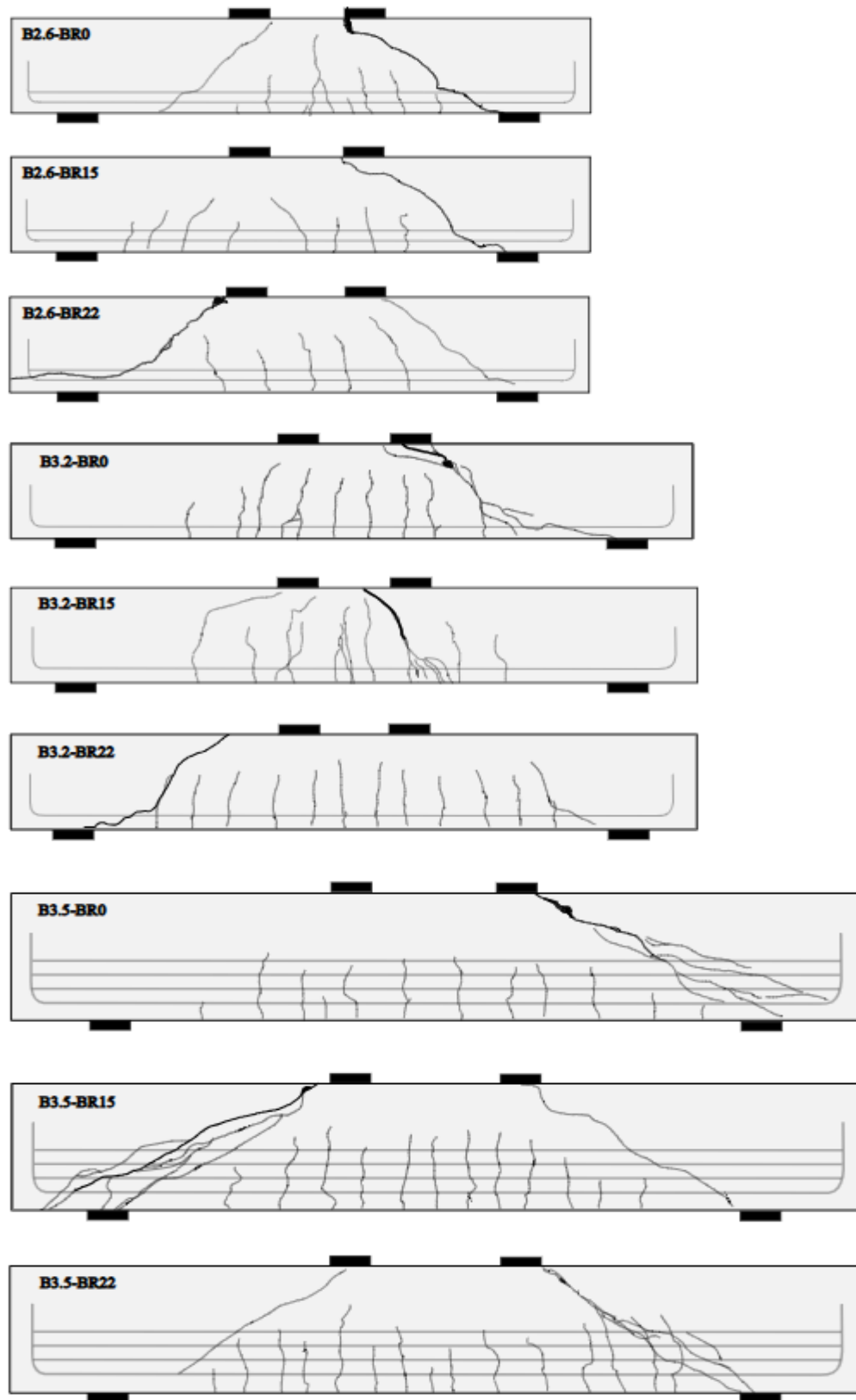


Figure 9 – Cracking pattern for tested beams

2.5.6.3 STANDARD PREDICTION ASSESSMENT

The load-carrying capacity obtained for the tested RC beams, V_u , was compared with the nominal capacity predicted using standard CSA A23.3 (2024), and the fib model code 2010 (fib, 2013), and ACI-318-19 (2019), denoted $V_{n,CSA}$, $V_{n,fib}$, and $V_{n,ACI}$, respectively. To calculate the nominal beam capacity, both resistance factors and safety factors were taken as unity. For CSA and fib shear predictions, the general method and the level II approximation were used, respectively.

Tableau 4 compares the predicted capacities with the test results. Generally, CSA and fib predictions slightly underestimate the beam capacity (on average, $V_u/V_{n,CSA} = 1.41$ and $V_u/V_{n,fib} = 1.44$, respectively), while ACI more significantly underestimates the beams capacity ($V_u/V_{n,ACI} = 2.01$). The prediction accuracy depends on the beam geometry. Beams geometry B2.6 exhibit a behavior that closely resembles to a deep beam, with a nonlinear stress distribution. As a result, their behaviour does not comply with the classical design assumption that plane sections remain plane, which explains the larger differences observed between the experimental results and the code predictions. In contrast, beams geometry with a/d ratios of 3.2 (B3.2) and 3.5 (B3.5) behave more like conventional slender beams, for which the plane-sections assumption remains valid. Consequently, their experimental response is closer to the design code predictions, with significantly smaller differences between test results and theoretical values. From the results in Tableau 4, it can also be seen that the test-to-prediction capacity ratios (V_u/V_n) differ very little between beams with BR and those without BR. This suggests that these different calculation methods can be used to predict the capacity of RC beams with BR. The bias is attributable to the calculation model itself rather than to the presence of BR.

2.5.7 CONCLUSIONS

This paper provides valuable insights into the flexural and shear performance of reinforced concrete beams incorporating bauxite residues as a partial replacement for cement. The analysis of the mechanical properties of tested concrete revealed that increasing the amount of BR in the

concrete reduces compressive strength for bauxite residue content 20% or more but has slight effect on compressive strength for 15% or less. Compressive tests carried out after more than two years (790 days) on cylinders stored in air and hermetically sealed container under ambient temperature revealed a decrease in compressive strength for all the concrete compared to 28 days results. This reduction becomes more pronounced with higher BR content and indicates that moisture condition can have a significant influence on the development of BR concrete mechanical strength. Further investigation is required to better understand the influence of curing condition on the long-term strength development of BR concrete.

Four-point loading test on beams with BR demonstrated that the addition of BR reduces the load-carrying capacity of tested beams that are critical in shear. Increasing the BR content reduces the compressive strength of the concrete, which consequently leads to a decrease in the tested beam shear strength. For B2.6 beams geometry, a change in failure mode from ductile flexural to brittle shear was observed. This effect is attributed to the reduction in the mechanical strength of the concrete (compressive strength), as it directly affects the shear capacity but has little influence on flexural strength.

When the compressive strength of BR concrete is considered in the CSA, fib and ACI design equations, these codes provide a similar level of performance regardless of the presence of bauxite residue, suggesting that they can be used for the flexural and shear design of BR beams.

Bauxite residues show potential as a by-product material for partial cement replacement. However, further testing is essential to deepen the understanding of the structural behavior of concrete incorporating BR. More specifically, further research will be necessary to examine the effect of BR on other properties, such as aggregate interlock, concrete tensile strength and fracture energy, that may influence shear strength. Additionally, investigations into the durability of this material such as the resistance of BR concrete to alkali-aggregate reactions, scaling resistance and chemical attacks, would be valuable for the potential use of this by-product.

2.5.8 ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to express their gratitude to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), the “*Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies*” (FRQ-NT), Mitacs and Rio Tinto for financing this research work. The authors also acknowledge the contributions of the Research Center on Concrete Infrastructures (CRIB), the “Centre Universitaire de Recherche sur l’Aluminium” (CURAL) and the “Regroupement Aluminium” (REGAL).

2.5.9 REFERENCES

- ACI-318-19. (2019). *ACI Manual of concrete practice, part 3 ACI318-08 to ACI 347.2R-05*. American Concrete Institute.
- Al-Jabali, H. M., El-Latief, A., Ezz, M. S., Khairy, S., & Nada, A. A. (2024). GGBFS and Red-Mud based Alkali-Activated Concrete Beams: Flexural, Shear and Pull-Out Test Behavior. *Civil Engineering Journal*, 10. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-05-09>
- Aladdine, F., Laldji, S., & Tagnit-Hamou, A. (2009). *Glass powder as an alternative cementitious material in concrete*. 10th ACI Int. Conf. Recent Advances in Concrete Tech. and Sustainability Issues, Seville, Espagne.
- Ashley, E., & Lemay, L. (2008). Concrete's Contribution to Sustainable Development. *Journal of Green Building*, 3, 37-49. <https://doi.org/10.3992/JGB.3.4.37>
- Bentur, A., & Goldman, A. (1989). Curing effects, strength and physical properties of high strength silica fume concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(1), 46-58. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1989\)1:1\(46\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1989)1:1(46))
- Bingöl, A. F., & Tohumcu, İ. (2013). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 51, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.106>
- Brahami, Y. (2023). Développement d'un type de comportement du béton en fonction de la teneur en résidus de bauxite sous contrainte de compression uni-axiale. (Publication no. Université du Québec à Chicoutimi. 156 p.
- Bresler, B., & MacGregor, J. G. (1967). Review of concrete beams failing in shear. *Journal of the Structural Division*, 93(1), 343-372. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001586>
- Brough, D., & Jouhara, H. (2020). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1, 39. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
- Cavagnis, F., Ruiz, M. F., & Muttoni, A. (2015). Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. *Engineering structures*, 103, 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.015>

Collins, M. P., Bentz, E. C., & Sherwood, E. G. (2008). Where is shear reinforcement required? Review of research results and design procedures. *Structural Journal*, 105(5), 590-600.

CSA A23.1/A23.2. (2024). *Béton : constituants et exécution des travaux/Procédures d'essai et pratiques normalisés pour le béton* (CSA A23.1/A23.2:24). Association canadienne de normalisation.

CSA A23.3. (2024). *Calcul des ouvrages en béton*. Association canadienne de normalisation.

CSA G30.18. (2021). *Barres d'acier au carbone pour l'armature du béton* (CSA G30.18:21). Association canadienne de normalisation.

Dils, J., De Schutter, G., & Boel, V. (2012). Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. *Materials and structures*, 45, 1673-1683.

Dodoo-Arhin, D., Nuamah, R. A., Agyei-Tuffour, B., Obada, D. O., & Yaya, A. (2017). Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications. *Case studies in construction materials*, 7, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.003>

Durastanti, C., & Moretti, L. (2020). Environmental impacts of cement production: A statistical analysis. *Applied Sciences*, 10(22), 25. <https://doi.org/10.3390/app10228212>

Elehinafe, F. B., Ezekiel, S. N., Okedere, O. B., & Odunlami, O. O. (2022). Cement industry—Associated emissions, environmental issues and measures for the control of the emissions. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 2(1), 17-25. <https://doi.org/10.31603/mesi.5622>

Ferraris, C. F. (2001). Concrete mixing methods and concrete mixers: state of the art. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 106(2), 391. <https://doi.org/10.6028/jres.106.016>

fib. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. International Federation for Structural Concrete (fib),.

Halstead, W. J. (1986). Use of fly ash in concrete. *NCHRP synthesis of highway practice*, (127).

Hou, D., & Wu, D. (2021). Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC): Design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103862>

International Aluminium Institute. (2020). Opportunities for use of bauxite residue in special cements. *World Aluminium*, 50 p. <https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-use-of-bauxite-residue-supplementary-cementitious/>

Jahami, A., Younes, H., & Khatib, J. (2023). Enhancing reinforced concrete beams: investigating steel dust as a cement substitute. *Infrastructures*, 8(11), 157. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8110157>

Kani, G. N. (1979). *On shear in reinforced concrete*. Department of Civil Engineering, University of Toronto.

Liu, X., & Zhang, N. (2011). Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue — Red mud. *Cement and Concrete Research*, 41, 847-853. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.004>

Mansur, M., Ong, K., & Paramasivam, P. (1986). Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups. *Journal of structural engineering*, 112(9), 2066-2079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:9\(2066\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:9(2066))

- Metilda, D. L., & Selvamony, C. (2015). Investigations on optimum possibility of replacing cement partially by red mud in concrete. *Academic journal*. <https://doi.org/10.5897/SRE2015.6166>
- Naik, T. R. (2008). Sustainability of Concrete Construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13, 98-103. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2008\)13:2\(98\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:2(98))
- Newman, J., Choo, B-S. (2003). *Advanced Concrete Technology - Concrete properties* (Première édition). Elsevier.
- Nikbin, I. M., Aliaghazadeh, M., Sh, C., & Fathollahpour, A. (2018). Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud). *Journal of Cleaner Production*, 172, 2683-2694. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.143>
- Oltulu, M., & Alameri, I. (2019). The mechanical properties of concrete with red mud (bauxite residue) and nano-Al₂O₃ at high temperatures. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(6), 4692-4701.
- Palaniappan, S. M., & Govindasamy, V. (2021). Experimental investigation on flexural performance of functionally graded concrete beams using flyash and red mud. *Revista Materia*, V.26. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1213>
- Patel, A., Patel, V., & Patel, M. (2015). *Review on partial replacement of cement in concrete*. UKIERI concrete congress—concrete research driving profit and sustainability.
- Prem, P. R., Bharatkumar, B. H., & Iyer, N. R. (2013). Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. *Sadhana*, 38(6), 1421-1431. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0159-8>
- Price, W. H. (1951). *Factors influencing concrete strength*. Journal Proceedings.
- Qureshi, H. J., & Ahmad, J. (2022). A Study on Sustainable Concrete with Partial Substitution of Cement with Red Mud: A Review. *Materials*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217761>
- Rathod, R. R., Suryawanshi, N. T., & Memade, P. D. (2013). Evaluation of the properties of red mud concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1, 31-34.
- Rodríguez-Álvaro, R., Seara-Paz, S., Cantero-Chaparro, B., & González-Fontebo, B. (2025). Effect of fly ash blending in internally cured mortar under air-drying curing conditions. *Construction and Building Materials*, 495, 14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143489>
- Sajedi, F., Razak, H. A., Mahmud, H. B., & Shafigh, P. (2012). Relationships between compressive strength of cement–slag mortars under air and water curing regimes. *Construction and Building Materials*, 31, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.056>
- Savard, V. (2018). Étude de la compaction de la boue rouge sous l'action d'une presse à vis (Publication no. Université du Québec à Chicoutimi. 261 p.
- Shioya, T., Iguro, M., Nojiri, Y., Akiyama, H., & Okada, T. (1990). Shear strength of large reinforced concrete beams. *Special Publication*, 118, 259-280.
- Tang, W. C., & Wang, Z. (2018). Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 178, 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.171>

Umniati, B. S., & Risdanareni, P. (2017). *Flexural Test of Fly Ash based Geopolimer Concrete Beams*. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences.

Venkatesh, C., Ruben, N., & Chand, M. S. R. (2020). Red mud as an additive in concrete: comprehensive characterization. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57, 281-289. <https://doi.org/10.1007/s43207-020-00030-3>

Viyasun, K., Anuradha, R., Thangapandi, K., Santhosh Kumar, D., Sivakrishna, A., & Gobinath, R. (2021). Investigation on performance of red mud based concrete. *Materials Today: Proceedings: Part 1*, 39, 796-799. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.637>

Yang, K.-H., Chung, H.-S., Lee, E.-T., & Eun, H.-C. (2003). Shear characteristics of high-strength concrete deep beams without shear reinforcements. *Engineering structures*, 25(10), 1343-1352. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00110-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00110-X)

CHAPITRE 3

COMPLÉMENT À L'ARTICLE 1 : CARACTÉRISATION DES MÉLANGES

Ce chapitre présente un complément spécifique à certaines parties présentées au chapitre 2. Il permet d'ajouter des informations supplémentaires à la revue littéraire du chapitre 2 et de détailler les matières premières telles que les granulats et les adjuvants ainsi que les caractéristiques à l'état frais et durci des mélanges de béton du chapitre 2.

Ce chapitre se structure donc comme suit. D'abord, il ajoute en 3.1 un complément d'information sous une forme de revue littéraire portant sur les effets des constituants d'un mélange de béton sur ses propriétés et au calcul de la résistance à l'effort tranchant et en flexion selon les approches normatives employées au chapitre 2, section 2.5.6.3. Ce complément d'information a pour objectif, d'une part, de permettre au lecteur de mieux comprendre le choix des constituants des mélanges utilisés, et d'autre part de mieux comprendre les prédictions normatives comparées aux résultats expérimentaux. Ensuite, certaines caractéristiques complémentaires connues des matières premières employées dans les mélanges de béton, soit le granulat fin, le granulat grossier et les adjuvants, sont décrites en 3.2. Finalement, certaines des propriétés mesurées à l'état frais et durci des mélanges utilisés, mais non présentées au chapitre 2 sont présentées en 3.3 et 3.4.

3.1 COMPLÉMENT À LA REVUE LITTÉRAIRE

La présente section constitue un complément à la revue de littérature de l'article présenté au chapitre 2. Elle aborde d'abord les principaux facteurs influençant les propriétés du béton, telles que la composition du mélange (rapport eau/liant, les granulats) et les conditions de cure. Ces éléments jouent un rôle déterminant sur les performances mécaniques, physiques et de durabilité du béton. La section présente ensuite les équations de calcul de la résistance à l'effort tranchant et en flexion pour les approches normatives soit la CSA A23.3 (2024), la ACI-318-19 (2019) et le fib (2013). Ces notions théoriques constituent le cadre de l'analyse des prédictions normatives présenté à la section 2.5.6.3.

3.1.1 FACTEURS QUI AFFECTENT LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON

3.1.1.1 CURE

La cure du béton a pour but de maintenir une teneur en humidité convenable et une température satisfaisante au sein du béton durant une période définie afin que les propriétés souhaitées du béton puissent se développer. Effectivement, la cure du béton a une forte influence sur les propriétés et la durabilité du béton durci (Newman, 2003).

Au fur et à mesure que le ciment s'hydrate, cette réaction consomme l'eau disponible à l'intérieur de la matrice et l'humidité relative interne diminue. Si la quantité d'eau interne au béton ou que l'apport d'eau externe est insuffisant, la diminution de la quantité d'eau provoquée par l'hydratation peut provoquer l'autodessiccation de la pâte et lorsque celle-ci est assez intense, elle peut interrompre l'hydratation du ciment. La cure humide du béton qui garantit un apport d'eau suffisant est donc primordiale afin que le béton développe les propriétés souhaitées, particulièrement la cure mise en place durant les sept premiers jours suivant la prise initiale du béton. Durant ces sept premiers jours, une quantité insuffisante en eau peut avoir différents effets néfastes notamment, le retrait et la fissuration en découlant (Kosmatka et al., 2011).

3.1.1.2 RAPPORT EAU/LIANT

Selon la littérature, le paramètre qui joue le plus grand rôle sur les propriétés du béton est le rapport eau/liant. L'hydratation complète du ciment nécessite un rapport minimal eau/liant en masse d'environ 0,25 (Kosmatka et al., 2011).

Un rapport eau/liant entre 0,25 et 0,50 permet généralement d'améliorer les propriétés du béton durci comparativement à des rapports eau/liant plus élevés. En effet, avec un rapport à l'intérieur de ce seuil, la résistance en compression du béton est généralement plus élevée, il y a une diminution de la perméabilité du béton, donc une diminution de son absorption et, par le fait même, une augmentation de son étanchéité. Un rapport eau/liant plus faible, c'est-à-dire près de 0,25,

permet aussi d'avoir une résistance accrue aux agents atmosphériques. Il a été observé que cela a aussi pour effet d'améliorer l'adhésion entre les couches successives de béton, mais aussi entre le béton et l'armature (Newman, 2003).

Le rapport eau/liant d'un mélange de béton a aussi un effet sur le béton à l'état frais. En effet, il peut influencer la maniabilité et la viscosité des mélanges de béton. Avec un faible rapport eau/liant, il en résulte un mélange de béton plus ferme avec une viscosité plus élevée et une maniabilité diminuée. En revanche, un rapport élevé permet d'avoir un béton davantage fluide. Cependant, un rapport élevé peut favoriser le ressuage en raison de la présence d'une quantité d'eau libre susceptible de migrer vers la surface. Cela a pour effet d'augmenter le risque de fissuration et de diminuer la résistance du béton. Un rapport eau/liant élevé augmente aussi le risque d'obtenir de la ségrégation dans le béton donc d'avoir un béton avec des zones hétérogènes, plus de risque de fissuration et une résistance réduite (Kosmatka et al., 2011).

3.1.1.3 GRANULAT

Dans un mélange de béton, les granulats fins et les granulats grossiers représentent 60 à 75% du volume du béton. Ceux-ci exercent une influence sur les propriétés et le dosage du mélange de béton. Les granulats fins sont généralement constitués de sable naturel dont la majorité des particules sont plus petites que 5 mm. Le granulat fin assure la cohésion du mélange en comblant les vides entre les particules plus grossières, améliorant ainsi la compacité et l'homogénéité du béton. Les gros granulats sont composés de gravier, de granulats concassés ou d'un mélange des deux dont la dimension des particules varie entre 10 et 40 mm. Le gros granulat a un effet sur la résistance du béton. Les granulats fins et grossiers ont aussi un effet sur la consolidation du béton. Afin d'avoir un béton bien consolidé et un mélange où les granulats et la pâte cimentaire adhèrent bien, la granulométrie doit être bien étalée et les granulats les plus gros doivent avoir le plus grand diamètre permis. Cela a pour effet de diminuer le volume de pâte à remplir et la superficie à couvrir, donc moins d'eau et de liant sont requis (Kosmatka et al., 2011).

Les granulats naturels utilisés dans le béton sont un mélange de roches et de minéraux. Un minéral a une structure interne ordonnée et une composition chimique spécifique. Les roches sont généralement composées de plusieurs minéraux. Ils sont classés en trois principales familles, soit les roches ignées, sédimentaires et métamorphiques. Les granulats doivent être composés de particules propres, dures, résistantes, durables sans produits chimiques et non recouverts d'argiles ou de matériau qui pourrait nuire à l'hydratation du ciment et à l'adhérence du liant aux granulats. Il est préférable d'éviter les granulats contenant des substances nuisibles telles que de grandes quantités de schistes et de roches schisteuses, des matériaux poreux comme de l'argile et du silt, des impuretés organiques et de l'oxyde de fer puisque ceux-ci peuvent influencer la durabilité du béton. Il est également recommandé d'éviter certains cherts, et les calcaires dolomitiques puisqu'ils réagissent aux alcalis donc ils peuvent causer des expansions anormales et provoquer de la fissuration. Le gypse et l'anhydrite sont aussi à éviter, car ils peuvent déclencher des agressions de sulfate dans le béton (Kosmatka et al., 2011).

La forme et la texture du granulat exercent une influence sur les propriétés du béton. En effet, les particules rugueuses, anguleuses et allongées nécessitent plus d'eau puisque leur surface spécifique est plus importante que les particules arrondies et lisses. Plus la surface totale à enrober est grande, plus la quantité de pâte cimentaire et d'eau nécessaire pour assurer un enrobage adéquat augmente ce qui peut influencer la résistance du béton. Un granulat est considéré comme plat et allongé lorsque la longueur ou la largeur correspondent à trois fois l'épaisseur. Il est préférable de limiter les granulats plats et allongés à 15% de la masse de l'ensemble du granulat (Kosmatka et al., 2011).

Les granulats doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A23.1 qui limite les quantités permises de substances nuisibles et qui indique les caractéristiques requises pour un granulat adéquat pour le béton. La norme CSA A23.2-30A indique la pratique normalisée relative à l'échantillonnage, aux essais et aux inspections des granulats utilisés dans le béton aux fins de qualification et d'acceptation. (CSA A23.1/A23.2, 2024).

3.1.1.4 PERMÉABILITÉ

La perméabilité du béton est la mesure de la migration d'eau à travers le béton quand l'eau est sous pression. Cela peut aussi se traduire comme étant la capacité du béton de résister à la pénétration de l'eau ou des autres substances. La perméabilité du béton peut être influencée par le rapport eau/liant, par le degré d'hydratation des liants et par la durée de la cure humide du béton. Un béton avec un rapport eau/liant élevé est un béton perméable, c'est-à-dire poreux puisque lorsque le rapport eau/liant est supérieur à la quantité d'eau requise pour l'hydratation du liant, l'eau excédentaire n'est pas intégrée dans les hydrates. Après le durcissement du béton, cette eau migre et elle laisse des vides qui forment un réseau de pores capillaires continus causant la perméabilité du béton. Un béton qui est exposé aux intempéries ou qui est en contact avec l'eau doit être imperméable ou étanche. En effet, un béton imperméable limite la pénétration des agents agressifs dissous donc, il restreint le transport des chlorures et des sulfates ce qui permet de ralentir le mécanisme de dégradation chimique du béton et de l'armature (Kosmatka et al., 2011).

3.1.2 COMPORTEMENT STRUCTURAL

Pour les poutres, les critères de conception établis par les principales normes internationales du béton armé, telles que la CSA A23.3 (2024), l'ACI-318-19 (2019) et les recommandations du fib Model Code for Concrete Structures 2010 (fib, 2013), sont pris en compte. La charge maximale pouvant être appliquée à une poutre dépend de sa résistance en flexion, en cisaillement et sous effort axial.

Au Canada, la résistance pondérée en flexion, M_r , d'une poutre sous armée constituée uniquement d'armatures en tension est donnée selon CSA A23.3 (2024) par l'équation suivante :

$$M_r = \phi_s A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

Dans cette équation, A_s est l'aire de la section transversale d'acier d'armature, f_y est la limite élastique de l'acier, d est le bras de levier effectif en flexion et a est la hauteur du bloc de contraintes équivalent. Dans l'équation (1), la hauteur du bloc de contrainte équivalent permet d'équilibrer la traction de l'armature et peut être évaluée pour une poutre rectangulaire par l'équation suivante :

$$a = \frac{\phi_s A_s f_y}{\phi_c \alpha_1 f'_c b} \quad (2)$$

Dans l'équation (2), α_1 représente un coefficient d'uniformisation des contraintes (se référer à CSA A23.3), f'_c est la résistance du béton en compression uniaxiale et b est la largeur de la poutre. Les coefficients de tenus de l'acier, ϕ_s , et du béton, ϕ_c , caractérisent la variabilité des propriétés des matériaux en conception ($\phi_s = 0.85$ et $\phi_c = 0.65$ selon CSA A23.3 (2024)) et doivent être considérés unitaire lorsque la résistance nominale est calculée. Les mêmes paramètres sont utilisés pour la norme ACI-318-19 (2019), alors que pour le fib Model Code for Concrete Structures 2010 (fib, 2013), $\alpha_1 = 1$ pour une résistance à la compression inférieure à 50 MPa (fib, 2013).

La résistance pondérée à l'effort tranchant, V_r , d'une poutre sans armature transversale est donnée de façon similaire par la norme CSA A23.3 (2024) et le fib Model Code for Concrete Structures 2010 par l'équation (3).

$$V_r = \phi_c \beta \sqrt{f'_c} d_v b_w \quad (3)$$

Dans cette équation, d_v est la hauteur efficace en cisaillement (typiquement pris comme $0.9d$), et b_w est la largeur effective de l'âme d'une section. Le paramètre β qualifie la capacité du béton fissuré à transmettre l'effort tranchant par traction et par enchevêtrement des granulats, tel que pris en compte par la théorie du champ de compression modifiée. La méthode générale de la norme CSA A23.3 (2024) et le fib Model Code for Concrete Structures 2010 (fib, 2013) proposent d'évaluer ce paramètre en fonction de la déformation longitudinale moyenne d'une poutre et de la hauteur de celle-ci. Quant à elle, la norme ACI-318-19(22) (2019) propose simplement de considérer $\beta = 0,166 d/d_v$.

3.2 MATIÈRES PREMIÈRES

3.2.1 GRANULAT FIN

Le granulat fin utilisé pour les poutres provient de la carrière Saint-Henri-de-Taillon (QC, Canada). Le granulat fin utilisé pour les mélanges des poutres est un sable naturel avec une finesse de 5-80 microns avec un module de finesse de 2,7. La densité à l'état saturé sec en surface (SSS) est de $2,68 \text{ g/cm}^3$. Ce matériau a un coefficient d'absorption de 0,74%. Ces propriétés physiques ont été déterminées conformément à la norme CSA A23.2-6A (CSA A23.1/A23.2, 2024). La granulométrie de ce sable naturel est présentée au Tableau 5 et à la Figure 10. Celle-ci est conforme à la norme CSA A23.2-2A (CSA A23.1/A23.2, 2024).

Tableau 5 – Distribution granulométrique du granulat fin des poutres

Ouverture des tamis	Passant	Limite CSA
(mm)	(%)	(%)
10	100	100-100
5	99	95-100
2,5	88	80-100
1,25	60	50-90
0,630	36	25-65
0,315	19	10-35
0,160	5	2-10
0,080	1,7	0-3

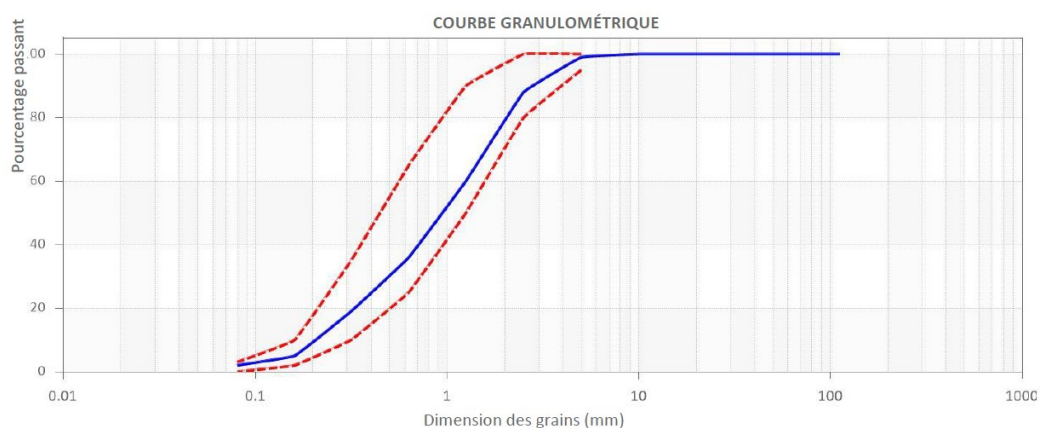


Figure 10 – Courbe granulométrique du granulat fin des poutres

3.2.2 GRANULAT GROSSIER

Le granulat grossier utilisé pour les poutres provient de la carrière des Bergeronnes (QC, Canada). Ce granulat grossier est une pierre concassée de 5 à 14 mm qui est composé à 100% d'anorthosite. Ce granulat a une densité à l'état SSS de 2,85 g/cm³ et un coefficient d'absorption de 0,28%. Ces propriétés physiques ont été déterminées conformément à la norme CSA A23.2-6A (CSA

A23.1/A23.2, 2024). La granulométrie de ce granulat grossier est présentée au Tableau 6 et à la Figure 11. Celle-ci est conforme à la norme CSA A23.2-2A (CSA A23.1/A23.2, 2024).

Tableau 6 – Distribution granulométrique du granulat grossier des poutres

Ouverture des tamis	Passant	Limite CSA
(mm)	(%)	(%)
14	100	100-100
10	89	85-100
5	19	10-30
2,5	2	0-10
1,25	1	0-5
0,630	1	-
0,315	1	-
0,160	1	-
0,080	0,5	0-2

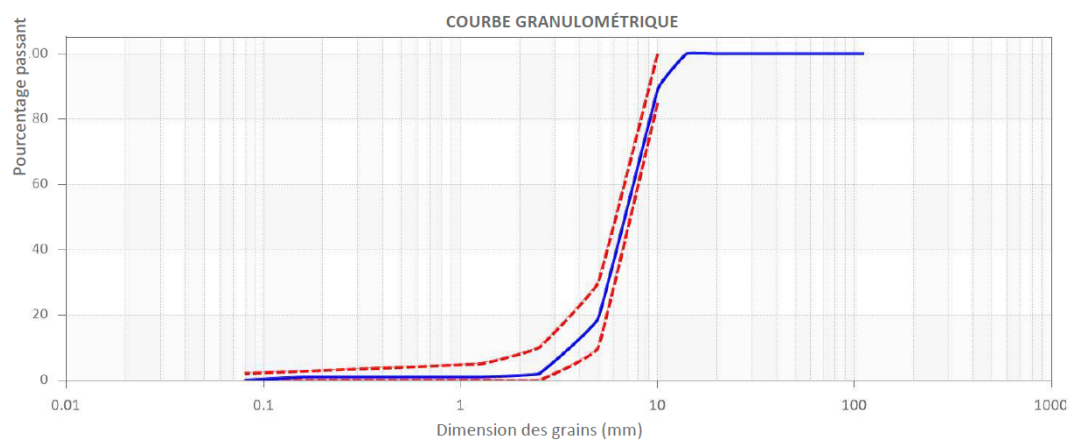


Figure 11 – Courbe granulométrique du granulat grossier des poutres

3.2.3 ADJUVANTS

Pour la fabrication des poutres, un superplastifiant à base de polycarboxylate (Sika® Viscocrete1000®) a été utilisé afin d'obtenir un béton maniable et d'affaissement respectant les limitations de la norme CSA A23.1 pour les bétons structuraux. De façon analogue, l'entraîneur d'air Sika® Air-60 a été utilisé afin d'avoir une teneur en air entre 5% et 8%. Les fiches techniques détaillées de ces adjuvants se trouvent à l'Annexe 3.

3.3 CARACTÉRISTIQUES DES MÉLANGES DE BÉTON À L'ÉTAT FRAIS

Afin de comparer les différents taux de substitutions du ciment portland par les RB, les différents mélanges de béton, dont le ciment est remplacé par les RB par des pourcentages de substitution de 10, 15, 20, 22 et 25% (BR0, BR10, BR15, BR20, BR22, BR25), ont été dosés. Dans le but de cibler deux mélanges de béton avec RB pour une utilisation structurale, les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci ont été mesurées et comparées. La Figure 12 présente les résultats obtenus sur le béton frais pour les différents mélanges, soit la teneur en air, la masse volumique, et l'affaissement. Lors du dosage des mélanges, selon les critères du mélange de référence, une teneur en air de 5 à 8%, un affaissement de $180 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ et une masse volumique d'environ 2330 kg/m^3 étaient visés.

Comme observé, la plupart des mélanges réalisés ont des caractéristiques près des valeurs visées, à l'exception de l'affaissement qui montre une diminution notable pour les mélanges avec 20 et 25% de RB. L'ajout de RB diminue la maniabilité du béton. Avec les résultats obtenus pour la teneur en air et la masse volumique des mélanges de béton, étant donné que les résultats sont comparables pour le béton avec RB et le béton sans RB, il est possible d'affirmer que l'utilisation de RB dans ces mélanges de béton n'a pas d'effet sur ces paramètres.

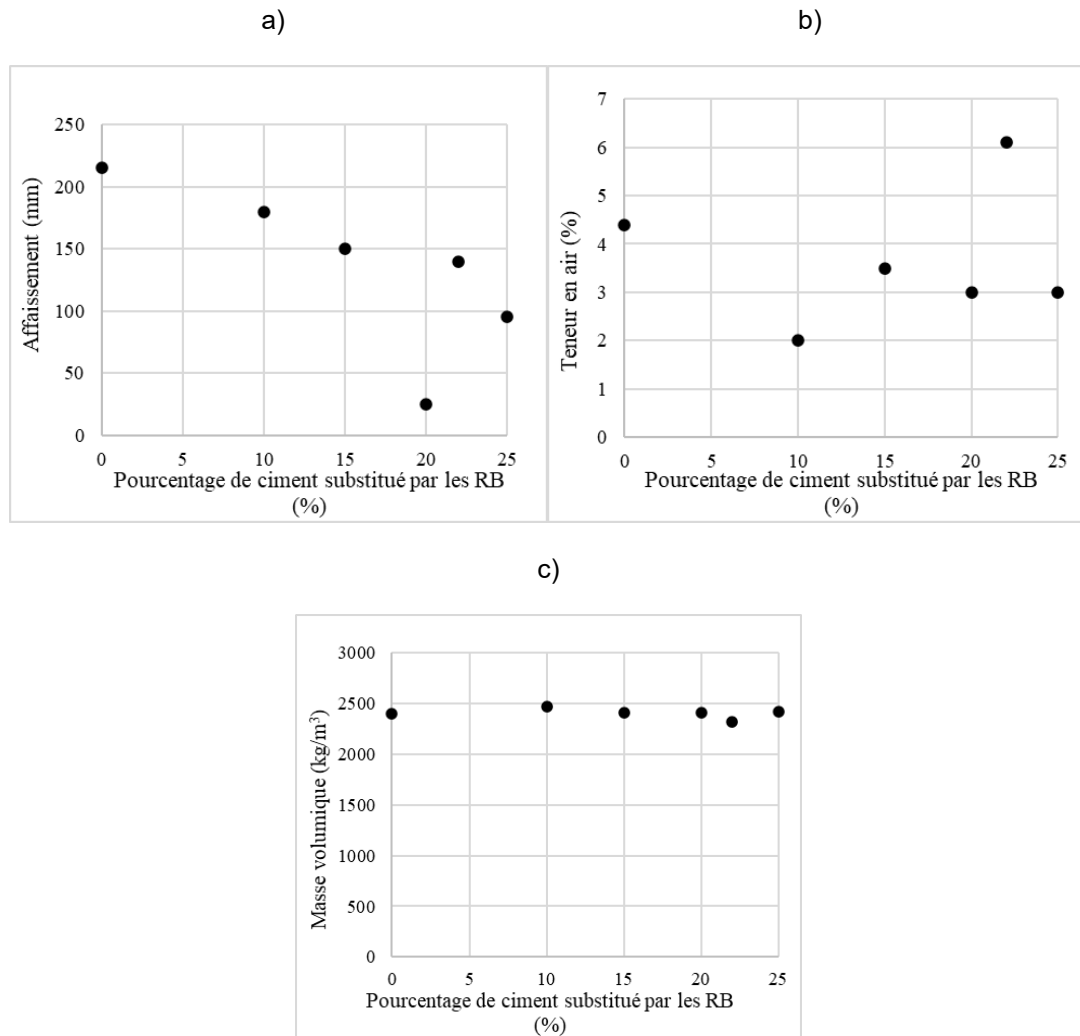


Figure 12 – Propriétés des mélanges de béton à l'état frais a) affaissement, b) teneur en air et c) masse volumique

3.4 CARACTÉRISTIQUES DES MÉLANGES DE BÉTON À L'ÉTAT DURCIS

Lors des essais de compression réalisés sur les cylindres moulés lors de la fabrication des poutres, le module d'élasticité a également été déterminé à l'aide du montage présenté à la Figure 13. Un extensomètre a été utilisé pour mesurer la déformation horizontale du cylindre lorsqu'il était comprimé par la presse. En utilisant les contraintes enregistrées pendant le chargement et les valeurs de déplacement horizontal, un graphique représentant cette relation a pu être généré. À partir de cette relation, le module d'élasticité peut être calculé conformément à la norme ASTM C469 (2022). La Figure 14 présente le module d'élasticité moyen obtenu pour les différents mélanges de béton

utilisés dans les poutres. Comme attendu, le béton de référence présente le module d'élasticité et la résistance à la compression les plus élevés (voir Figure 7 pour la résistance f_c). À l'inverse, le mélange BR25 affiche la plus faible résistance à la compression et le module d'élasticité le plus bas.

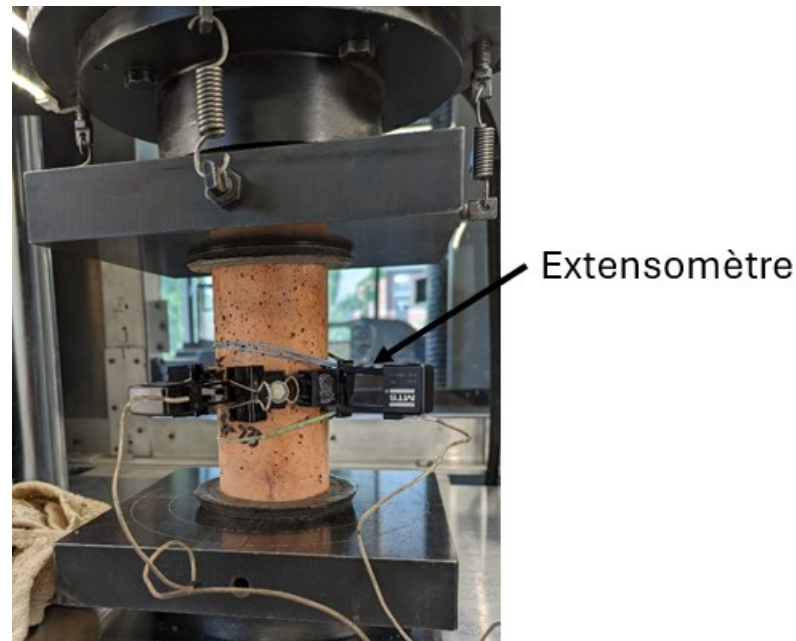


Figure 13 – Instrumentation des éprouvettes pour les essais de compression et de module

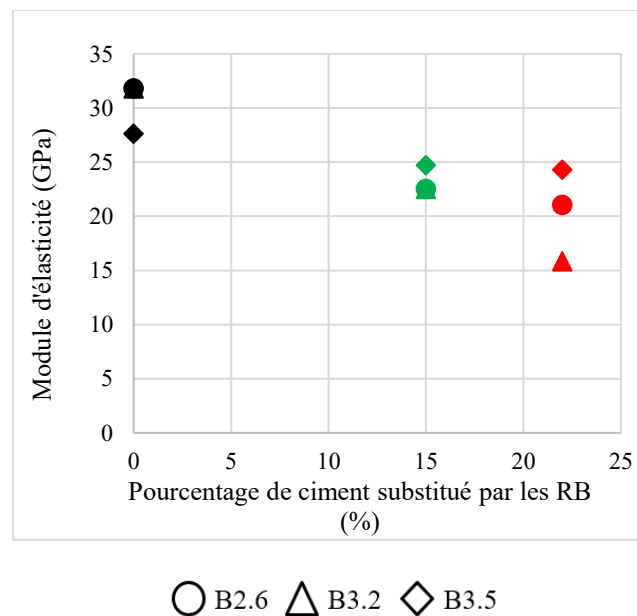


Figure 14 – Résultats du module d'élasticité pour les différents taux de substitution du ciment par RB testés pour les bétons des poutres

Pour valider que le module d'élasticité du béton contenant du RB est comparable à celui du béton à base de ciment portland, le module d'élasticité moyen de chaque mélange a été comparé au module d'élasticité théorique, E_c , calculé selon la norme. Pour un béton ayant une résistance à la compression comprise entre 20 et 40 MPa, l'équation (6) peut être utilisée pour évaluer le module d'élasticité (CSA A23.3, 2024):

$$E_c = 4500\sqrt{f'_c} \tag{6}$$

Le Tableau 7 présente la comparaison entre le module d'élasticité moyen obtenu pour chaque mélange et le module d'élasticité calculé à l'aide de l'équation (6). Les résultats montrent que l'équation (6) est également applicable au béton contenant du RB. Pour les bétons avec 15 et 22% de RB, des écarts respectifs de 4,88 et 4,20 % ont été observés entre le module d'élasticité mesuré en laboratoire et les valeurs calculées. En revanche, le béton témoin, ne contenant pas de RB, a présenté un écart de 10,96 % entre les valeurs mesurées et calculées du module d'élasticité. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de RB dans le béton n'a pas d'effet significatif sur la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation d'un cylindre testé en compression. Par conséquent, les propriétés mécaniques du béton avec RB sont conformes aux prévisions de l'équation normalisée pour le béton à base de ciment portland.

Tableau 7 – Comparaison du module d'élasticité des différents mélanges des poutres avec le module d'élasticité normalisé

Mélange	% de RB	Module d'élasticité, E_c , (GPa)		Écart (%)
		Moyen expérimental	Prédit (Éq. 6)	
BR0	0	30,40	27,40	10,96
BR15	15	23,24	22,16	4,88
BR22	22	20,39	21,28	4,20

CHAPITRE 4

ARTICLE 2 : CARACTÉRISATION ET ESSAIS MÉCANIQUES SUR DES TUYAUX EN BÉTON POUR LES INFRASTRUCTURES URBAINES

Garneau, E. ^(a), Fiset, M. ^(b), Darveau, J-B ^(c), Simard, G. ^(d)

(a) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, emilie.garneau1@uqac.ca (Corresponding author)

(b) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, Mathieu_fiset@uqac.ca

(c) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, jbdarvea@uqac.ca

(d) Université du Québec à Chicoutimi, Department of applied sciences, Saguenay (QC), G7H 2B1, Canada, Guy_simard@uqac.ca

Cet article sera soumis ultérieurement au journal Journal of Structural Engineering. Ce journal est de Quartile Q1 en génie civil et génie des structures.

4.1 CONTRIBUTIONS

Les contributions de l'étudiante ^(a) comme première auteure sont les suivantes :

- Revue de l'état de l'art ;
- Essais en laboratoire (fabrication des spécimens expérimentaux, réalisation des essais en laboratoire, collecte des données) ;
- Analyse et traitement des résultats ;
- Création des figures et graphiques ;
- Rédaction du manuscrit initial et des manuscrits révisés ;
- Soumission.

4.2 PRÉSENTATION ET RÉSUMÉ DE L'ARTICLE

Cet article porte sur l'évaluation de l'effet du remplacement du ciment par du résidu de bauxite (RB) dans un béton sans affaissement utilisé pour la fabrication de tuyaux en béton armé et sur l'évaluation de l'effet sur les propriétés mécaniques du béton. L'objectif principal est d'analyser

l'influence de cette substitution sur les propriétés mécaniques du matériau ainsi que sur le comportement structural des tuyaux.

Jusqu'à présent, seule la cendre volante, des fillers et du laitier granulé de haut fourneau ont été utilisés pour réduire la quantité de ciment dans les mélanges de béton destinés à la fabrication de tuyaux d'infrastructures urbaines. Bien que plusieurs études aient examiné l'incorporation de résidus de bauxite (RB) comme substitut partiel du ciment dans le béton, peu d'entre elles ont évalué leur comportement structural dans des éléments circulaires en béton armé. Cette étude vise à combler cela en analysant l'effet du remplacement de 5 à 40 % du ciment par du RB, dans un béton sans affaissement, utilisé pour la fabrication de tuyaux en béton armé et évaluer l'effet sur les propriétés mécaniques du béton. Trois mélanges contenant du RB et un mélange de référence, sans RB, ont été sélectionnés et utilisés pour produire et tester des tuyaux en béton armé par un essai d'écrasement latéral. Les résultats obtenus montrent qu'un remplacement allant jusqu'à 15 % de RB n'affecte pas significativement la résistance à la compression ni le module d'élasticité du béton. Cependant, au-delà de ce taux de remplacement, une diminution plus notable de la résistance est observée. Cette diminution mesurée sur les cylindres est principalement attribuable à la présence d'agglomérations de RB dues à une mauvaise méthode de malaxage et d'incorporation. Tous les tuyaux testés ont présenté des ruptures en cisaillement et ont satisfait aux exigences minimales de la norme pour un tuyau de classe 5. Ces résultats démontrent la faisabilité technique de substituer partiellement le ciment par les RB, le tout, sous réserve d'une optimisation du procédé de malaxage et d'incorporation du RB.

Mot clés : Résidus de bauxite (RB), remplacement du ciment, béton armé, tuyaux d'infrastructures urbaines, propriétés mécaniques, comportement structural

4.3 APPORT SCIENTIFIQUE

Le présent article constitue la première étude à examiner expérimentalement la valorisation du RB comme ajout cimentaire dans un nouveau béton sans affaissement pour tuyaux d'infrastructure urbaine. Très peu de recherches ont étudié le RB spécifique produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire et aucune n'a porté sur un béton sans affaissement. La formulation d'un béton sans affaissement avec RB adapté aux tuyaux en béton représente ainsi une avancée scientifique importante dans ce domaine. Également, cet article se distingue par l'ampleur de son plan expérimental. En effet, celui-ci comprend douze essais sur sections de tuyaux permettant d'analyser différents taux de substitution du ciment par le RB dans les tuyaux.

4.4 LIEN AVEC LES OBJECTIFS DU MÉMOIRE

Comme mentionné précédemment, l'objectif général de ce projet est de développer un béton à base de résidu de bauxite filtré-pressé (RB FP) produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire, pour une utilisation structurale, et pour la fabrication de tuyaux de béton destiné aux infrastructures urbaines.

Cet article porte sur la caractérisation des mélanges de béton sans affaissement intégrant les RB et sur la fabrication et l'essai de tuyaux en béton armé contenant des RB, donc il répond directement à l'objectif général du projet. Également, ces étapes permettent aussi de répondre aux sous- objectifs 1, 3 et 4 du projet qui sont de développer et caractériser à l'état frais et durci un béton à base de ciment portland maximisant le RB FP produit au Saguenay-Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire, dont les performances mécaniques permettent son utilisation pour la fabrication de tuyaux de béton. Puis, de concevoir et d'évaluer la performance d'un élément d'infrastructure urbaine (tuyau de béton) composé du béton de RB et de mieux comprendre l'effet du RB comme ajout cimentaire sur les propriétés mécaniques du béton observables à l'échelle des tuyaux,

4.5 INTÉGRALITÉ DE L'ARTICLE

4.5.1 INTRODUCTION ET REVUE LITTÉRAIRE

Au Canada, la longueur totale des canalisations d'égouts (tuyaux) est supérieure à la longueur totale de toutes les routes. Selon Statistique Canada (2020), le Canada avait environ 472 488 km de canalisations d'égouts souterraines en 2020. Les réseaux d'égouts constituent la plus grande infrastructure de tous les pays et jouent un rôle significatif dans les besoins d'une société (Abbas et al., 2025). Les canalisations d'égouts sont pour la majorité constituée de tuyaux en béton armé.

Les tuyaux de béton sont souvent armés afin d'assurer une résistance suffisante. En effet, la faible résistance à la traction du béton est compensée par l'armature en acier ayant une haute résistance à la traction. Les barres d'armature en acier sont utilisées pour le renforcement dans les tuyaux en béton. L'armature utilisée pour les tuyaux est composée de barres d'armature longitudinales et circonférentielles. Lors de la fabrication d'un tuyau, la cage d'armature est mise dans le moule avant que le béton soit versé. Les barres d'armature circonférentielles agissent comme renforcement en flexion, tandis que les barres faisant la longueur du tuyau sont utilisées pour soutenir les barres circonférentielles et pour répartir la charge sur les barres circonférentielles (Abbas et al., 2025).

Deux méthodes de fabrication de tuyaux en béton préfabriqués sont principalement utilisées : la méthode par compression radiale et la méthode de moulage par vibration. Pour les tuyaux de plus petits diamètres, soient des diamètres de 300 mm à 1200 mm, le procédé de fabrication généralement employé est par compression radiale. Avec cette méthode, le béton est déposé dans un moule par l'extrémité supérieure et il est placé avec une vrille qui tourne au centre du moule, appelé distributeur. Par l'effet centrifuge, la deuxième partie de la vrille, appelée compacteur, crée l'ouverture intérieure du tuyau (diamètre intérieur) et augmente le degré de compaction du béton (Abbas et al., 2025). Ce procédé de fabrication est présenté à la Figure 15.

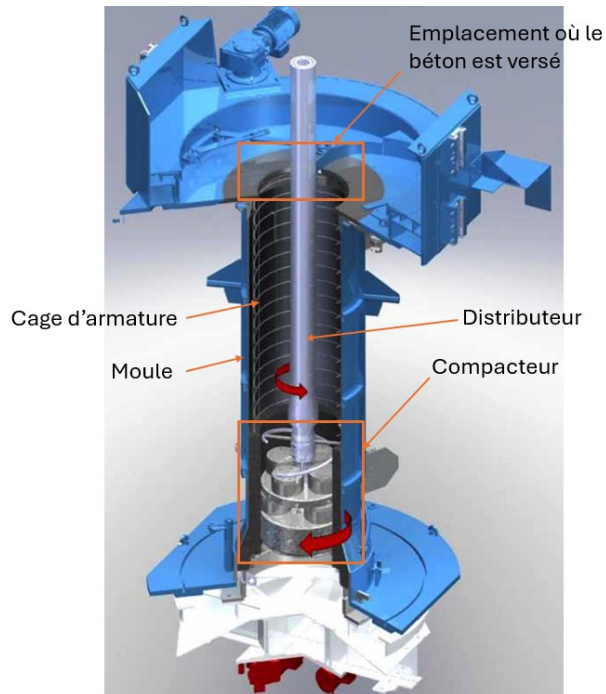


Figure 15 –Processus de fabrication par compression radiale (Conduites et produits béton, 2021)

Pour les tuyaux de plus grand diamètre, la méthode du moulage par vibration est majoritairement utilisée. Avec cette méthode, un dévidoir mobile vient vider le béton entre deux moules (moule du diamètre intérieur et du diamètre extérieur). Par la suite, le béton est consolidé par des vibrations vigoureuses et une compression hydraulique appliquée par le haut ou le bas du moule. L'utilisation de vibrations à haute fréquence garantit le bon positionnement des particules de béton, entraînant l'élimination de tout vide et permettant une compaction adéquate (Abbas et al., 2025). Ce procédé de fabrication est présenté à la Figure 16.

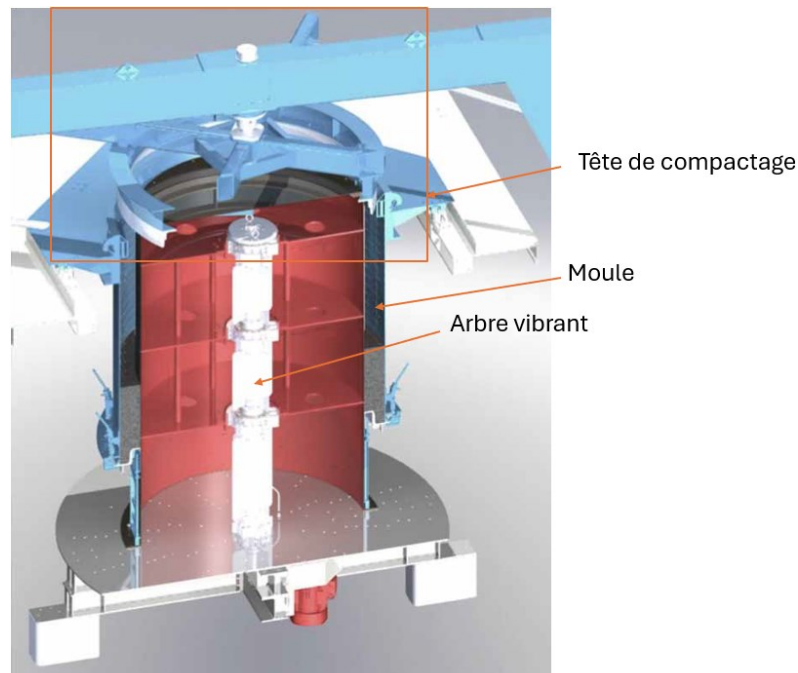


Figure 16 - Schéma explicatif du processus de fabrication des tuyaux par moulage par vibration
(Conduites et produits béton, 2021)

Divers types de cure sont généralement employés dans la fabrication des tuyaux en béton. Les méthodes les plus courantes sont la cure à la vapeur, la cure par immersion et la cure par pulvérisation. La cure à la vapeur consiste à exposer les tuyaux fraîchement démoulés à une atmosphère chaude et saturée en vapeur d'eau. Elle se fait dans une pièce avec humidité et température contrôlée. Ce type de cure accroît l'efficacité du processus de production en favorisant un gain de résistance initiale rapide du béton, ce qui permet une mise en service plus rapide des tuyaux. La cure par immersion consiste à submerger les tuyaux dans un bassin d'eau. Ce type de cure est principalement utilisée pour les tuyaux de petit diamètre (jusqu'à environ 375 mm) puisque les diamètres supérieurs nécessitent des bassins de grande dimension. La cure par pulvérisation consiste à appliquer régulièrement de l'eau sur la surface des tuyaux sous forme de fines gouttelettes afin de limiter l'évaporation. Après le démoulage, les tuyaux sont placés dans une pièce où des buses projettent périodiquement une fine brume d'eau. Cette méthode de cure convient généralement bien pour les tuyaux de grand diamètre. La cure par immersion et la cure par pulvérisation qui sont deux méthodes plus traditionnelles conviennent mieux aux usines disposant d'une grande surface

réservée à la cure, en raison du gain de résistance initial plus lent du béton, ce qui nécessite d'entreposer les tuyaux plus longtemps avant leur mise en service.

La performance structurelle des tuyaux en béton armé dépend des propriétés mécaniques du béton, des propriétés des barres d'armature, et du lien entre l'armature et le béton. La Figure 17 présente une schématisation des efforts de compression (C) et de traction (T) repris par le béton lorsqu'un tuyau supporte une charge. Comme présenté, il est possible de séparer la section d'un tuyau en deux zones en fonction des efforts de compression ou de traction repris. Ces efforts, d'abord repris par le béton, sont progressivement repris par les barres d'armature à mesure que le béton se déforme, en raison du lien mécanique unissant les barres d'armature au béton (Abbas et al., 2025). Compte tenu de la faible résistance en tension du béton, des fissures se développent dans les zones tendues (T). La présence de l'armature peut permettre de ponter ces fissures et de reprendre tout de même les efforts de tension dans ces zones (Dangol, 2023).

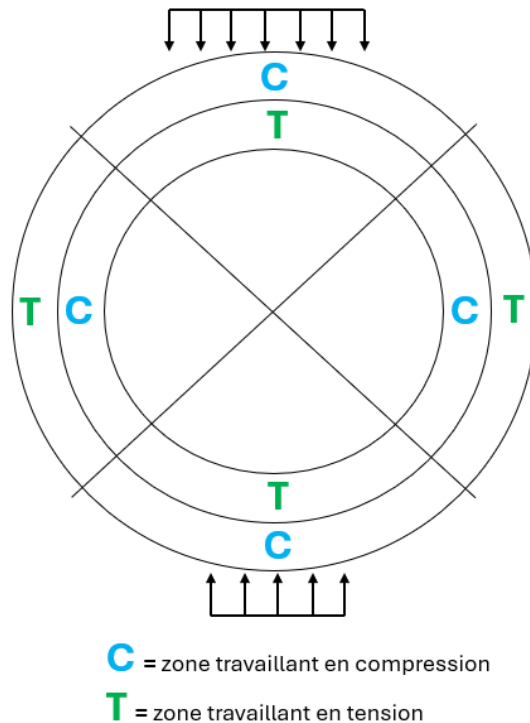


Figure 17 – Répartition des efforts dans un tuyau

Un facteur important à prendre en compte pour la conception d'un tuyau en béton est la performance en service, puisque c'est au cours de sa durée de vie en service qu'apparaissent les premières fissures. La fissuration des tuyaux en béton constitue un phénomène courant. Les fissures peuvent survenir pour plusieurs raisons, telles que les contraintes causées par les charges extérieures, des matériaux de mauvaise qualité, des défauts de construction, des déformations thermiques, un remblai de soutien inégal et la dégradation due à la corrosion environnementale. La fissuration d'un tuyau de béton armé, au cours de son utilisation, se sépare en trois différentes phases qui sont schématisées à la Figure 18. La première phase (phase 1) est la phase de défaut initial. Au cours de celle-ci, de légères fissures apparaissent sur un tuyau en raison de faiblesses dans le matériau ou de contraintes dépassant la résistance du matériau. Les fissures sont observées en premier dans le sommet et dans le fond de la surface intérieure d'un tuyau, puis sur la surface extérieure du flanc droit et du flanc gauche. À ce stade, un tuyau peut encore fonctionner efficacement, car il reste maintenu par le sol environnant et la petitesse des fissures n'affecte pas outre mesure sa capacité structurale. La seconde phase de fissuration d'un tuyau est la phase de détérioration (phase 2). À ce stade, la pénétration des eaux souterraines diminue les propriétés mécaniques, telles que la résistance à la compression et à la traction du béton. La pénétration des eaux souterraines transporte le contenu acide présent dans les sols, ce qui engendre la corrosion de l'acier des barres d'armature et, en réduisant leur section, réduit leur capacité à reprendre les efforts de traction aux fissures. À cette étape, des fissures plus importantes se développent, ce qui crée une déformation du tuyau et une perte du soutien latéral créée par le sol. Finalement, la dernière phase est la phase d'effondrement (phase 3). Cette phase débute lorsque la déformation du tuyau excède 10 % de la hauteur totale initiale. La perte de confinement latéral provoque une déformation accrue du tuyau au niveau de la ligne de ressort, tandis que la paroi s'affaisse progressivement, menant ultimement à la rupture complète du tuyau (Dangol, 2023).

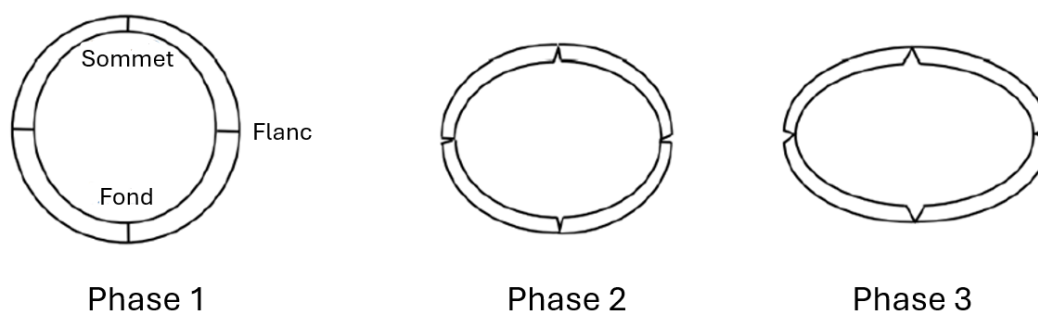


Figure 18 – Étapes de fissurations des tuyaux en béton armé lors de leur utilisation (Dangol, 2023)

Afin de résister aux efforts appliqués et garantir une performance en service adéquate, diverses spécifications sont prescrites par les normes en vigueur dans les législations provinciales. Le test de résistance à trois points (par écrasement radial) est l'essai normalisé utilisé pour évaluer la résistance des tuyaux en béton (voir Figure 19). Cet essai consiste à appliquer une charge uniforme à l'aide d'un vérin hydraulique sur une arête disposée longitudinalement au haut d'un tuyau. Cette charge est appliquée sur la longueur du tuyau à l'aide d'une poutre en bois placée entre le vérin hydraulique et le tuyau. Le tuyau est maintenu en place à l'aide de, deux bandes de support symétriquement placées sous le tuyau comme présenté à la Figure 19. Au Québec ce sont les normes BNQ 2622-126 (2023) et qui régissent cet essai. Pour que l'essai soit conforme, la vitesse d'application du chargement doit se situer entre 120 N/m/s et 610 N/m/s. L'appareil utilisé pour le chargement doit aussi garantir une précision de $\pm 2\%$. La charge est appliquée progressivement jusqu'à l'écrasement du tuyau. La charge correspondant à l'apparition de premières fissures visibles d'une taille cible spécifiée par les normes doit être notée en cours d'essai et il faut noter la charge du tuyau à sa rupture. Au Québec, la norme BNQ 2622-126 (2023) spécifie une taille cible de fissure de 0,3 mm de largeur à une profondeur de 1,5 mm. La performance d'un tuyau est ensuite catégorisée en fonction du critère le plus limitant donné par ces deux types de charges. Les différentes classes peuvent être requises selon l'utilisation de l'infrastructure (BNQ 2622-126, 2023). Le Tableau 8 présente les classes de la norme BNQ 2622-126 (2023), dans lequel $D_{0,3}$ et D_{ultime} sont respectivement la charge minimale devant être reprise au critère de fissure mentionné (0,3 mm à 1,5 mm de profondeur) et la charge minimale du tuyau à l'écrasement.



Figure 19 – Exemple d’un essai de chargement diamétral sur un tuyau de béton (Megacon Precast Concrete, 2020)

Tableau 8 – Résistance à la charge $D_{0,3}$ et D_{ultime} pour les différentes classes de tuyaux (tiré de BNQ 2622-126 (2023))

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
$D_{0,3}$ min.					
(N/m·mm)*	40	50	65	100	140
D_{ultime} min.					
(N/m·mm)*	60	75	100	150	175

* Les charges $D_{0,3}$ et D_{ultime} s’expriment en N par m linéaire par mm de diamètre intérieur du tuyau.

Généralement lors de l’application du chargement d’un essai de résistance à trois points, des fissures verticales se développent initialement dans le haut et dans le bas de l’intérieur du tuyau. Par la suite, des fissures horizontales se développent à partir de la paroi extérieure, sur les flancs droit et gauche (Davies et al., 2001; Haktanir et al., 2007; Younis et al., 2021). À mesure que le chargement augmente, la fissuration progresse jusqu’à l’atteinte de la charge maximale. Généralement, deux mécanismes de ruine peuvent conduire à la rupture du tuyau. Lorsque la rupture se produit en flexion, il est généralement possible d’observer la rupture à l’ultime du tuyau. Lorsqu’elle se produit, des

fissures longitudinales sur toute la longueur du tuyau sont observables. Ces fissures sont situées sur la paroi interne pour le haut et le bas du tuyau ainsi que sur la paroi externe pour le flanc droit et le flanc gauche comme montré à la Figure 20 a). De telles fissures longitudinales entraînent la formation d'une rotule plastique, provoquant la rupture en flexion (Abbas et al., 2025). Lorsque la rupture se produit en cisaillement, des fissures de tension diagonales et radiales se propagent diagonalement à travers les parois du tuyau en direction radiale, comme présentée à la Figure 20 b) (Zamanian, 2016). Ce type de fissuration est créé par la tension radiale agissant dans les barres d'armature disposées circulairement, provoquant la séparation des barres d'armature du béton et conduisant à la rupture en cisaillement (Abbas et al., 2025). Selon des essais effectués par Ramadan et al. (2020), il a été rapporté que la rupture en flexion est le mode de rupture principal des tuyaux en béton armé à double cage circulaire, tandis que la rupture en cisaillement, entraînant l'écaillage de la section de béton, est le mode de rupture principal pour les tuyaux en béton armé à simple cage.

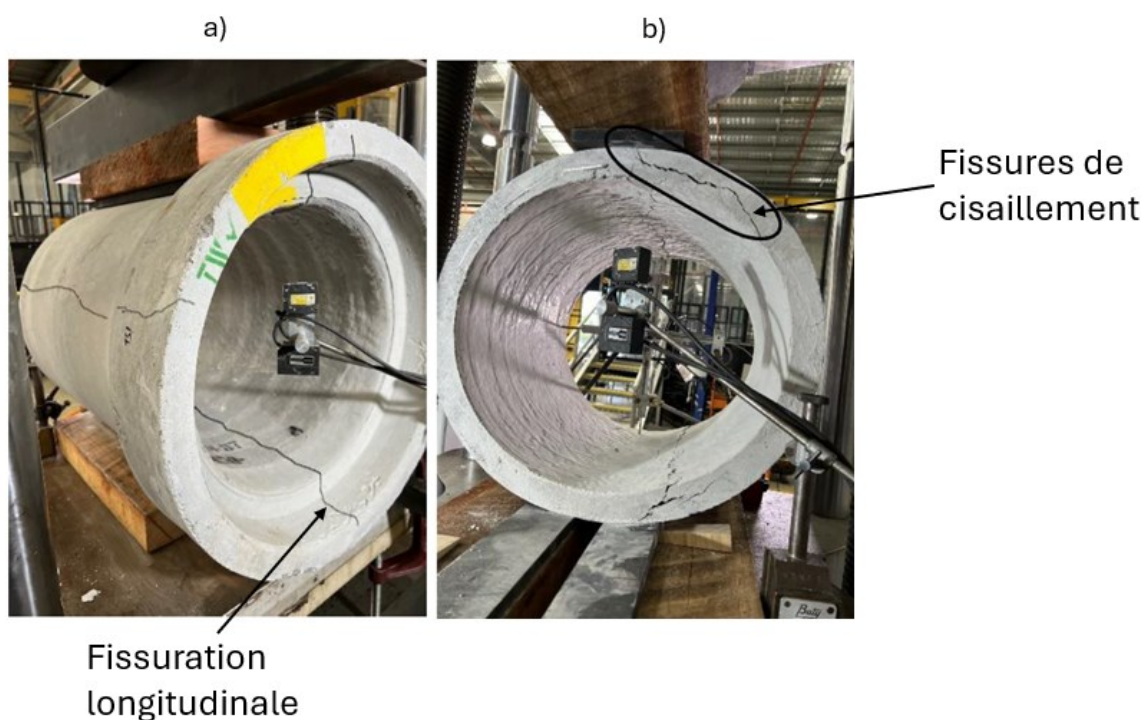


Figure 20 – Type de ruptures des tuyaux lors du test de résistance à 3 points a) Rupture en flexion, b) Rupture en cisaillement (Dangol, 2023)

Pour la fabrication des tuyaux, les ingrédients de base, de tous les mélanges de béton utilisés sont généralement les mêmes soit, le ciment portland, des granulats fins, les granulats grossiers, et l'eau (Abbas et al., 2025). La proportion de ciment dans le mélange affecte directement la résistance, la durabilité et l'ouvrabilité du béton. Un contenu en ciment plus élevé entraîne généralement une résistance à la compression plus élevée, mais une quantité excessive en ciment conduit à un coût plus élevé. Des ajouts cimentaires sont parfois utilisés pour réduire la quantité de ciment dans les mélanges de béton. L'ajout cimentaire le plus souvent utilisé dans les mélanges de béton employés pour la fabrication de tuyaux est la cendre volante (Berryman et al., 2005). Pour ce type de produit, elle remplace généralement de 20 à 25% de la quantité de ciment présente dans le mélange de béton (Abbas et al., 2025).

La norme ASTM C76 (2025) spécifie certaines propriétés minimales que doit avoir le béton utilisé pour la fabrication de tuyau. Entre autres, cette norme spécifie une résistance à la compression minimale de 27,6 MPa pour les tuyaux en béton armé conventionnels. Cette exigence est augmentée à 34,5 MPa pour les tuyaux de plus grands diamètres ou de classes de résistance supérieures. Tous les tuyaux fabriqués conformément aux exigences de résistance de la classe 5 doivent avoir une résistance à la compression minimale de 41,4 MPa.

Parallèlement aux critères de résistance à la compression prescrits, les caractéristiques du béton frais jouent un rôle déterminant dans la qualité et la rapidité de production des tuyaux en béton préfabriqué. En raison du procédé industriel de fabrication des tuyaux de béton, un béton présentant un affaissement compris entre 0 et 25 mm (mesuré selon CSA A23.2-5C (CSA A23.1/A23.2, 2024)), dit béton sans affaissement, est généralement requis. Ce type de mélange favorise la consolidation rapide du béton afin qu'il puisse être démoulé rapidement. De plus, la cohésion dans le mélange de béton frais pour les tuyaux en béton préfabriqué est obtenue en ajoutant la bonne quantité d'eau requise pour maintenir la forme du tuyau, sans fissuration ni affaissement, après le démoulage, de sorte que les tuyaux puissent être démoulés rapidement (Dangol, 2023).

De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'intégration de nouveaux ajouts cimentaires dans les mélanges de béton, plusieurs présentant un potentiel d'amélioration des performances mécaniques et/ou de réduction de l'empreinte carbone des bétons de construction, notamment par la valorisation des résidus de bauxite (RB). Entre autres, Lima (2017) a déterminé que 33% des RB pourraient être valorisés dans la construction civile. En effet, cette industrie pourrait permettre de valoriser de grandes quantités de RB pour diverses applications à moindre coût, dont les tuyaux de béton armé.

Récemment, deux études menées à l'Université du Québec à Chicoutimi ont examiné la possibilité de remplacer une partie du ciment portland dans divers mélanges de béton par des RB provenant du Saguenay–Lac-Saint-Jean. D'abord, Brahami (2023) a entrepris cette substitution du ciment par incréments de 5%, variant de 0% à 20%. L'objectif était d'atteindre une résistance en compression de 30 MPa et un rapport eau/liant de 0,45 dans les mélanges. Étant donné que les RB ont une surface spécifique élevée, ce qui réduit l'affaissement du béton avec une augmentation de la quantité de RB, la teneur en eau des mélanges a été ajustée de 1,5% pour chaque augmentation de 5% des RB, afin de maintenir une maniabilité et un affaissement moyen de 80 mm. Puis, (Garneau et al., 2026) ont entrepris le remplacement du ciment portland par les RB variant de 0 à 25%. La caractérisation mécanique du béton étudié a montré qu'une augmentation de la teneur en RB provoque une réduction de la résistance à la compression à partir d'un taux de remplacement de 20 %, alors que les mélanges contenant 15 % de BR ou moins présentent uniquement de faibles variations de résistance. De façon analogue, Tang et Wang (2018) et Hou et Wu (2021) ont observé que la substitution de cendres volantes ou de ciment par des RB dans des mélanges de béton réduisait leur maniabilité et leur affaissement. En effet, l'affaissement passait de 250 mm pour le béton témoin à 110 mm pour le béton sans RB (Hou & Wu, 2021). Ce phénomène s'expliquerait par le fait que les RB ont une surface spécifique plus élevée que le ciment, donc engendrait une augmentation de l'eau absorbée (Hou & Wu, 2021), ce qui la quantité d'eau disponible pour fluidifier les mélanges (Qureshi & Ahmad, 2022). Pour pallier cet effet, Tang et Wang (2018) ont proposé d'ajouter davantage de superplastifiant.

Les résultats obtenus par Brahami (2023) ont montré que la masse volumique du béton augmentait proportionnellement à la quantité de RB ajoutée. De plus, le taux de substitution du ciment a eu un impact sur la résistance en compression et le comportement du béton. Pour des taux de remplacement de 5% et 10%, la résistance en compression a augmenté à 35 MPa, soit une amélioration de 5 MPa par rapport au béton sans RB. Cependant, pour des taux de remplacement de 15 et 20%, une diminution de la résistance en compression de 5 MPa a été observée. De plus, les mélanges contenant des RB ont montré un module de Young légèrement supérieur à ceux faits seulement du ciment Portland. Les essais de fendage permettant de mesurer la résistance à la traction ont révélé que les équations applicables au béton de ciment s'appliquaient également au béton contenant des RB. En ce qui concerne la courbe contrainte-déformation issue des essais de compression uniaxiale, l'ajout de RB n'a pas affecté la phase pré-pic de la courbe, mais il a prolongé la section post-pic, rendant le béton moins fragile lors de la rupture. Des résultats obtenus par Tang et Wang (2018) ont montré que les RB exercent une influence négligeable sur la résistance en compression du béton mesurée à 28 jours et le module d'élasticité.

D'autres études ont été faites sur la substitution du ciment par les RB. Notamment, Metilda et Selvamony (2015) ont effectué des essais afin de trouver le meilleur ratio de substitution du ciment par les RB. Pour ces essais, la meilleure résistance en compression a été obtenue pour un taux de substitution du ciment de 15%. Également, la meilleure résistance à la traction a été obtenue pour un taux de remplacement du ciment de 15% et la valeur obtenue est supérieure à celle du béton témoin, c'est-à-dire du béton uniquement composé de ciment. Le meilleur résultat de résistance en flexion pour les prismes testés a aussi été obtenu pour le béton avec une substitution de 15%. Finalement, il a été observé que la résistance du béton augmente proportionnellement avec l'augmentation de la substitution du ciment jusqu'à 15% de substitution et que pour une substitution de plus de 15%, la résistance du béton diminue pour tous les essais. Puis, Bin et Zhuoying (2020) a étudié l'influence de la proportion de RB sur les colonnes courtes tubulaires circulaires en acier rempli de béton. Dans ce cas, le ciment a été substitué par les RB par bonds de 5%, de 0% à 20%. Les

résultats ont montré que lorsque la substitution du ciment est entre 0 et 20% la résistance augmente. Avec ses observations du comportement du béton, Bin et Zhuoying (2020) en est venu à suggérer que les RB ont des caractéristiques pouzzolanes, c'est-à-dire que pendant l'hydratation du béton, de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) est produit. Puis, celui-ci réagit avec les éléments actifs SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3 produit par les RB. Dans le processus de la réaction, le Ca(OH)_2 généré est consommé ce qui crée d'autres réactions d'hydratation (Bin & Zhuoying, 2020). Les auteurs suggèrent également qu'un autre facteur qui pouvant causer l'augmentation de résistance est l'amélioration de la structure des interfaces entre les milieux interne du béton. La pâte constituée de ciment et de RB aurait en effet des pores plus petits et une porosité plus faible, ce qui augmenterait la compacité de la pâte et donc, la résistance du béton.

Des études ont aussi été menées quant à la durabilité du béton avec RB. Effectivement, le potentiel de corrosion du béton armé avec une teneur en RB allant jusqu'à 30% a été étudié. Il a été constaté que plus la teneur des RB est élevée, plus le taux de corrosion est faible. Tang et Wang (2019) ont en effet constaté que la perte de masse de barres d'armature en acier causée par la corrosion diminuait avec l'augmentation de la quantité de RB. Les bétons témoins (ceux sans RB) présentaient des dommages corrosifs de l'armature plus importants que l'armature du béton enrichis de résidus de bauxite. Selon Venkatesh et al. (2020), l'oxyde de fer et les oxydes d'alumine, composés chimiques dominants dans le RB, améliorent la protection du film de passivation en surface de l'acier d'armature contre la carbonatation et l'attaque des ions chlorure.

De façon générale, les différents essais réalisés afin d'évaluer l'effet de la substitution d'une partie du ciment par des RB montrent un léger gain de résistance pour des substitutions de 10% et 15%, et ce, tout dépendant du type de béton. Selon les observations, il a été suggéré que le gain de résistance pourrait être dû à la présence de silice et de chaux libre dans le béton avec des RB, ce qui accélérerait la formation d'un gel C-S-H à un âge de durcissement ultérieur. Lorsqu'il y a une réduction de la résistance, cela pourrait s'expliquer par une réaction pouzzolanique limitée due à une teneur en eau insuffisante qui a entraîné une réduction de la résistance du béton (Venkatesh et al.,

2020). Cela explique aussi la baisse de résistance pour des substitutions au-delà de 20%. En ce qui concerne l'amélioration de la résistance à la traction pour le béton contenant des résidus de bauxite, cela est causé par l'excellente propriété pouzzolanique et l'effet de rejet de RB dans la structure poreuse du béton (Venkatesh et al., 2020).

4.5.2 PORTÉE DE LA RECHERCHE

Cette étude se distingue en étant la première à évaluer expérimentalement la faisabilité et la performance de la valorisation des résidus de bauxite (RB) comme ajout cimentaire dans un béton sans affaissement destiné aux applications en tuyaux d'infrastructure urbaine.

À ce jour, aucune étude n'a porté sur l'utilisation des résidus de bauxite (RB) dans un béton sans affaissement. Les mélanges de béton avec RB sans affaissement, adaptés à la fabrication de tuyaux en béton, représentent ainsi une avancée scientifique dans ce domaine. En effet, bien que plusieurs recherches aient examiné le comportement de bétons dans lesquels une fraction du ciment est remplacée par des RB, très peu d'études expérimentales se sont intéressées à leur comportement structurel ou à leur application dans des éléments comme des tuyaux. Cette étude se distingue ainsi comme la première à évaluer expérimentalement la faisabilité et la performance de la valorisation des RB comme ajout cimentaire dans un béton sans affaissement destiné pour la fabrication de tuyaux d'infrastructure urbaine. Pour combler cette lacune, la présente étude évalue d'abord l'effet du remplacement de 5 à 40 % du ciment par des RB, dans un mélange de béton sans affaissement, sur la résistance mécanique du béton. Ensuite, trois mélanges contenant des RB et un mélange de référence sans RB ont été sélectionnés puis utilisés pour la fabrication de tuyaux en béton armé à taille réelle suivant le procédé de fabrication industrielle par compression radiale. Les tuyaux fabriqués ont été testés avec l'essai de résistance de la norme BNQ 2622-126 (2023) afin de comprendre l'effet des RB sur le comportement des tuyaux. Finalement, les tuyaux testés ont été comparés aux résistances minimales requises de la norme (BNQ 2622-126, 2023) afin de vérifier la conformité des différents tuyaux fabriqués.

4.5.3 MATÉRIAUX

Pour la fabrication des tuyaux, un béton raide et dit sans affaissement, c'est-à-dire un affaissement visé mesuré selon la norme CSA A23.2-5C (CSA A23.1/A23.2, 2024) compris entre 0 et 25 mm, est désiré afin de satisfaire aux exigences du procédé de fabrication des tuyaux. Le mélange de référence utilisé présenté au Tableau 9 a un rapport eau/liant de 0,39 et permet de répondre au critère d'affaissement requis. Pour les mélanges de béton avec RB testés, le ciment a été remplacé en pourcentage massique par les RB pour des taux de remplacement de 0%, soit le mélange de référence, 5, 10, 15, 20, 30 et 40%. Le détail de dosage des mélanges avec RB se trouve à l'Annexe 5. Tous les mélanges contiennent un agent entraîneur d'air Eucon air 12 pour répondre aux exigences de durabilité exigées. La fiche technique détaillée de cet adjuvant se trouve à l'Annexe 3.

Tableau 9 – Dosage du mélange de référence

Constituant	Masse (kg/m³)
Ciment	475,6
Granulat fin	1486,3
Granulat grossier	693,6
Entraîneur d'air	0,23
Eau	185,5

Le RB utilisé dans cette étude provient de l'usine de Vaudreuil (Saguenay, Canada), où il est généré lors de l'extraction de l'alumine par le procédé Bayer (Brough & Jouhara, 2020). Ce résidu se forme après la décantation de la boue d'extraction, qui contient de l'aluminate de sodium solubilisé issu du processus de digestion. Dans le procédé Bayer, la production d'une tonne d'aluminium entraîne la formation d'une tonne de RB, posant ainsi un défi majeur pour son stockage dans les alumineries. À l'usine de Vaudreuil, une solution adoptée pour sa gestion est le stockage à sec, une méthode qui permet de réduire considérablement le volume des déchets. En effet, le RB traité par filtre-presse peut atteindre une siccité avec une fraction solide supérieure à 65% en poids (Savard,

2018). Pour ce projet, ce résidu est utilisé comme substitut du ciment. Le RB issu du filtre-presse présente une densité de 3,24 g/cm³ et une finesse de 8 microns. La composition chimique du RB utilisé est présentée dans le Tableau 10. La fiche technique des RB se trouve à l'Annexe 4.

Tableau 10 - Caractéristiques chimiques du résidu de bauxite

Composition	Proportion massique (%)
Na ₂ O	6.82
MgO	0.10
Al ₂ O ₃	19.65
SiO ₂	13.10
P ₂ O ₅	0.14
SO ₃	0.17
K ₂ O	0.09
CaO	1.85
TiO ₂	4.51
V ₂ O ₅	0.15
Cr ₂ O ₃	0.09
MnO	0.02
Fe ₂ O ₃	40.37
ZnO	0.00

Dans le cadre de ce projet, du ciment portland de type usage général (GUL) produit par Lafarge a été utilisé, conformément à la norme CSA A3001-03 (2023).

Le granulat fin utilisé provient de Lafarge Sablière de Sainte-Angèle-de-Prémont (Qc, Canada). Le granulat fin utilisé pour les mélanges des tuyaux est un sable naturel avec une finesse de 5-80

microns avec un module de finesse de 2,35. La densité à l'état saturé sec en surface (SSS) est de 2,685 g/cm³. Ce matériau a un coefficient d'absorption de 0,33%. Ces propriétés physiques ont été déterminées conformément à la norme CSA A23.2-6A (CSA A23.1/A23.2, 2024). La granulométrie de ce sable naturel est présentée au Tableau 11 et à la Figure 21. Celle-ci est conforme à la norme CSA A23.2-2A (CSA A23.1/A23.2, 2024).

Tableau 11 – Distribution granulométrique du granulat fin des tuyaux

Ouverture des tamis	Passant	Limite CSA
(mm)	(%)	(%)
10	100	100-100
5	96	95-100
2,5	91	80-100
1,25	81	50-90
0,630	61	25-65
0,315	28	10-35
0,160	8	2-10
0,080	1,7	0-3

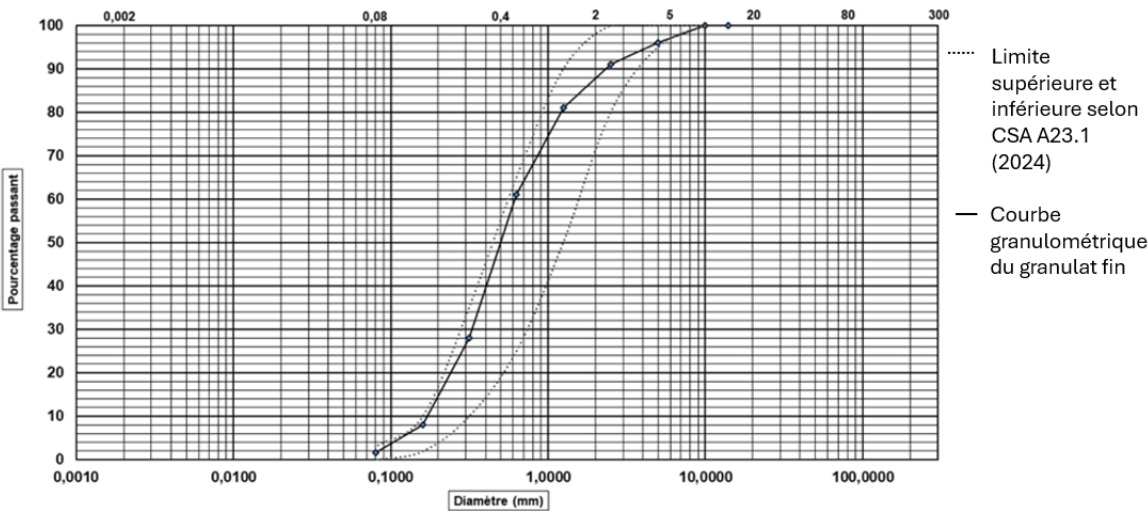


Figure 21 – Courbe granulométrique du granulat fin des tuyaux

Le granulat grossier utilisé pour les tuyaux provient de la carrière DM Choquette (QC, Canada). Ce granulat grossier est une pierre concassée de calibre 5 à 14 mm. Ce granulat est composé à 96,5% de calcaire à grain fin et calcaire dolomitique à grain fin, à 2,4% de calcaire avec placage argileux mince et à 1,1% de calcaire avec placage argileux épais. Ce granulat a une densité à l'état SSS de 2,714 g/cm³ et un coefficient d'absorption de 0,32%. Ces propriétés physiques ont été déterminées conformément à la norme CSA A23.2-6A (CSA A23.1/A23.2, 2024). La granulométrie de ce granulat grossier est présentée au Tableau 12 et à la Figure 22. Celle-ci est conforme à la norme CSA A23.2-2A (CSA A23.1/A23.2, 2024).

Tableau 12 – Distribution granulométrique du granulat grossier des tuyaux

Ouverture des tamis	Passant	Limite CSA
(mm)	(%)	(%)
14	100	100-100
10	93	85-100
5	15	10-30
2,5	4	0-10
1,25	1	0-5
0,630	1	-
0,315	1	-
0,160	1	-
0,080	0,4	0-2

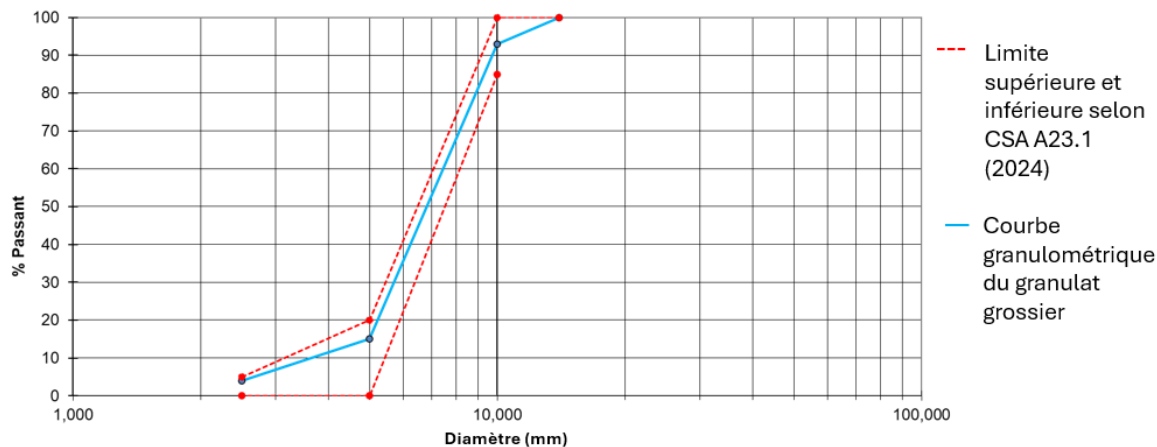


Figure 22 – Courbe granulométrique du granulat grossier des tuyaux

Afin de choisir certains mélanges pour la fabrication de tuyaux de béton armé, chacun des mélanges a d'abord été fabriqué puis caractérisé. Pour ce faire, les RB ont été pesés et mélangés à l'eau requise pour le mélange de béton. Puis, les grosses agglomérations de RB ont été défaits manuellement à l'aide d'un pilon. Le sable et les granulats grossiers ont été ajoutés dans le malaxeur et ont été malaxés pendant 1 minute. Le malaxeur utilisé a une vitesse de rotation de 107 rotations par minute. Par la suite, le mélange d'eau et de RB ainsi que l'agent entraîneur d'air ont été incorporés dans le malaxeur et mélangés pendant deux minutes, avant que le ciment ne soit ajouté et que le tout soit malaxé pendant 3 minutes additionnelles. Une fois le malaxage terminé, 6 cylindres de 76 mm de diamètre ont été fabriqués pour chaque mélange avec la méthode de mise en place spécifiée par la norme C192 de CSA A23.1/A23.2 (2024) pour un béton sans affaissement. Noter que l'affaissement de tous les mélanges était d'environ 0 mm.

Trois cylindres par mélanges ont été testés à 7 jours et trois autres à 28 jours. La résistance à la compression moyenne pour les différents mélanges de béton est présentée à la Figure 23. Les résultats obtenus à 7 jours montrent que, pour les mélanges avec 5, 10 et 15% de RB, des résistances à la compression semblables au mélange de référence sans RB sont obtenues. Cependant, à 28 jours, une faible diminution de la résistance à la compression est observée pour les mélanges avec 10 et 15% de RB. Également, à partir de 20%, une diminution plus significative de la résistance à la compression est observée, et ce autant à 7 jours qu'à 28 jours. Pour un taux de

remplacement de 40%, cette diminution de résistance à la compression à 28 jours atteint 50% de la résistance du mélange de référence sans résidu de bauxite (26 MPa comparativement à 51 MPa).

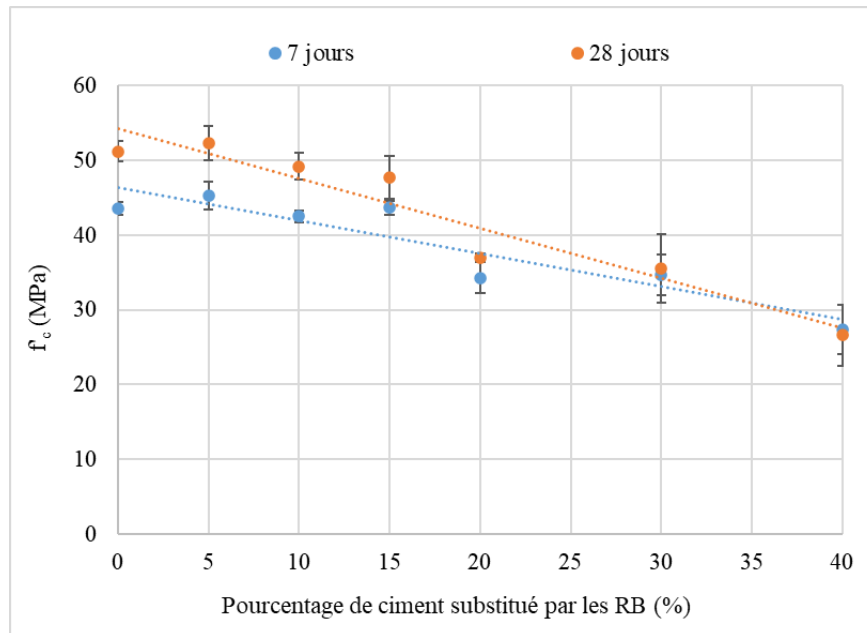


Figure 23 – Résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours pour les mélanges de béton

4.5.4 FABRICATION ET ESSAIS SUR TUYAUX DE BÉTON ARMÉ

4.5.4.1 CHOIX DES MÉLANGES DE BÉTON

Certains des mélanges développés ont été sélectionnés pour la fabrication de tuyaux en béton armé. Les mélanges choisis pour la fabrication des tuyaux sont le mélange avec 0% de RB qui sert de mélange de référence, le mélange avec 15% de RB présentant une résistance à la compression similaire au mélange de référence, le mélange avec 30% de RB permettant d'incorporer le plus haut taux RB tout en conservant une résistance à la compression supérieure à 30 MPa à 28 jours, et finalement, le mélange avec 40% de RB couvrant la limite de remplacement évaluée par la présente étude.

4.5.4.2 DESCRIPTION DES SPÉCIMENS

Des tuyaux de béton armé de diamètre nominal de 300 mm ont été fabriqués avec chacun des mélanges de béton sélectionnés. Ces tuyaux ont un diamètre intérieur moyen de 305 mm, un diamètre extérieur moyen de 440 mm et une épaisseur de paroi moyenne de 67 mm. La fiche de la géométrie des tuyaux est présentée à l'Annexe 6. Les tuyaux ont une longueur totale de 2,44 m. Les tuyaux sont armés avec de l'armature longitudinale de calibre D3, soit des barres d'armature avec un diamètre moyen de 5 mm. Ces barres d'armature ont une limite d'élasticité, f_y , de 554 MPa, testés conformément à la norme ASTM A1064 (2024). Ils sont aussi armés d'armature transversale de calibre 3,5W, soit des barres d'armature avec un diamètre moyen de 5,4 mm (voir Figure 24). Ces barres d'armature ont une limite d'élasticité, f_y , de 613 MPa, testés conformément à la norme ASTM A1064 (2024). L'armature a un recouvrement minimal moyen de 30 mm. Les certificats de conformité de l'armature sont présentés à l'Annexe 7.

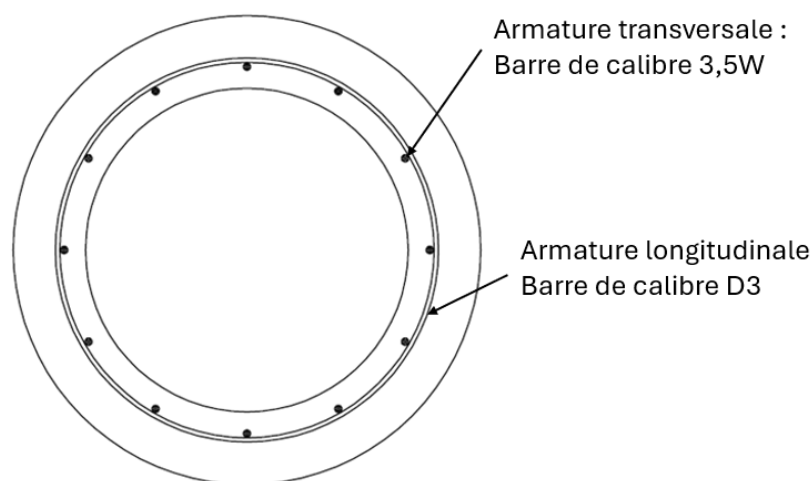


Figure 24 – Coupe type d'un tuyau

4.5.4.3 PROCÉDÉ DE FABRICATION

Afin de refléter au mieux le procédé de fabrication réel employé pour la production de tuyaux de béton armé, les spécimens de tuyaux testés ont été fabriqués dans une usine spécialisée dans la méthode de fabrication par compression radiale. Les mélanges de béton ciblés ont été fabriqués sur

place à l'aide de l'équipement de dosage et de malaxage industriel comme suit. D'abord, les RB ont été pesés et mis de côté dans des seaux afin d'être incorporés ultérieurement et manuellement au malaxeur. Par la suite, le sable et les granulats grossiers ont été dosés puis malaxés pendant une minute dans le malaxeur industriel. Le tiers de l'eau, le RB préalablement préparé ainsi que l'agent entraîneur d'air ont ensuite été incorporés au malaxeur et mélangés pendant deux minutes. Le reste de l'eau et le ciment ont finalement été ajoutés puis malaxés durant trois minutes additionnelles. Une fois le malaxage des composants terminé, 12 éprouvettes cylindriques de 76 mm de diamètre et de 152 mm de haut ont été préparées en suivant la méthode décrite par la norme C192 de la CSA A23.1/A23.2 (2024) pour un béton sans affaissement. Parallèlement, 4 à 5 tuyaux de béton armé ont été fabriqués par projection centrifuge. Les tuyaux fabriqués un à la fois ont ensuite été déplacés dans une chambre de cure pour une cure accélérée à la vapeur de 60°C durant 3 à 4 h, avant d'être déplacée et entreposée à l'extérieur 18 à 20 h après la cure. Cette procédure a été répétée pour chacun des 4 mélanges de béton, ce qui a permis de fabriquer un total de 23 tuyaux de béton armé.

4.5.4.4 MÉTHODE D'ESSAI

Pour chacun des mélanges, 1 tuyau a été testé sur sa pleine longueur en condition industrielle conformément à la norme BNQ 2622-126 (2023) et 1 tuyau a été mis de côté pour être monitoré et testé en laboratoire. Pour les essais en laboratoire, chaque tuyau de 2,44 m de long a été coupé en 3 sections égales d'une longueur de 650 mm. Ainsi, un total de 12 sections de tuyaux a été testé, soit 3 sections de 650 mm de long pour chaque mélange de béton (4 différents mélanges de béton).

Les 12 sections de tuyaux ont été testées conformément à l'aide de l'essai de résistance à la charge $D_{0,3}$ et à la charge D_{ultime} par la méthode du test de résistance à trois points (par écrasement radial) de la norme BNQ 2622-126 (2023). La Figure 25 présente le montage expérimental qui a été utilisé pour les essais en laboratoire. Le déplacement vertical du tuyau a été mesuré à l'aide d'un laser alors que le déplacement horizontal a été mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement à câble.

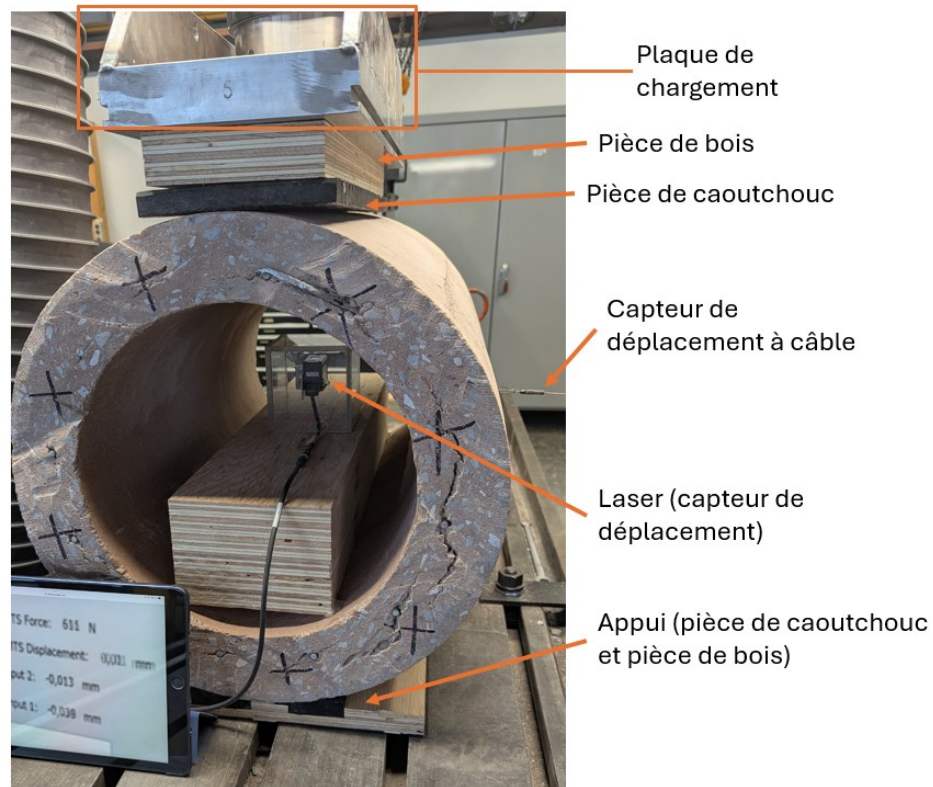


Figure 25 – Montage expérimental pour les essais sur section de tuyaux en laboratoire

4.5.5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.5.5.1 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON UTILISÉ POUR LES TUYAUX

La Figure 26 présente la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours pour les éprouvettes de béton préparées en industrie avec les mélanges utilisés pour la fabrication des tuyaux (moyenne de trois tests). Cette figure compare à la résistance en compression moyenne préalablement obtenue à 28 jours pour les mélanges développés en laboratoire (section 4.5.3, Figure 23).

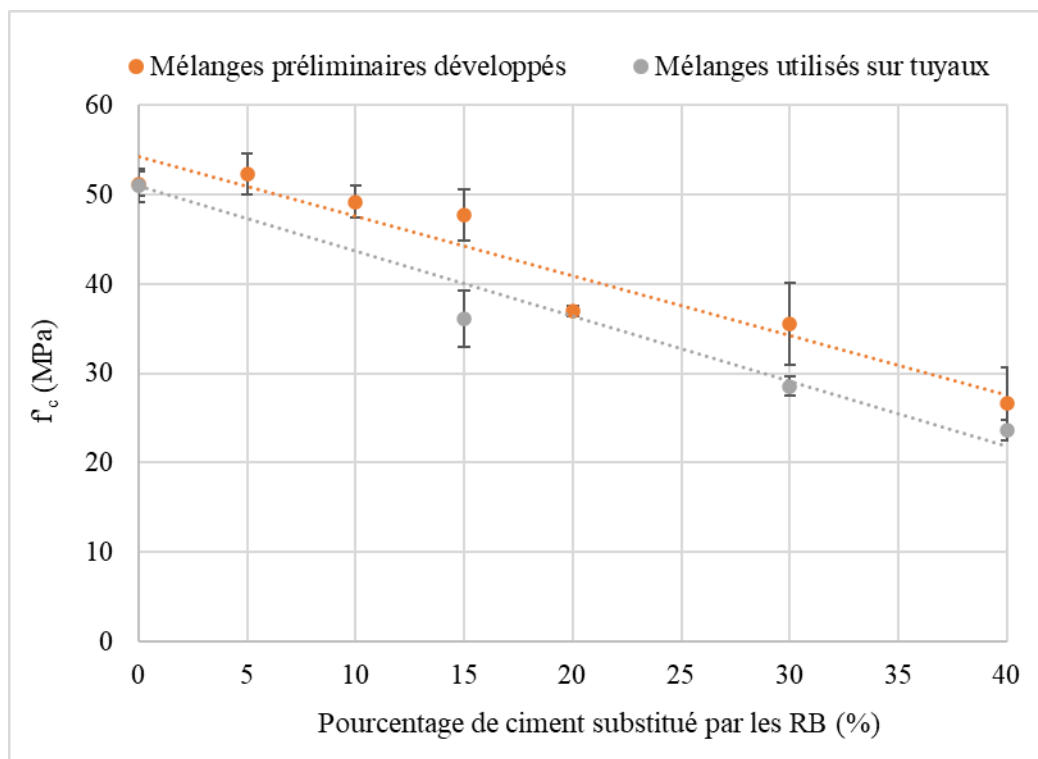


Figure 26 – Résistances en compression à 28 jours pour les mélanges fabriqués en laboratoire et en industrie selon les différents pourcentages de ciment substitué par les RB

En observant les résistances moyennes des mélanges utilisés pour les tuyaux, il est possible de remarquer que la résistance en compression pour les mélanges avec RB présente une diminution significative comparativement au mélange de référence. Cette diminution peut être attribuable à la présence d'agglomérations de RB, comme montré sur l'une des éprouvettes testées présentées à la Figure 27. La présence d'agglomérations de RB dans le béton est causée par une mauvaise méthode de malaxage et d'incorporation des constituants qui n'a pas permis de défaire et de disperser le RB dans les mélanges. En effet, la méthode de préparation des mélanges en industrie est légèrement différente de celle en laboratoire. En laboratoire, la méthode de préparation des mélanges est optimisée pour les bétons de RB, alors qu'en industrie il n'a pas été permis de suivre exactement le même procédé en raison de contraintes de production. En laboratoire, les RB ont été mélangés avec l'eau requise pour les mélanges de béton et les agglomérations de RB ont été défaites. Cette étape n'a pas été réalisée lors de la fabrication des tuyaux en industrie puisque cela ajoutait une complexité en raison des volumes importants des mélanges et d'un temps de manutention augmenté, donc le

RB incorporé présentait encore des agglomérations importantes. De plus, le malaxeur utilisé en industrie n'avait pas la vitesse nécessaire pour défaire ces agglomérations et permettre une bonne dispersion des RB dans le mélange de béton. Le malaxeur utilisé en industrie a une vitesse de malaxage de 40 rotations par minute. Ces agglomérations compactes de RB n'étant pas liées par la matrice cimentaire ne permettent pas de développer une résistance mécanique significative. Ils représentent donc des points de faiblesse à l'intérieur du béton durci, ce qui réduit la résistance mécanique globale du béton.



Figure 27 – Exemple de béton avec agglomérations de RB non défaits pour un cylindre avec 30% de RB

Lors des essais de résistance à la compression sur les éprouvettes de béton des tuyaux, la déformation verticale du cylindre lors de l'essai a été mesurée. Cette mesure a été prise sur 3 cylindres pour chaque mélange de béton. Puis, le module d'élasticité a été calculé conformément à la norme (CSA A23.1/A23.2, 2024). La Figure 28 présente le module d'élasticité moyen, E_c , obtenu pour les différents mélanges de béton utilisés pour la fabrication des tuyaux. Le module d'élasticité le plus élevé est celui du béton de référence, un matériau plus rigide présente un module d'élasticité plus élevé.

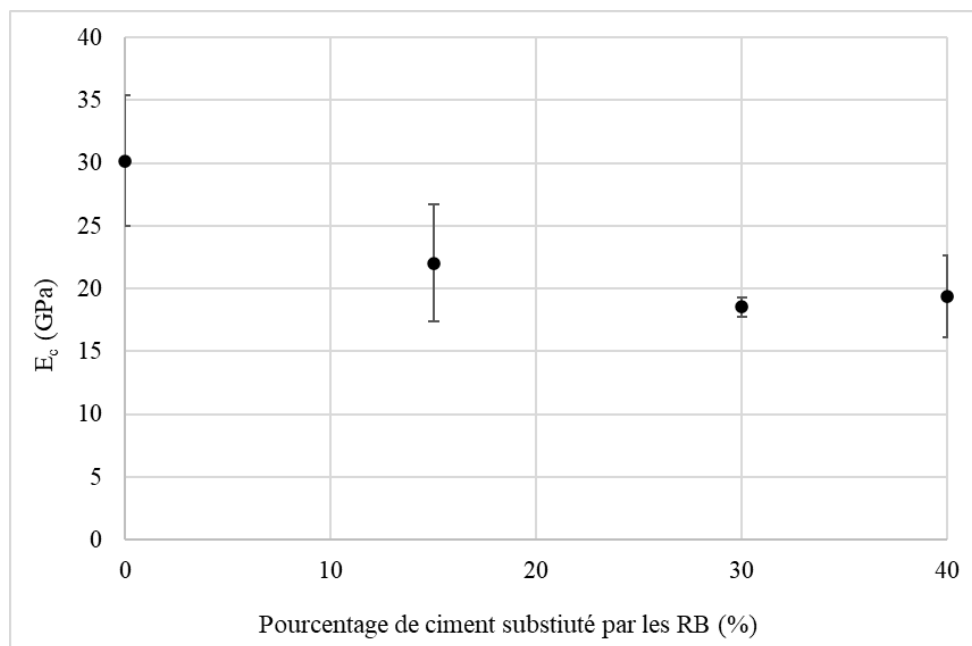


Figure 28 – Module d'élasticité selon le pourcentage de ciment substitué par les RB pour les mélanges des tuyaux

4.5.5.2 COMPOTEMENT DES SECTIONS DE TUYAUX

La Figure 29 présente le comportement de charge appliquée, P , versus le déplacement vertical, Δ , pour les sections de tuyaux testés en laboratoire par écrasement radial. Le Tableau 13 présente les valeurs de charge au 1^{er} pic, $P_{0,3}$, et maximale, P_{ultime} , ainsi que le déplacement vertical correspondant. Pour l'analyse des résultats des sections de tuyaux, la désignation RCX indique le type de mélange, soit le pourcentage de remplacement du ciment par les résidus de bauxite (RB), tandis que le suffixe -X correspond au numéro de la section testée.

Lors du chargement des sections de tuyaux, il peut être constaté à la Figure 29, un premier pic de charge à un déplacement d'environ 0,2 à 0,5 mm pour chacune des sections de tuyaux. Ce premier pic correspond à l'apparition soudaine des premières fissures dans les zones T des tuyaux. Ces fissures sont illustrées aux Figures 30 à 33. Sur ces figures, la fissuration finale correspond à la fissuration des tuyaux lors de la fin de l'essai en laboratoire. Comme illustré pour toutes les sections

de tuyaux testés, les premières fissures sont apparues à partir de la paroi intérieure du bas et du haut du tuyau, et à partir de la paroi extérieure pour le flanc droit et gauche (zones T, Figure 17).

Pour les sections de tuyaux composées de béton de référence sans RB (RC0), l'apparition de la première fissuration correspond à la charge maximale supportée. La rupture qui a suivi cette fissuration a été caractérisée par une perte soudaine de capacité. Le déplacement moyen maximal à la rupture, Δ_{u_moy} , pour les sections de tuyau de référence est de 0,26 mm (Tableau 13). Après cette première fissuration, une certaine charge a pu être maintenue par les tuyaux jusqu'à l'interruption de l'essai, pour un déplacement vertical d'environ 2 mm. Les patrons de fissuration observables à la fin de l'essai (Figure 30), montre des fissures de cisaillement pour les trois sections testées.

Pour les sections de tuyaux faits de béton de RB, il est possible d'observer que la charge conduisant à la première fissuration est inférieure à celle des sections de tuyau de référence fait de béton sans résidu de bauxite. Néanmoins, après l'apparition des premières fissures, l'armature permet de reprendre les efforts en tension et d'accroître de nouveau la charge jusqu'à une nouvelle valeur maximale. À l'exception des sections de tuyau RC15-1 et RC15-2 (voir Figure 29 b), cette nouvelle valeur maximale est supérieure à celle conduisant à la première fissuration.

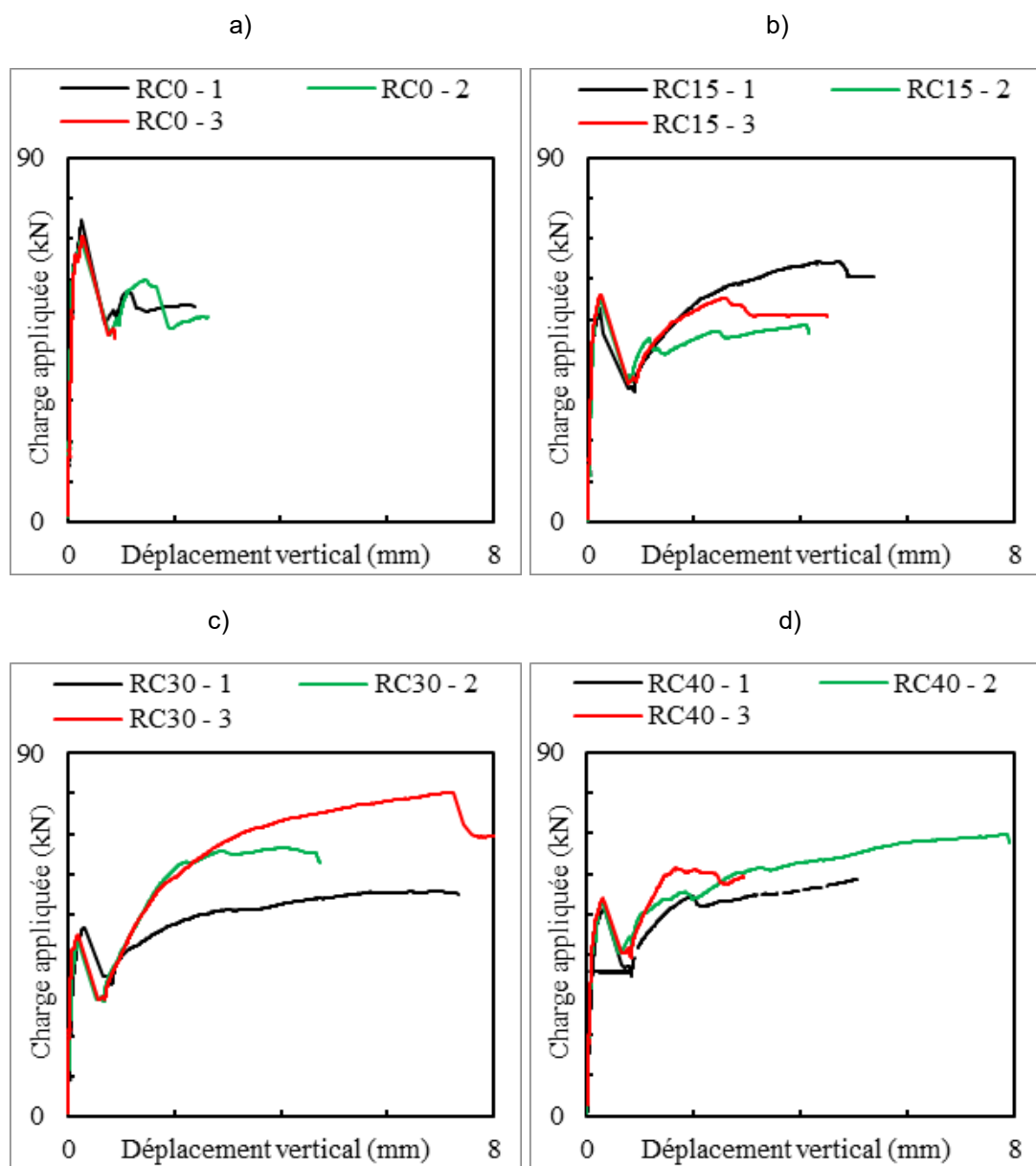


Figure 29 - Relation charge appliquée-déplacement vertical pour différentes sections des tuyaux faits des mélanges incorporant en remplacement du ciment a) 0%, b) 15%, c) 30% et d) 40% de RB

Tableau 13 – Valeurs à la fissuration et à la rupture pour les sections de tuyaux

Section de tuyau	$\Delta_{0,3}$ (mm)	$\Delta_{0,3_moy}$ (mm)	$P_{0,3}$ (kN)	$P_{0,3}$ moyen (kN)	Δ_{ultime} (mm)	Δ_{ultime_moy} (mm)	P_{ultime} (kN)	P_{ultime} moyen (kN)
RC0 - 1	0,26		74,77		0,26		74,77	
RC0 - 2	0,24	0,21	69,68	70,11	0,24	0,26	69,68	71,74
RC0 - 3	0,14		65,89		0,28		70,76	
RC15 - 1	0,25		52,83		4,35		64,28	
RC15 - 2	0,24	0,24	55,49	54,77	0,24	1,61	55,49	58,59
RC15 - 3	0,24		56,00		0,24		56,00	
RC30 - 1	0,29		46,81		5,29		54,96	
RC30 - 2	0,19	0,22	43,29	45,01	4,06	5,53	66,58	67,31
RC30 - 3	0,18		44,93		7,25		80,38	
RC40 - 1	0,32		51,30		1,98		54,45	
RC40 - 2	0,27	0,29	52,77	52,66	7,85	3,83	69,73	61,89
RC40 - 3	0,29		53,92		1,67		61,49	

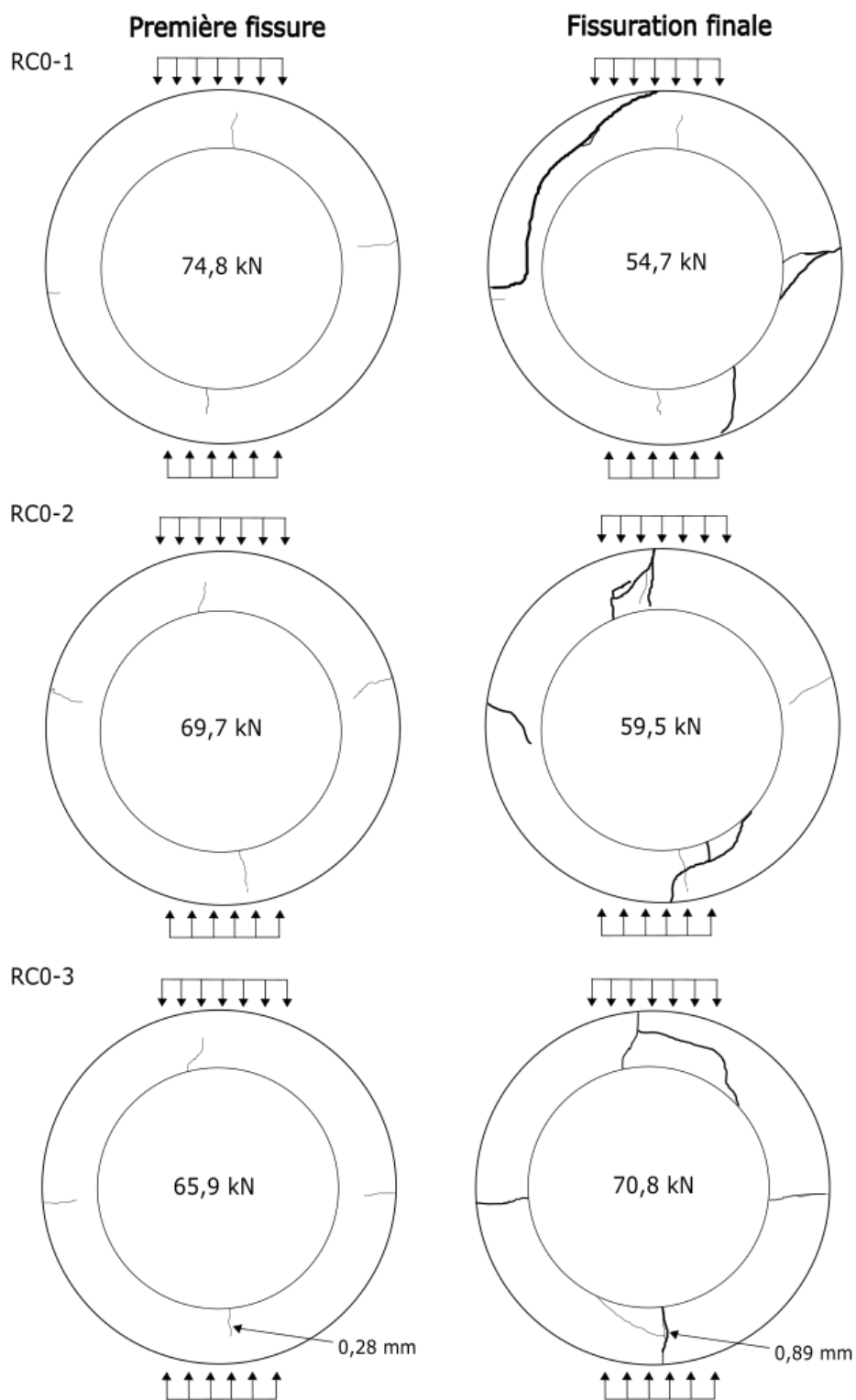


Figure 30 – Premières fissures et fissuration finale des sections de tuyaux avec 0% de RB

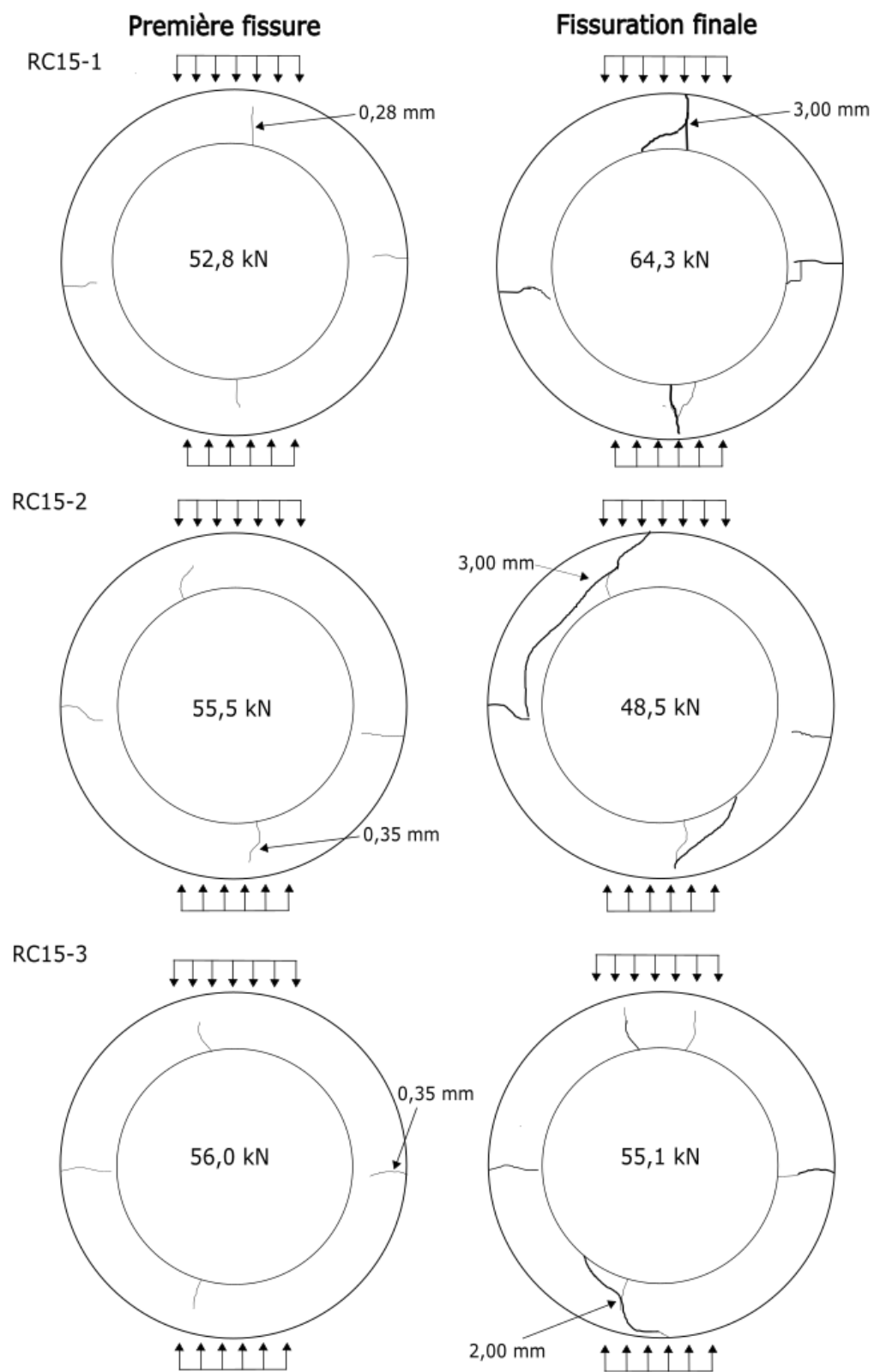


Figure 31 - Premières fissures et fissuration finale des sections de tuyaux avec 15% de RB

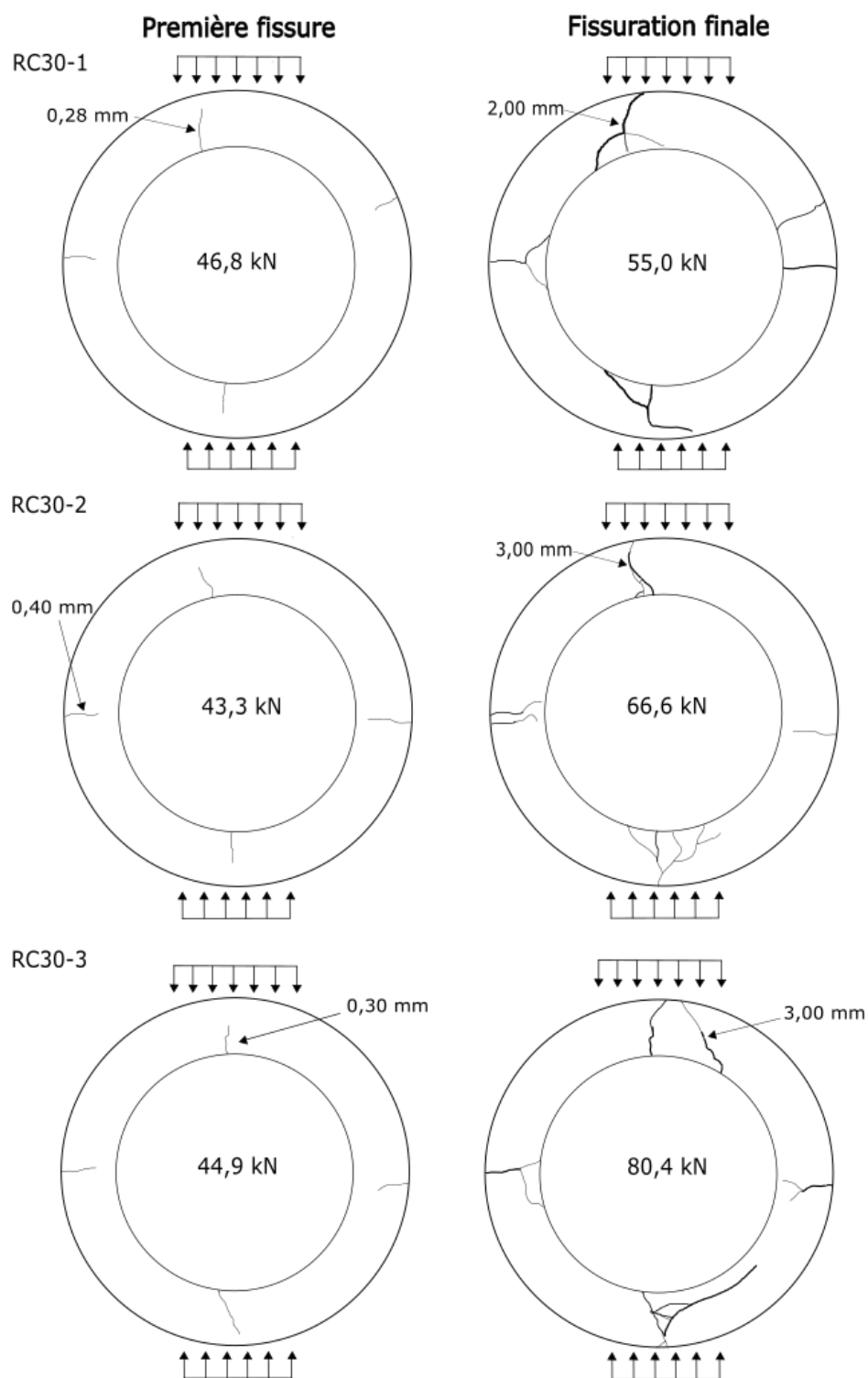


Figure 32 - Premières fissures et fissuration finale des sections de tuyaux avec 30% de RB

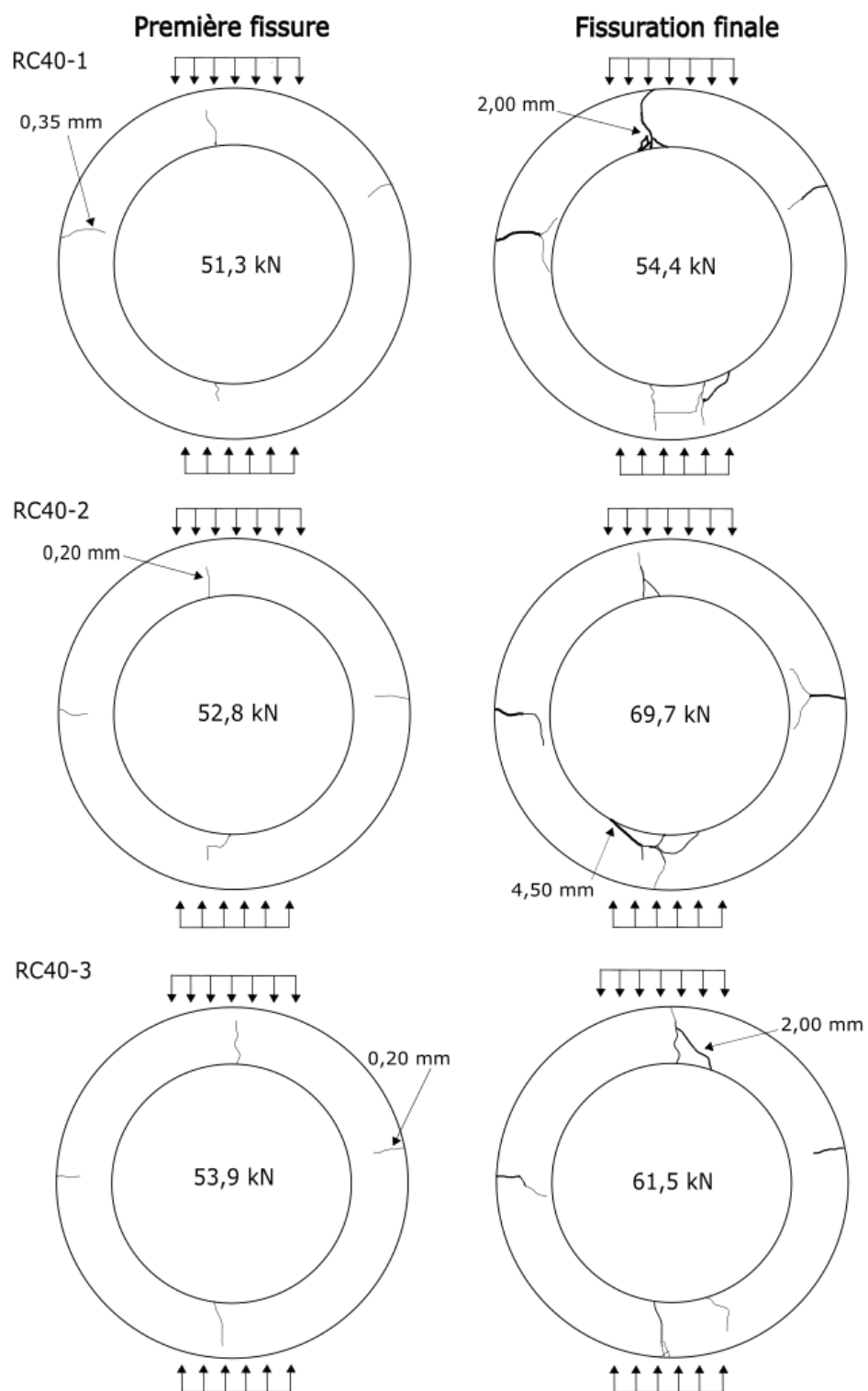


Figure 33 - Premières fissures et fissuration finale des sections de tuyaux avec 40% de RB

Tel qu'il est possible d'observer avec la fissuration finale aux Figures 30 à 33, toutes les sections de tuyaux ont atteint leur rupture finale avec une fissuration en cisaillement, sans égard aux mélanges de béton et à la teneur en RB de ceux-ci.

Comme le présente les résultats du Tableau 13, les sections du tuyau de béton de référence ont atteint une résistance plus élevée que les sections des tuyaux incorporant des RB. En effet, la charge ultime moyenne, P_{ultime} pour les sections du tuyau de référence sans RB (sections RC0) est de 71,74 kN, alors que pour les sections de tuyaux avec RB, P_{ultime} moyen est respectivement de 58,59 kN, 67,31 kN et 61,89 kN pour les sections de tuyaux incorporant 15% (RC15), 30% (RC30) et 40% (RC40) de RB en substitution du ciment. Cela représente une diminution moyenne de P_{ultime} de 18,3, 6,2 et 13,7% respectivement, par rapport au tuyau de référence. Des valeurs de déplacement moyen ($\Delta_{\text{ultime_moy}}$) de 1,61, 5,53 et 3,83 mm ont été obtenues pour les tuyaux avec 15, 30 et 40% de RB. Le comportement ductile observé après la fissuration témoigne de la contribution significative de l'acier d'armature, permettant au tuyau de continuer à supporter des charges croissantes jusqu'à la ruine.

Les tuyaux de béton avec RB ont eu des résistances au 1^{er} pic et à l'ultime comparables. Effectivement, comme il est possible d'observer sur la Figure 29 et le Tableau 13, les charges maximales pour les sections de tuyau de béton avec 15, 30 et 40% de RB sont très près l'une de l'autre alors que les charges maximales des sections de tuyau sans RB (témoin) atteignent une valeur plus élevée. Ces résultats sont différents de ce qui était attendu. Selon les résultats obtenus par Garneau et al. (2026), une diminution progressive des résistances structurales, proportionnelle à la quantité de RB incorporée, a été observée pour les poutres testées. Donc, pour les tuyaux, il était à s'attendre que les sections de tuyau du mélange avec 15% de RB performant mieux que les mélanges avec 30 et 40% de RB. Les comportements similaires observés pour l'ensemble des sections de tuyaux incorporant des RB pourraient s'expliquer par la présence d'agglomérations de RB similaires à ceux présents dans les éprouvettes de caractérisation et observables sur les faces des sections tuyaux, comme montrées à la Figure 34 pour la section RC15-2, caractéristique des

sections de tuyaux incorporant du RB. Ainsi, les résultats suggèrent que pour les tuyaux testés présentant ces agglomérations, la quantité de RB (effet du taux de substitution) est significativement moins importante que l'effet de la présence de ces agglomérations dans le béton.

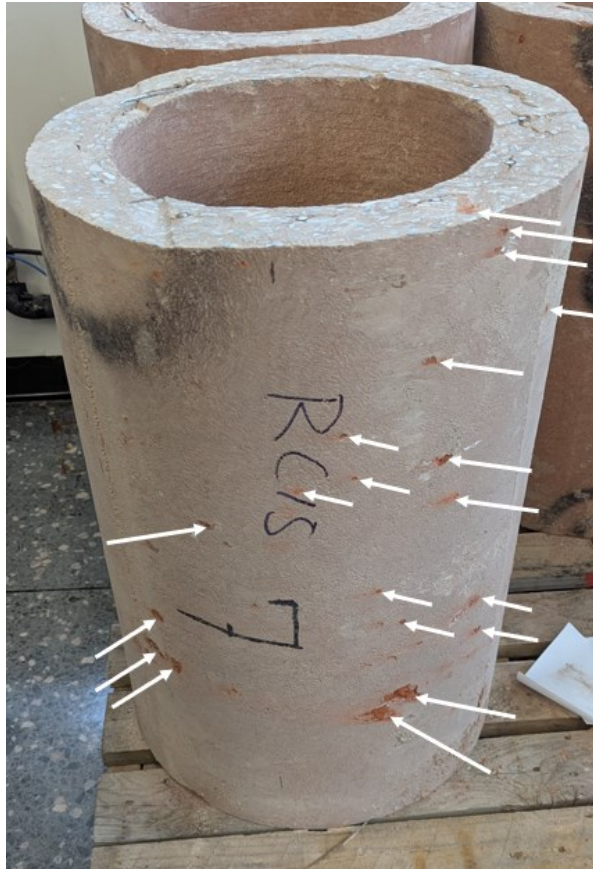


Figure 34 – Identification des agglomérations de RB sur les parois de la section de tuyau RC15-2

4.5.5.3 COMPARAISON AVEC LA NORME BNQ 2622-126

Le Tableau 14 compare les résultats du test d'écrasement radial pour les tuyaux testés en industrie et en laboratoire aux limites normatives données par la norme BNQ 2622-126 pour les tuyaux de béton armé de classe 5. En comparant les résistances à l'ultime obtenues en industrie et en laboratoire, il est possible de constater que les résistances sont comparables. Ces résultats permettent de confirmer la méthodologie utilisée en laboratoire sur les sections de tuyaux testés. En comparant ces résultats à ceux de la norme BNQ 2622-126 (2023), une résistance $D_{0,3}$ de 140 N/mm*m et D_{ultime} de 175 N/mm*m sont requises. À l'exception de quelques sections de tuyaux, l'ouverture des fissures est de 0,3 mm (voir Figure 30, Figure 31, Figure 32, Figure 33) pour les

premières fissures (résistance au 1^{er} pic). Ainsi, les tuyaux des différents mélanges de bétons respectent les exigences de la norme.

Tableau 14 –Résistance à la fissuration et à l'ultime déterminées par l'essai d'écrasement radial des tuyaux testés en laboratoire et en industrie, et comparaison aux limites données par BNQ 2622-126

% de RB dans le tuyau	D _{0,3}					D _{ultime}					
	Indus. (N/m· mm)	Lab (N/m· mm)	Norme (N/m· mm)	Indus. / Norme	Lab / Norme	Indus. (kN)	Lab (N/m· mm)	Modèle (kN)	Indus. / Norme	Lab / Norme	
	0	275	360	140	1,96	2,56	310	368	175	1,77	2,10
	15	237	281		1,69	2,01	308	300		1,76	1,72
	30	200	231		1,43	1,65	267	345		1,53	1,97
	40	188	270		1,34	1,93	216	317		1,23	1,81
	Moyenne				1,61	2,04	Moyenne			1,57	1,90
	COV				17,5%	18,8%	COV			16,1%	9,0%

Indus. = tuyaux testés en industrie

Lab = tuyaux testés en laboratoire

4.5.6 CONCLUSION

Cet article présente d'abord des essais qui ont été effectués afin de développer et de caractériser des mélanges de béton sans affaissement dans lesquels une portion du ciment portland a été remplacés par des résidus de bauxite (RB) filtrés-pressés produit dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Canada), pour un taux de remplacement allant jusqu'à 40%. Les résultats ont montré que jusqu'à 15% de RB peuvent être remplacés sans avoir un effet significatif sur la résistance à la compression des mélanges de béton sans affaissement étudiés. Après 15% de remplacement, une baisse de la résistance à la compression est graduellement observée lorsque le taux de remplacement augmente. Pour un taux de 40% de remplacement, la perte de résistance à la compression du béton atteint 50%.

Les résultats obtenus, au cours de cette recherche, ont aussi montré que le malaxage du béton avec RB joue un rôle majeur sur la résistance du béton avec RB. Étant donné que les RB ont une texture argileuse, une mauvaise méthode de malaxage et d'incorporation du RB dans le mélange de

béton peut faire en sorte que des agglomérations de RB demeurent dans le mélange, ce qui peut affaiblir localement la matrice cimentaire et réduire la résistance à la compression globale du béton.

Tous les tuyaux testés ont présenté des modes de rupture en cisaillement, peu importe la teneur en RB employée dans les mélanges de béton. Également, tous les tuyaux ont une résistance à la fissuration et à l'ultime supérieure à ce qui est requis pour un tuyau de classe 5 de la norme BNQ 2622-126 (2023). Les tuyaux avec 15, 30 et 40% de RB ont montré des résistances comparables. Les résistances des sections tuyaux avec RB sont moins élevées que les résistances des sections de tuyaux de références. Les résultats obtenus suggèrent qu'étant donné que les tuyaux avec RB testés présentaient des agglomérations, l'effet du taux de substitution est significativement moins important que l'effet de la présence de ces agglomérations dans le béton.

Finalement, il est possible de fabriquer des tuyaux de béton en substituant une partie du ciment par les RB. Cependant, le procédé de fabrication utilisé doit permettre de bien disperser le RB dans les mélanges de béton afin d'en éviter les agglomérations.

4.5.7 RÉFÉRENCES

- Abbas, S., Faisal, A., Khan, M. A., Nehdi, M. L., Hameed, R., & Shaukat, S. (2025). Systematic state-of-the-art review on precast concrete pipes. *Results in Engineering*, 25, 103826. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103826>
- ASTM A1064. (2024). *Standard Specification for Carbon-Steel Wire and Welded Wire Reinforcement, Plain and Deformed, for Concrete* (A1064).
- ASTM C76. (2025). *Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe* (C76).
- Berryman, C., Zhu, J., Jensen, W., & Tadros, M. (2005). High-percentage replacement of cement with fly ash for reinforced concrete pipe. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1088-1091.
- Bin, W., & Zhuoying, T. (2020). Influence of Red Mud Proportion on Circular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns. *Advanced Materials, Technologies and Testing for Structural Performance Improvement 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/8578059>
- BNQ 2622-126. (2023). *Tuyaux, branchements latéraux monolithiques et pièces connexes en béton destinés à l'évacuation des eaux d'égout sanitaire et pluvial*. Bureau de normalisation du Québec.
- Brahami, Y. (2023). *Développement d'un type de comportement du béton en fonction de la teneur en résidus de bauxite sous contrainte de compression uni-axiale*. Université du Québec à Chicoutimi.
- Brough, D., & Jouhara, H. (2020). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1, 39. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
- Conduites et produits béton. (2021). *Tuyaux en béton armé à compression radiale*. Repéré le 2025-04-17 à <https://cep.b.ma/tuyaux-en-beton-arme-a-compression-radiale/>
- CSA A23.1/A23.2. (2024). *Béton : constituants et exécution des travaux/Procédures d'essai et pratiques normalisés pour le béton* (CSA A23.1/A23.2:24). Association canadienne de normalisation.
- CSA A257. (2024). *Standards for concrete pipe and manhole* (CSA A257:24). Association canadienne de normalisation.
- CSA A3001-03. (2023). *Cementitious Materials for Use in Concrete*
- Dangol, S. (2023). *Development of Geopolymer Concrete for Precast Pipe Application*. University of Technology Sydney.
- Davies, J., Clarke, B., Whiter, J., & Cunningham, R. (2001). Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban water*, 3(1-2), 73-89.
- Garneau, E., Fiset, M., Darveau, J. B., & Simard, G. (2026). Flexural and shear behavior of reinforced concrete beams incorporating bauxite residue. *Materials and Structures*, 59(4), 191. <https://doi.org/10.1617/s11527-026-03092-7>

- Haktanir, T., Ari, K., Altun, F., & Karahan, O. (2007). A comparative experimental investigation of concrete, reinforced-concrete and steel-fibre concrete pipes under three-edge-bearing test. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1702-1708.
- Hou, D., & Wu, D. (2021). Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC): Design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103862>
- Lima, M. S. S., Thives, L-P. (2017). Red mud application in construction industry: review of benefits and possibilities. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012033>
- Megacon Precast Concrete. (2020). *Perbedaan Reinforced Concrete dan Non Reinforced Concrete*. Repéré le 2024-06-12 à <https://megaconbeton.com/blog/perbedaan-reinforced-concrete-dan-non-reinforced-concrete>
- Metilda, D. L., & Selvamony, C. (2015). Investigations on optimum possibility of replacing cement partially by red mud in concrete. *Academic journal*. <https://doi.org/10.5897/SRE2015.6166>
- Qureshi, H. J., & Ahmad, J. (2022). A Study on Sustainable Concrete with Partial Substitution of Cement with Red Mud: A Review. *Materials*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217761>
- Ramadan, A., Younis, A.-A., Wong, L. S., & Nehdi, M. L. (2020). Investigation of structural behavior of precast concrete pipe with single elliptical steel cage reinforcement. *Engineering Structures*, 219, 110881.
- Savard, V. (2018). *Étude de la compaction de la boue rouge sous l'action d'une presse à vis*. Université du Québec à Chicoutimi.
- Statistique Canada. (2020). *Canada's Core Public Infrastructure Survey: Water Infrastructure, 2020*. I. Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220726/dq220726a-eng.htm>
- Tang, W. C., & Wang, Z. (2018). Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 178, 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.171>
- Tang, W. C., & Wang, Z. (2019). Influence of red mud on mechanical and durability performance of self compacting concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120802>
- Venkatesh, C., Ruben, N., & Chand, M. S. R. (2020). Red mud as an additive in concrete: comprehensive characterization. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57, 281-289. <https://doi.org/10.1007/s43207-020-00030-3>
- Younis, A.-A., Shehata, A., Ramadan, A., Wong, L. S., & Nehdi, M. L. (2021). Modeling structural behavior of reinforced-concrete pipe with single, double and triple cage reinforcement. *Engineering Structures*, 240, 112374.
- Zamanian, S. (2016). *Probabilistic performance assessment of deteriorating buried concrete sewer pipes*. The Ohio State University.

CHAPITRE 5

COMPLÉMENT AUX ARTICLES 1 ET 2 : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

5.1 INTRODUCTION

Le but de cette section est d'évaluer la performance de la modélisation numérique du logiciel VecTor2 pour des éléments en béton dont une partie du ciment est substituée par des RB. Ainsi, les poutres expérimentales présentées au chapitre 2 ont d'abord été modélisées, et les résultats numériques ont été comparés aux résultats expérimentaux correspondants. Par la suite, les tuyaux décrits au chapitre 4 ont également fait l'objet d'une modélisation, dont les résultats ont été comparés aux observations expérimentales. Cette démarche permet de vérifier dans quelle mesure les outils de conception demeurent valides ou doivent être adaptés pour le béton avec RB.

La modélisation numérique dans ce projet a été réalisée à l'aide du logiciel VecTor2, (version 5.6.0) (Wong et al., 2013) un logiciel d'analyse par éléments finis non linéaires dédié aux structures en béton armé bidimensionnelles développées à l'Université de Toronto. Ce logiciel s'appuie sur la théorie du champ de compression modifiée (MCFT) (Vecchio & Collins, 1986) et sur le modèle du champ de contraintes perturbées (DSFM) (Vecchio, 2000), qui sont des modèles analytiques pour prédire la réponse des éléments en béton armé soumis à des contraintes multiaxiales. VecTor2 modélise le béton fissuré comme un matériau orthotrope avec des fissures diffusées et rotatives. Le programme utilise un algorithme incrémental de charge totale basé sur la rigidité sécante du béton armé qui est réévaluée itérativement pour produire une solution non linéaire. Ainsi, le logiciel permet de modéliser avec précision la réponse structurale, la fissuration et la progression de la rupture dans le béton, et ce, en tenant compte des relations constitutives non linéaires du béton et de l'acier (Wong et al., 2013).

5.1.1 MODÈLES DE COMPORTEMENT DE VECTOR2

La théorie du champ de compression modifiée (MCFT) et la théorie des contraintes perturbées (DSFM) à la base du logiciel VecTor2 permettent de prédire la réponse en charge-déformation des éléments en béton armé soumis à des contraintes multiaxiales. Ces théories permettent de déterminer les déformations et les contraintes moyennes et locales du béton et de l'armature, ainsi que l'ouverture et l'orientation des fissures tout au long de la réponse en charge-déformation de l'élément afin de prédire le mode de rupture d'un élément structural (Vecchio & Collins, 1986; Wong et al., 2013). Spécifiquement, la MCFT s'appuie sur les principes suivants (Wong et al., 2013) :

- Le béton entre les fissures conserve encore une certaine capacité portante en traction, donc la théorie tient compte de la traction reprise dans le béton fissuré, ce qui améliore la prédiction de la réponse en cisaillement des poutres en béton armé ;
- Le béton fissuré est un matériau orthotrope puisque les contraintes principales et les déformations principales du béton ne sont plus alignées avec les axes des éléments (poutres, dalles), mais elles suivent plutôt un champ de compression incliné;
- La relation contrainte-déformation du béton est modifiée pour tenir compte de la fissuration, de la compatibilité de déformations et de l'interaction avec les armatures.

La MCFT utilise les hypothèses suivantes (Wong et al., 2013):

- Les fissures dans le béton sont suffisamment nombreuses et distribuées pour que le champ de contrainte soit représenté par des valeurs moyennes ;
- Le glissement entre les fissures est faible, les armatures assurent une continuité moyenne des déformations ;
- La contrainte normale et la contrainte de cisaillement sont interdépendantes dans les directions principales ;
- L'orientation des fissures peut changer au fur et à mesure que le champ de contrainte évolue.

Le modèle du champ de contraintes perturbées (DSFM) est une extension du MCFT afin d'améliorer sa capacité à reproduire le comportement du béton près des fissures principales, près

des ancrages ou des concentrations de contraintes (Vecchio, 2000). Le DSFM renforce les relations de compatibilité du MCFT pour inclure les déformations de glissement de fissures en cisaillement. De plus, en calculant explicitement les déformations de glissement des fissures, le DSFM élimine la vérification du cisaillement des fissures telle que requise par le MCFT (Wong et al., 2013).

5.1.2 TYPES D'ÉLÉMENTS

La bibliothèque d'éléments de VecTor2 est subdivisée en trois catégories soit : les éléments en béton armé, les éléments de renforcement et les éléments d'adhérence.

Les éléments en béton armé se composent d'éléments plans triangulaires, rectangulaires ou quadrilatéraux qui modélisent le béton avec ou sans armature diffuse. Pour ces éléments, l'armature diffuse représente les barres d'acier longitudinales ou transversales de manière distribuée dans les éléments finis de béton de la zone d'une structure. Cela signifie que les effets de l'acier sont intégrés dans les propriétés du matériau composite béton-acier, selon la quantité et l'orientation spécifiée. Cette approche permet de représenter efficacement l'interaction béton-acier et la résistance en traction de la section tout en maintenant un modèle numérique léger et stable.

Les éléments de renforcement sont utilisés pour modéliser les barres d'armature ou les couches de polymère renforcé de fibres. De façon générale, dans les modèles, l'armature bien distribuée est modélisée avec les éléments de renforcement. Les éléments de renforcement sont représentés avec des éléments barre, soit des éléments à deux nœuds avec une section transversale uniforme tels que présentés à la Figure 35.

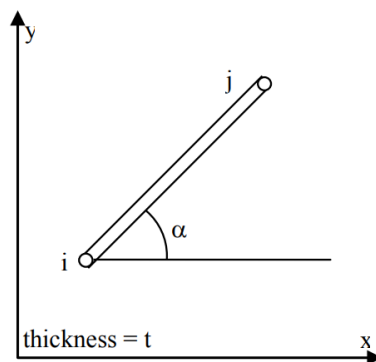


Figure 35 – Éléments barre pour les éléments de renforcement des modèles de VecTor2 (Wong et al., 2013)

Les éléments d'adhérence servent d'interfaces déformables entre les éléments en béton armé et les éléments de renforcement. Les éléments d'adhérence sont utilisés pour modéliser le comportement de l'interface entre le béton et l'acier d'armature. Ils permettent de reproduire le transfert des efforts entre les deux matériaux et de simuler le glissement relatif qui se produit lorsqu'une charge est appliquée. Sans éléments d'adhérence, les éléments en béton armé et les éléments de renforcement sont définis par des nœuds communs. Ainsi, le déplacement de ces éléments est compatible, donc une condition de liaison parfaite est représentée.

5.1.3 MAILLAGE

Les modèles par éléments finis développés dans VecTor2 reposent sur un maillage fin composé d'éléments simples, mais peu performants individuellement. Parmi les géométries de maillage, on retrouve le maillage triangulaire, rectangulaire et quadrilatéral.

Le maillage triangulaire est composé d'éléments à trois nœuds et d'une épaisseur uniforme, comme présenté à la Figure 36. Ce type de maillage a six degrés de liberté. Les triangles peuvent adopter n'importe quelles formes et orientations. Cependant, la précision diminue lorsque la forme s'éloigne d'un triangle équilatéral, donc il est préférable d'éviter les triangles allongés et déformés. Avec le maillage triangulaire, les déformations et les contraintes sont constantes dans tout l'élément. Ainsi, celui-ci se comporte mal en flexion. Pour ce type de sollicitation, un maillage plus fin est requis

pour obtenir la même précision qu'un maillage rectangulaire. Pour ces raisons, le maillage triangulaire est principalement utilisé aux bords qui ne sont pas parallèles aux axes X ou Y et pour effectuer des transitions dans la taille des éléments.

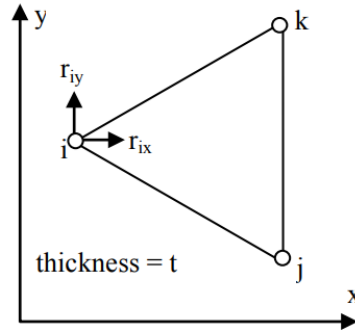


Figure 36 – Éléments triangulaires pour le maillage dans VecTor2 (Wong et al., 2013)

Le maillage rectangulaire est composé d'éléments à quatre nœuds et il a une épaisseur uniforme comme montré à la Figure 37. Pour cette géométrie, chaque nœud se déplace dans les directions x et y ce qui lui donne huit degrés de liberté. Le rectangle doit être orienté parallèlement avec les axes X et Y. La précision du maillage rectangulaire diminue lorsque la forme de ses éléments s'éloigne d'un carré. Les éléments rectangulaires peuvent représenter des gradients linéaires de déformations et de contraintes à travers leur largeur et leur hauteur, ce qui permet d'éviter le cisaillement parasite lors de l'évaluation des déformations. Cette géométrie de maillage est donc préférable pour modéliser des zones en béton armé.

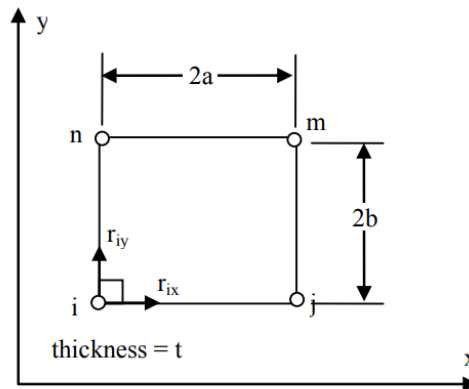


Figure 37 - Éléments rectangulaires pour le maillage dans VecTor2 (Wong et al., 2013)

Le maillage quadrilatéral est composé d'éléments à quatre nœuds et il a une épaisseur uniforme comme montré à la Figure 38. Chaque nœud se déplace dans la direction X et Y, donc ce type de maillage a huit degrés de liberté. Pour ce type de maillage, le quadrilatère peut prendre n'importe quelle orientation et n'importe quelle forme dans le système de coordonnées X et Y. Cependant, pour avoir des résultats précis, les quadrilatères doivent avoir des angles intérieurs environ égaux et ne pas présenter de déformations excessives, de conicité ou de torsion. VecTor2 calcule les déformations des quadrilatères comme la moyenne surfacique des déformations de chaque élément triangulaire. Donc, un maillage plus fin est requis pour avoir la même précision qu'un maillage rectangulaire. L'utilisation du maillage quadrilatéral doit être limitée aux situations nécessitant des arêtes non parallèles aux axes X et Y et pour la réalisation des transitions dans la taille des éléments.

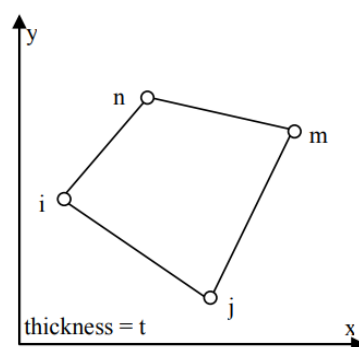


Figure 38 - Éléments quadrilatères pour le maillage dans VecTor2 (Wong et al., 2013)

5.2 COMPOSANTES DES MODÈLES DES POUTRES TESTÉES AU CHAPITRE 2

Pour la modélisation des poutres, le béton, l'armature et les appuis représentés par les plaques de chargement ont été modélisés. Les géométries des différents modèles numériques de poutres ont été définies conformément à celles des poutres testées en laboratoire, telles que présentées à la Figure 3 et au Tableau 3. Étant donné que les poutres sont symétriques, il a été décidé de modéliser la moitié des poutres afin d'optimiser le temps de calcul. La Figure 39 présente le maillage des poutres B2.6, B3.2 et B3.5 modélisées. Un maillage de type hybride rectangulaire a été utilisé pour les modélisations. Une taille d'éléments de 10 mm a été retenue pour l'ensemble des éléments des modèles de poutres. De plus, un rapport d'aspect de 1,5 a été adopté afin d'obtenir des éléments

quasi carrés, favorisant ainsi une meilleure précision numérique. Un facteur de complexité de 0,5, correspondant à un maillage relativement simple, a également été choisi. Ces deux paramètres constituent la configuration de base utilisée dans VecTor2. Sur les modèles des poutres présentées à la Figure 39, l'axe de symétrie central des poutres est représenté par la bande d'appui sur rouleau. La section de béton en gris foncée correspond à la section de béton où il y a le crochet de l'armature. À cet emplacement, l'armature a été représentée par de l'armature diffuse positionnée verticalement. Les plaques d'appui et de chargement en acier sont illustrées par les rectangles vert sarrasin. La friction entre le béton et les plaques d'acier est modélisée par les éléments unidirectionnels élastiques orange de type appui (« bearing ») situés entre les éléments de ces deux matériaux. Cette friction est représentée en imposant un angle de 70° (mesurés par rapport à l'axe horizontal X) à la transmission des contraintes correspondant ainsi à un coefficient de frottement de $\cot(70^\circ) \approx 0.4$. L'appui à la base des poutres est représenté par un appui simple.

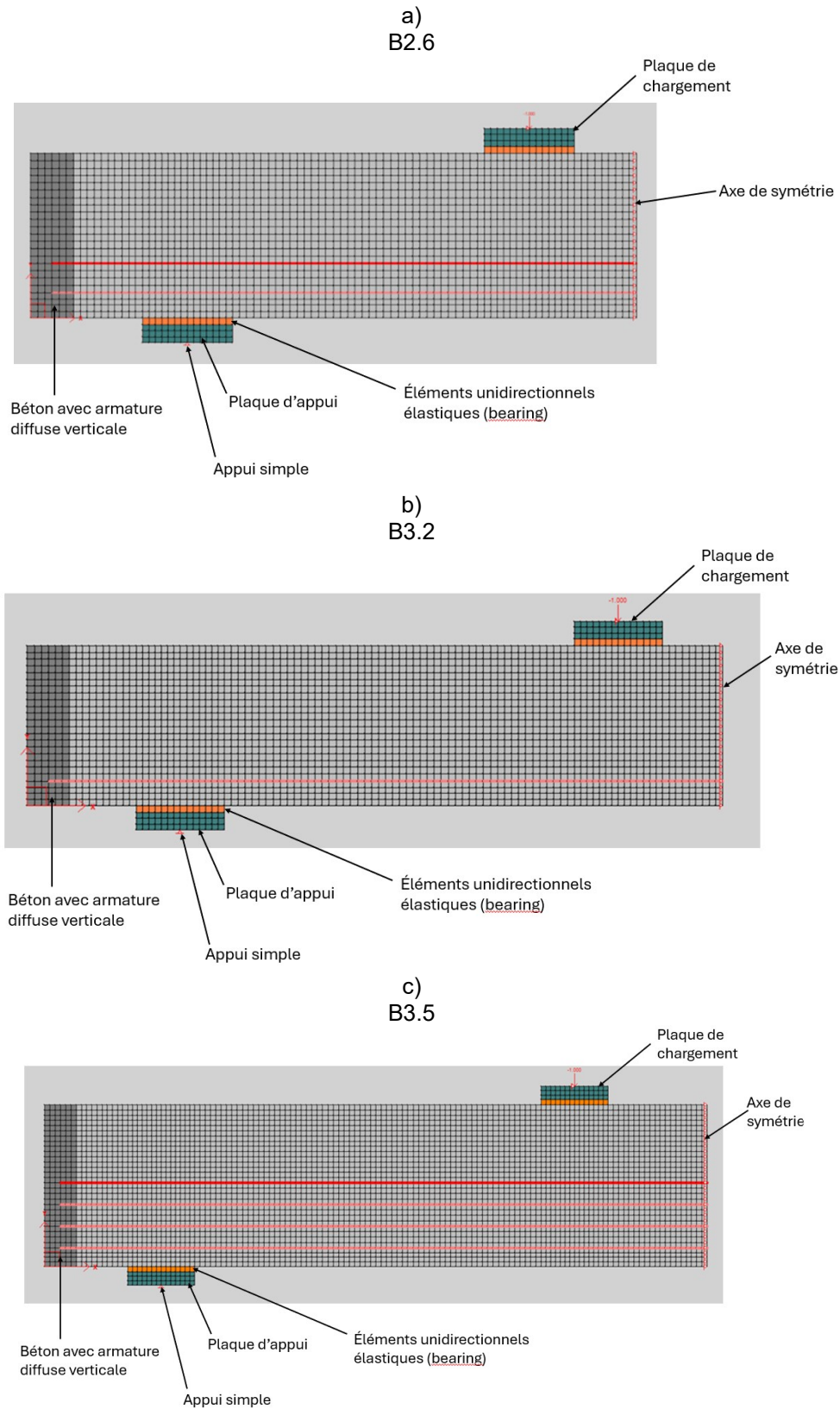


Figure 39 – Maillage des poutres a) B2.6, b) B3.2 et c) B3.6

Les propriétés des différents matériaux ont été définies sur la base des propriétés moyennes des bétons utilisées dans les poutres présentées aux chapitres 2 et 3. Le Tableau 15 présente les propriétés mécaniques du béton définies pour les différents modèles de poutres. Les autres propriétés mécaniques pouvant être définies ont été calculées sur la base de celles présentées par le logiciel. Les propriétés des crochets des barres longitudinales modélisées comme l'armature diffuse dans le béton sont données au Tableau 19. Le taux d'armature pour ces armatures diffuses a été calculé en considérant le nombre de barres d'armature présentes à l'intérieur d'une bande de béton de 60 mm (mesurée horizontalement), ce qui correspond à deux fois l'enrobage de l'armature. Les éléments de transition en friction de type appuis (« bearing ») sont orientés à 70° par rapport à l'axe longitudinal. Leur largeur et leur rigidité sont prises équivalentes à celles des plaques d'appui en acier, dont les propriétés sont données au Tableau 17.

Tableau 15 – Propriétés de béton entrées dans les différents modèles de poutres

Poutres	Résistance à la compression (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
B2.6-BR0	39,3	31 800
B2.6-BR15	24,0	22 510
B2.6-BR22	26,8	21 041
B3.2-BR0	39,3	31 800
B3.2-BR15	24,0	22 510
B3.2-BR22	16,6	15 821
B3.5-BR0	32,7	27 600
B3.5-BR15	24,8	24 700
B3.5-BR22	23,7	24 299

Tableau 16 - Propriétés de l'armature verticale (crochet) pour les poutres

Propriété des barres d'armature diffuses de type ductile	Géométrie de poutre		
	B2.6	B3.2	B3.5
Direction de l'armature déterminée selon l'axe X (°)	90	90	90
Taux d'armature (%)	4,39	2,19	12,06
Diamètre d'une barre (mm)	11,3	11,3	11,3
Limite d'élasticité (MPa)	452,84	452,84	452,84
Limite ultime (MPa)	609,2	609,2	609,2
Déformation à l'écroutissage (me)	10	10	10
Déformation ultime	150	150	150
Coefficient d'expansion thermique	0*	0*	0*
Déformation de précontrainte	0	0	0
Ratio de longueur non supportée	0	0	0

0* valeur prise par défaut et calculée automatiquement par VecTor2

Tableau 17 - Propriété des plaques d'appui de type acier structural pour tous les modèles de poutre

Épaisseur (mm)	152
Limite d'élasticité (MPa)	400
Limite ultime (MPa)	500
Module d'élasticité (MPa)	200 000
Déformation à l'écroutissage (me)	10
Déformation ultime	150
Coefficient d'expansion thermique	0*
Diffusivité thermique	0

5.3 COMPOSANTES DES MODÈLES DES TUYAUX TESTÉS AU CHAPITRE 4

La Figure 40 présente le maillage employé pour modéliser les sections des tuyaux testés en laboratoire et présentés au chapitre 4. Il a été décidé d'opter pour un maillage de type « Grid superposition » rectangulaire et triangulaire. Ce type de maillage suit une grille rectangulaire qui recouvre la géométrie de l'élément modélisé. Ce type de maillage simplifie la modélisation et il assure une uniformité, ce qui aide pour la convergence des calculs (Wong et al., 2013). Pour les tuyaux, la taille des éléments est de 5 mm. Pour le système de chargement, soit la pièce de caoutchouc, la pièce de bois et la plaque de chargement, un maillage plus grossier de 15 mm a été opté afin de réduire le temps de calcul. Pour tous les éléments de la modélisation des tuyaux, un rapport d'aspect de 1,2 a été choisi pour avoir des éléments presque carrés, ce qui permet d'avoir une meilleure précision. Un facteur de complexité de 0,5, soit un maillage relativement simple a été choisi. La combinaison de ce paramètre avec un rapport d'aspect maximal de 1,2 a été retenue comme la configuration offrant le meilleur compromis entre la précision des résultats et la capacité de l'ordinateur utilisé. En raison de la symétrie géométrique et de chargement du tuyau, il a été décidé d'optimiser la modélisation en modélisant uniquement un quart de tuyau. Dans ce modèle, le béton ainsi que les pièces de transfert de caoutchouc illustrées en vert olive, la pièce de bois en jaune et la plaque d'acier appliquant le chargement sur toute la longueur du tuyau en vert sarcelle ont été modélisés par des éléments rectangulaires et triangulaires, en raison de la géométrie complexe. L'armature circulaire faisant la circonférence des sections a été modélisée par des éléments discrets de type barre à deux nœuds, alors que l'armature longitudinale de 5,4 mm de diamètre a été modélisée sous forme d'armature diffuse hors plan dans les éléments de béton (taux d'armature de 0,46%). Les conditions d'appui sont choisies afin de représenter les conditions de symétrie, soient un déplacement horizontal (en X) restreint sur l'axe de symétrie vertical, et un déplacement vertical (en Y) restreint sur l'axe de symétrie horizontale. Le chargement est appliqué au haut de la plaque de chargement, vis-à-vis l'axe de symétrie vertical. Cette configuration permet de représenter les conditions limites et le système de chargement utilisé en laboratoire (Figure 25). Le tuyau modélisé présente un diamètre intérieur de 300 mm, une épaisseur de paroi de 65 mm et une longueur de 650

mm (profondeur des éléments pris en direction Z), ce qui correspond à la géométrie des tuyaux testés en laboratoire.

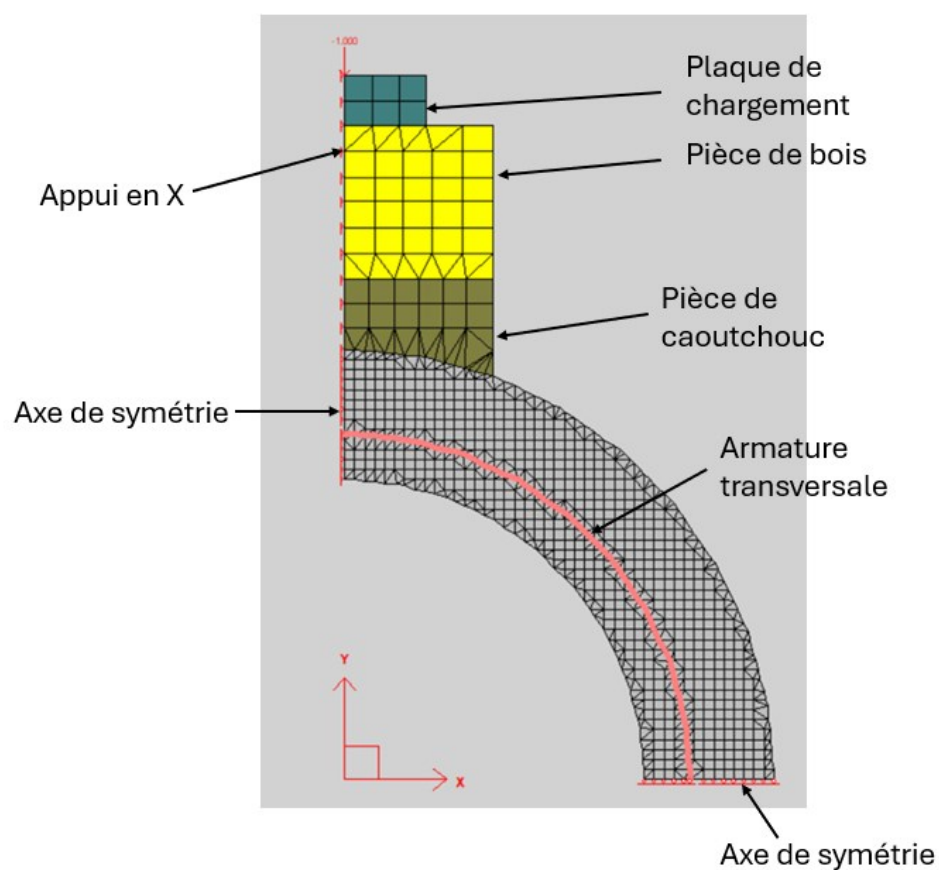


Figure 40 – Maillage et conditions d'appui du modèle d'un quart de section de tuyau testé en laboratoire

Les propriétés du béton armé constituant les parois des tuyaux définies dans le modèle numérique sont données au Tableau 18. Les propriétés non spécifiées sont déterminées par défaut à partir de la résistance à la compression du béton par le logiciel.

Tableau 18 – Propriétés de béton entrées dans les différents modèles de tuyau

Tuyau	Résistance à la compression (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
RC0	51,0	30 160
RC15	36,1	22 010
RC30	28,4	18 530
RC40	23,7	19 400

Les propriétés de l'acier utilisé pour modéliser le comportement des barres circonférentielles, des barres longitudinales et des plaques de chargement sont données au Tableau 19. Le taux d'armature longitudinale de 0,46% a été calculé en considérant la disposition des barres sur la circonférence d'un tuyau de 365 mm de diamètre moyen, avec un espacement de 76,2 mm, conformément aux données techniques présentées dans la fiche de la géométrie des tuyaux à l'Annexe 6. L'armature circonférentielle est composée de barres de type D3 d'un diamètre de 5 mm, disposées à un espacement de 76,2 mm et un recouvrement de 23 mm. Cette configuration correspond à une aire de section transversale de 166,9 mm² pour une section de tuyau de 650 mm de long. Étant donné que cette armature est lisse, les éléments de liaison ont été ajoutés aux modèles afin de représenter la diminution d'adhérence entre le béton et l'acier et le comportement de ces éléments a été sélectionné pour refléter l'adhérence de barres lisses (« smooth reinforcement »). La pièce de caoutchouc a été représentée par un matériau de type « bearing » ce qui simule le comportement des zones de contact entre le tuyau et l'appui (le système de chargement). Ces éléments sont orientés verticalement (90°), de rigidité de 10 MPa (ChemEurope, 2026) et s'appuyant sur toute la longueur de la section de tuyau. Celui-ci épouse la courbure du tuyau pour que le chargement soit bien distribué. Finalement, la pièce intermédiaire de bois, faisant la pleine longueur de la section de tuyau, est considérée orientée verticalement, avec une résistance à la compression longitudinale de 11,5 MPa, une résistance à la compression transversale de 5,3 MPa, une résistance à la traction de 5,5 MPa dans les deux directions, une résistance au cisaillement de 1,5 MPa, une densité de 420 kg/m³, et un module d'élasticité de 9,5 GPa (CSA O86, 2024).

Tableau 19 – Propriétés de l'acier pour modéliser les sections de tuyau

	Barre circonférentielle	Barre longitudinale	Plaque de chargement
Type d'élément	Barre, discret	Diffus	Triangulaire
Module d'élasticité (GPa)	200	200	200
Limite d'élasticité (MPa)	554	613	400
Limite ultime (MPa)	579	671	500
Déformation à l'écrouissage ($\times 10^{-3}$)	10	10	*
Déformation ultime ($\times 10^{-3}$)	150	150	*
Coefficient d'expansion thermique	*	*	*
Déformation de précontrainte	0	0	*
Ratio de longueur non supportée	0	0	*

* Valeur déterminée selon les paramètres par défaut du logiciel

5.4 PARAMÈTRES DE MODÉLISATION

Le Tableau 20 présente les paramètres de chargements utilisés pour l'analyse statique non linéaire des poutres et des tuyaux. Le chargement est appliqué sur les poutres et les sections de tuyaux sous la forme d'un déplacement imposé monotone, en appliquant un déplacement de 1 mm (vers le bas) à l'endroit spécifié dans les différents maillages. Ce déplacement est multiplié et incrémenté par le facteur d'incrément jusqu'à l'atteinte du facteur final multiplicatif au dernier pas de chargement. Par exemple pour la poutre B2.6, le déplacement est de 0,025 mm au 1^{er} pas de chargement et de 5 mm au 201^e pas de chargement. Pour toutes les analyses, le facteur de convergence visé déterminé sur la base des déplacements moyens pondérés est de 1.00001 et le nombre maximum d'itérations par pas de chargement est fixé à 60. Le choix de ces paramètres provient d'un équilibre entre la stabilité numérique, la précision des résultats et le temps de calcul nécessaire pour modéliser le comportement complet des poutres et des tuyaux jusqu'à la ruine.

Tableau 20 – Paramètres de chargements pour les modèles des poutres et des tuyaux

Paramètres	Poutres B2.6	Poutres B3.2	Poutres B3.5	Tuyaux
Nombre de pas de chargement	201	201	201	601
Facteur final	5	7	7	6
Facteur d'incrément	0,025	0,035	0,035	0,01
Facteur de lissage	0,6	0,6	0,6	0,6

Le Tableau 21 présente les lois de comportement des modèles de matériaux et des modèles d'analyse employés pour les poutres et les tuyaux. Ces lois de comportement sont celles de bases recommandées dans VecTor2. D'autres auteurs ont employé ces lois de comportement pour valider ce logiciel pour la modélisation de différentes structures en béton armé (Fiset, 2019; Mohammed et al., 2016; Vecchio, 2000; Vecchio & Collins, 1986; Wong et al., 2013). Afin d'en apprendre davantage sur les différentes lois de comportement utilisées dans VecTor2, il est possible de consulter guide d'utilisation de VecTor2 de Wong et al. (2013).

Tableau 21 – Paramètres pour les lois de comportement des modèles des tuyaux

Paramètres	Tous les modèles (poutres et tuyaux)
Modèles de béton	
Compression prépic	Popovics NSC
Compression post-pic	Park-Kent modifié
Adoucissement en compression	Vecchio 1992-A (e_1/e_2 -Form)
Résistance confinée	Kupfer / Richart
Dilatation	Variable - Isotrope
Critère de fissuration	Mohr-Coulomb (Contrainte)
Calcul des contraintes de fissure	Basique (DSFM/MCFT)
Vérification largeur fissure	Agg / 2,5 largeur max fissure
Calcul glissement fissure	Walraven
Fluage/fatigue	Non considéré
Réponse hystérétique	Non linéaire avec décalages plastiques
Rigidification en traction	Bentz 2003 modifié
Adoucissement en traction	Bilinéaire
Tension FRC	SDEM - Monotone
Modèles d'armature	
Réponse hystérétique	Effet Bauschinger (Seckin)
Action de goujon	Tassios (Glissement fissure)
Flambement	Akkaya 2012 (Dhakal-Ma modifié)
Modèle d'adhérence	
Adhérence béton	Eligehausen
Modèles d'analyse	
Historique des déformations	Chargement précédent considéré
Effets de vitesse de déformation	C : n/c S : n/c
Amortissement structurel	Non considéré
Non-linéarité géométrique	Considérée
Fissuration	CEB-FIP 1978 - Déformé

5.5 RÉSULTATS POUR LES POUTRES

Les différents résultats des modèles numériques pour les poutres ont été comparés aux résultats obtenus en laboratoire. La Figure 41 compare les courbes effort tranchant, V , en fonction du déplacement vertical des modèles numériques et des essais pour les différentes géométries de poutres. Pour toutes les poutres testées en laboratoire, l'effort tranchant, V , est déterminé par charge statique et est pris comme la moitié de la charge appliquée. Sur cette figure, les lignes pleines représentent les résultats obtenus en laboratoire alors que les traits pointillés représentent les résultats obtenus pour la modélisation. De façon générale, il peut être observé que l'allure des courbes est semblable pour les modèles numériques et pour les essais en laboratoire, à l'exception de la poutre B2.6-BR0 (voir Figure 41 a) pour laquelle un comportement différent est observé en laboratoire comparativement au modèle. Comme expliqué au chapitre 2, le comportement de cette poutre testée en laboratoire s'explique par la résistance plus élevée du béton, ce qui a permis la plastification de l'armature et ce qui a conduit à une rupture en flexion. Numériquement, la plastification de l'armature longitudinale et ce plateau plastique ductile ne sont pas atteints, autant pour cette poutre, que pour toutes les poutres modélisées. Ainsi, le modèle prédit que la capacité de toutes les poutres est limitée par leur résistance au cisaillement.

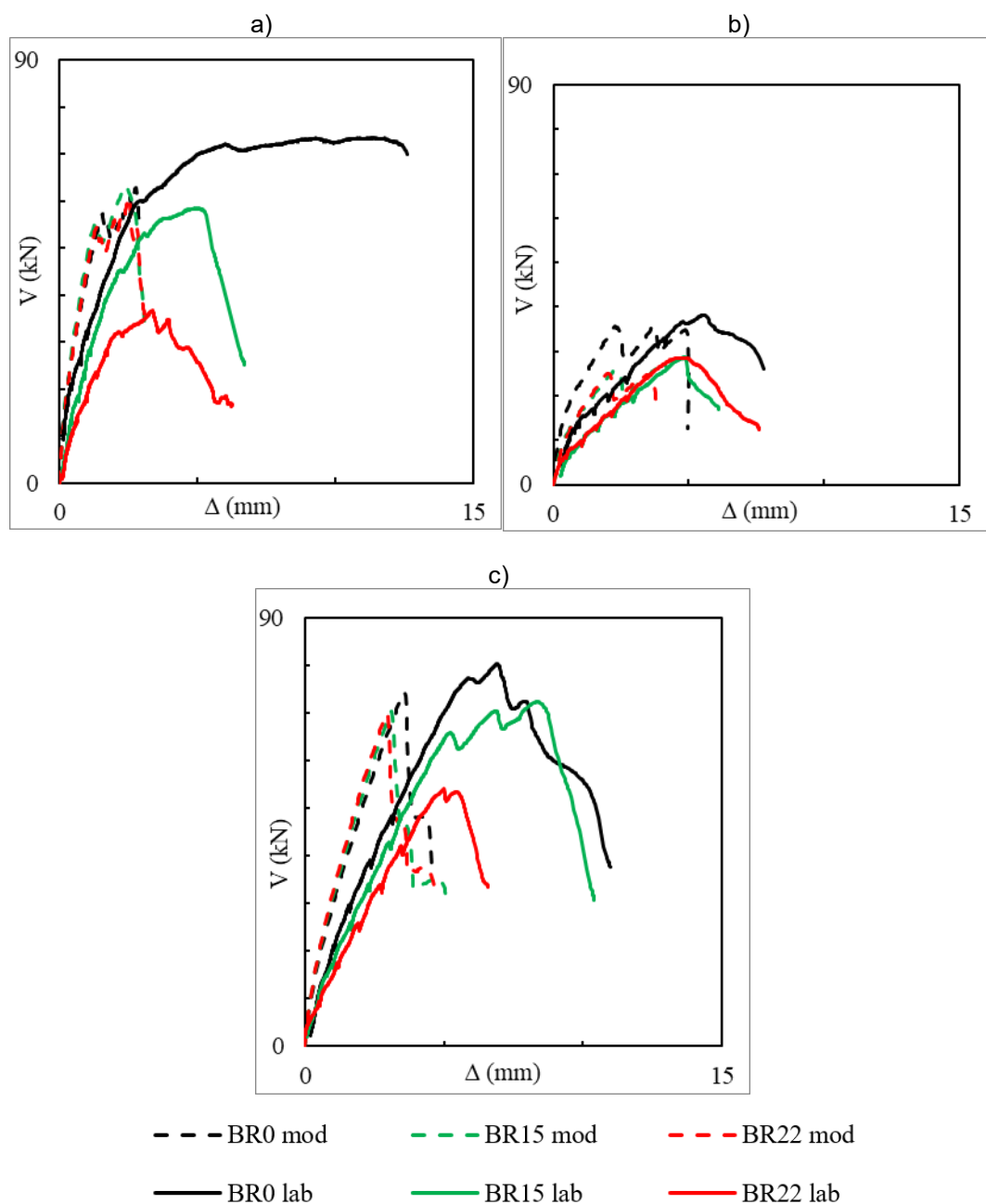


Figure 41 –Comportement effort tranchant–déplacement vertical des modèles numériques (mod) et des essais en laboratoire (lab) pour les géométries de poutres a) B2.6, b) 3.2 et c) B3.5

Le Tableau 22 présente le comparatif entre la résistance à l'effort tranchant, V_u , déterminée de la modélisation numérique et des essais en laboratoire, ainsi que les déplacements verticaux correspondants, Δ_u . Pour la comparaison des résultats, le ratio entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques a été calculé. Un ratio près de 1 signifie que le modèle prédit bien le

comportement réel. Un ratio supérieur à 1 signifie que les valeurs expérimentales sont plus élevées que les valeurs prédites par le modèle, alors qu'un ratio inférieur à 1 signifie que les valeurs expérimentales sont inférieures aux valeurs prédites par le modèle.

Tableau 22 - Comparatif des résultats des modèles numériques et des essais pour les poutres

Poutre	Effort tranchant V_u			Déplacement Δ_u		
	Laboratoire (kN)	Modèle (kN)	Laboratoire / Modèle	Laboratoire (kN)	Modèle (kN)	Laboratoire / Modèle
B2.6-BR0	73,5	62,9	1,17	9,7	2,5	3,92
B2.6-BR15	58,5	62,7	0,93	5,2	2,4	2,15
B2.6-BR22	36,7	60,8	0,60	3,5	2,5	1,86
B3.2-BR0	38,1	35,6	1,07	5,7	2,3	2,49
B3.2-BR15	28,7	27,0	1,06	5,0	2,1	2,33
B3.2-BR22	28,6	25,0	1,14	4,7	2,0	2,34
B3.5-BR0	80,3	74,4	1,08	7,6	3,1	2,49
B3.5-BR15	72,4	70,5	1,03	9,0	3,1	2,88
B3.5-BR22	54,1	69,9	0,77	5,5	3,0	1,86
Moyenne			0,98	Moyenne		2,43
COV			17,8%	COV		29,0%

Les résultats montrent que les modèles numériques prédisent bien la résistance V_u pour les poutres avec les mélanges BR0 et BR15, et ce, pour les différentes géométries de poutres (ratio laboratoire/modèle de 0,98, coefficient de variation COV de 18,9%). Cependant, pour les poutres du mélange BR22, un écart plus important est observé (ratio laboratoire sur modèle entre 0,60 et 1,14). Ainsi, pour ce type de mélange, les modèles numériques prédisent moins bien la résistance des poutres. La comparaison des déplacements à la rupture (Figure 19) et de la rigidité (Figure 41) montre que les modèles numériques n'ont pas reproduit les déplacements qui ont été obtenus en laboratoire. En effet, un ratio moyen de 2,43 a été obtenu pour les déplacements Δ_u (COV de 28,5%), ce qui signifie que les modèles numériques sous-estiment significativement le déplacement vertical réel des poutres à la rupture.

Cette différence de comportement (rigidité et déplacement) est observée tant pour les poutres faites de béton sans résidu de bauxite (BR0) que les poutres avec un haut taux de résidu de bauxite

(BR22), ce qui suggère que cette différence n'a pas de lien avec la composition des différents mélanges de béton. Cette différence de comportement (rigidité et déplacement) pourrait s'expliquer par la présence de retrait dans le béton des poutres, ce qui n'a pas été représenté dans les modèles numériques. En effet, un retrait excessif engendrerait une fissuration du béton avant les essais, ce qui a pour effet de diminuer la rigidité des poutres et de favoriser une ouverture progressive plus importante des fissures, donc d'accroître de déplacement des poutres à la rupture (Paultre, 2017).

La Figure 42 compare les patrons de fissuration observée lors des essais en laboratoire à ceux obtenus par modélisation numérique pour la moitié critique des poutres B2.6, B3.2 et B3.5. Une similitude est observée entre les schémas de fissuration expérimentaux et numériques. Les modèles reproduisent adéquatement la formation et la propagation des fissures principales dans les poutres, et ce, pour les différentes géométries de poutres et pour les différents mélanges de béton.

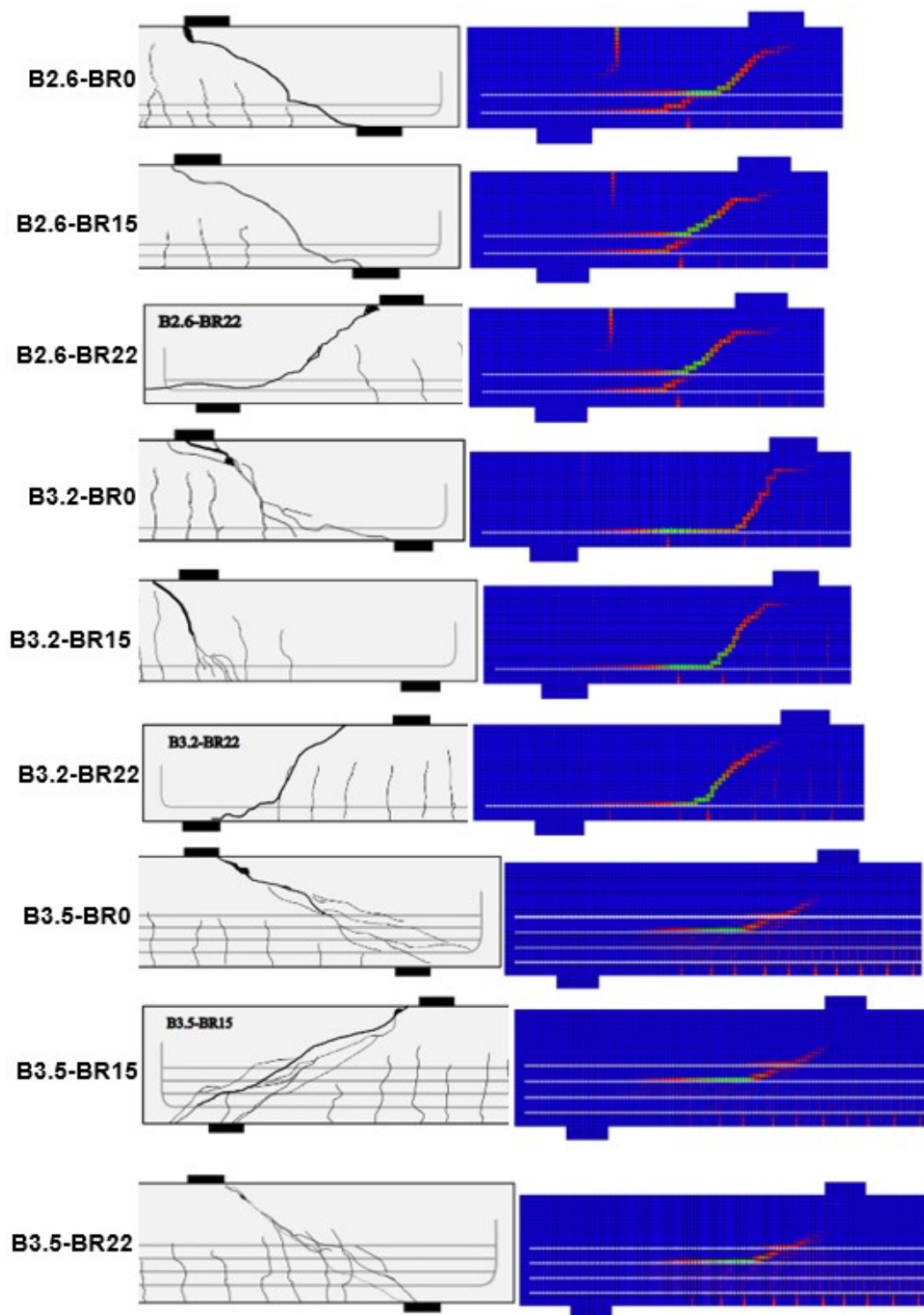


Figure 42 – Comparaison de la fissuration pour les poutres B2.6, B3.2 et B3.5

Afin de confirmer l'hypothèse de la présence de retrait dans le béton des poutres, les poutres de géométrie B3.5 ont été modélisées en imposant au béton une déformation de retrait de 500×10^{-6} (Sirivivatnanon & Baweja, 2002), ce qui correspond à une valeur typique pouvant parfois être rencontré sous certaines conditions défavorables. La Figure 43 compare les courbes effort tranchant–déplacement vertical des modèles numériques avec retrait et des essais en laboratoire, pour les poutres de géométrie B3.5.

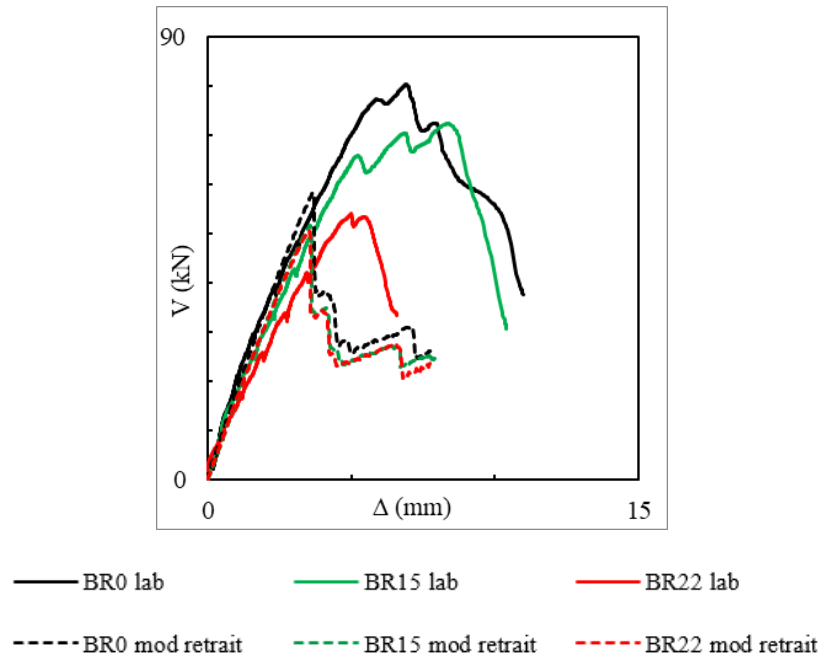


Figure 43 – Comportement effort tranchant–déplacement vertical des modèles des poutres B3.5 avec retrait (mod retrait) et des essais de laboratoire (lab)

En considérant l'effet du retrait au modèle des poutres, une rigidité semblable à ce qui a été obtenu en laboratoire est atteinte, ce qui suggère que les poutres testées en laboratoire auraient subi du retrait avant les essais. De plus, avant les essais sur les poutres, de petites fissures avaient été constatées, ce qui consoliderait l'hypothèse.

La comparaison entre les modèles numériques et les résultats expérimentaux des poutres testées en laboratoire démontre que l'incorporation RB dans les mélanges de béton a eu peu d'influence sur les résultats obtenus avec VecTor2. Les comportements simulés des poutres reproduisent adéquatement ceux observés expérimentalement, tant en termes de résistance et de

fissuration. Les divergences observées dans le déplacement vertical des poutres à la rupture pourraient s'expliquer par un paramétrage manquant dans les modèles.

5.6 RÉSULTATS POUR LES TUYAUX

Les différents résultats des modèles numériques pour les tuyaux ont été comparés aux résultats obtenus en laboratoire. La Figure 44 présente le comportement charge-déplacement vertical obtenu expérimentalement et numériquement pour les sections de tuyaux, tandis que la Figure 45 présente le comportement charges-déplacement horizontal. Sur ces figures, la courbe en bleu présente les prédictions numériques, alors que les courbes en noir, rouge et vert correspondent aux trois sections des tuyaux testés en laboratoire. La comparaison entre le comportement expérimental des sections de tuyaux et celui prédit par modélisation numérique montre une réponse similaire jusqu'à l'apparition de la première fissure (cercles orange). Après ce premier pic de charge correspondant à l'apparition de la fissuration, le modèle prédit une reprise des efforts apportée par la présence de la cage d'armature circonférentielle jusqu'à l'atteinte d'un nouveau pic de charge, correspondant à la charge maximale reprise par les sections de tuyaux et donc leur résistance prédite numériquement. Ce comportement est très similaire à celui observé en laboratoire pour les sections de tuyaux constitués de béton de résidu de bauxite (RC15, RC30 et RC40), mais diffère de celui observé pour les sections de tuyaux faits du béton de référence sans résidu de bauxite (RC0), en raison de l'absence de ce gain de charge après l'apparition de la 1^{re} fissuration. De façon générale pour toutes les sections de tuyaux et tous les types de béton employé (avec et sans résidu de bauxite), la résistance prédite par les modèles numériques est plus élevée que celle obtenue en laboratoire.

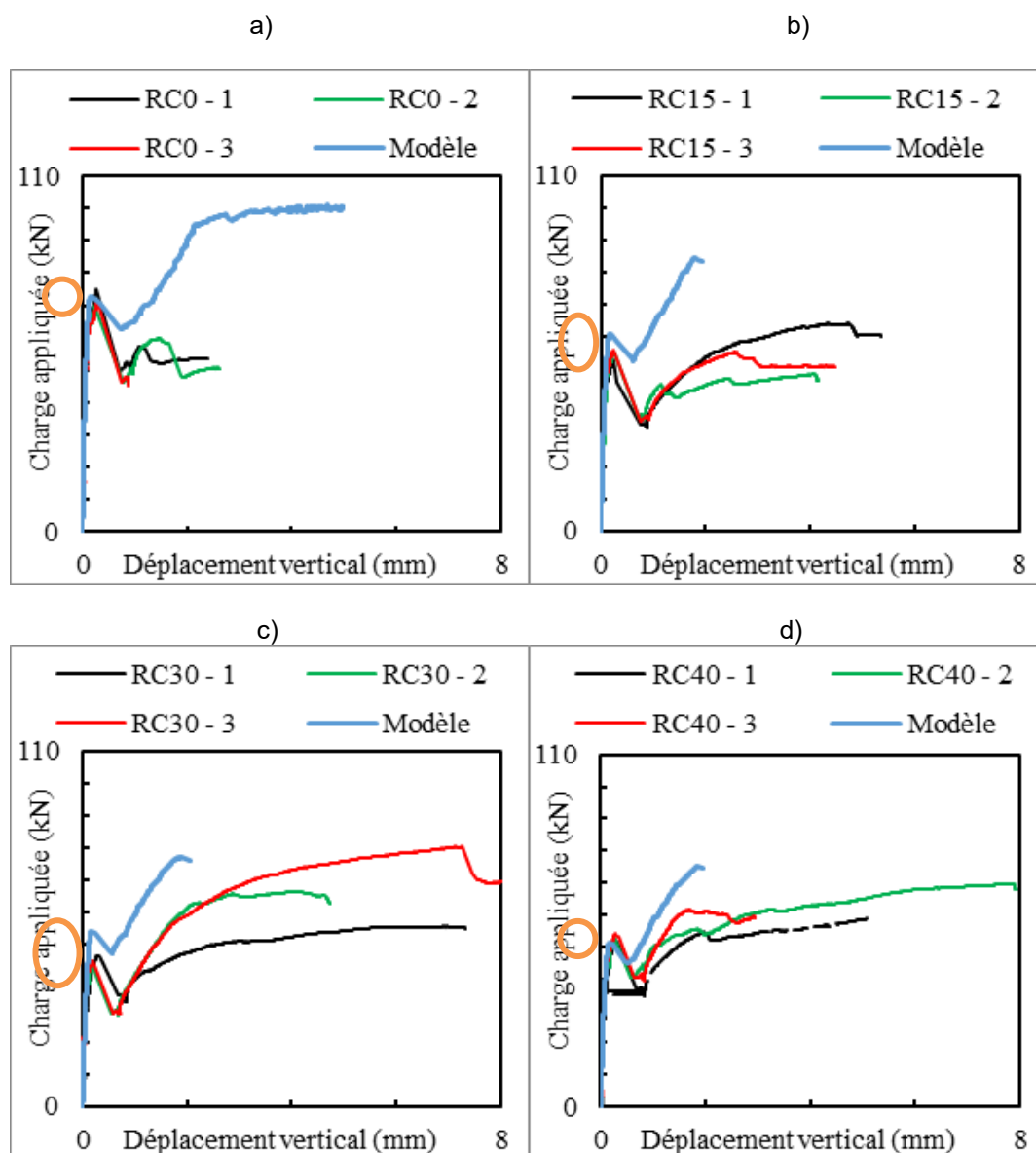


Figure 44 – Comportement charge-déplacement vertical des sections des tuyaux prédits numériquement et obtenu des essais de laboratoire pour les différents mélanges de béton a) RC0, b) RC15, c) RC30, d) RC40

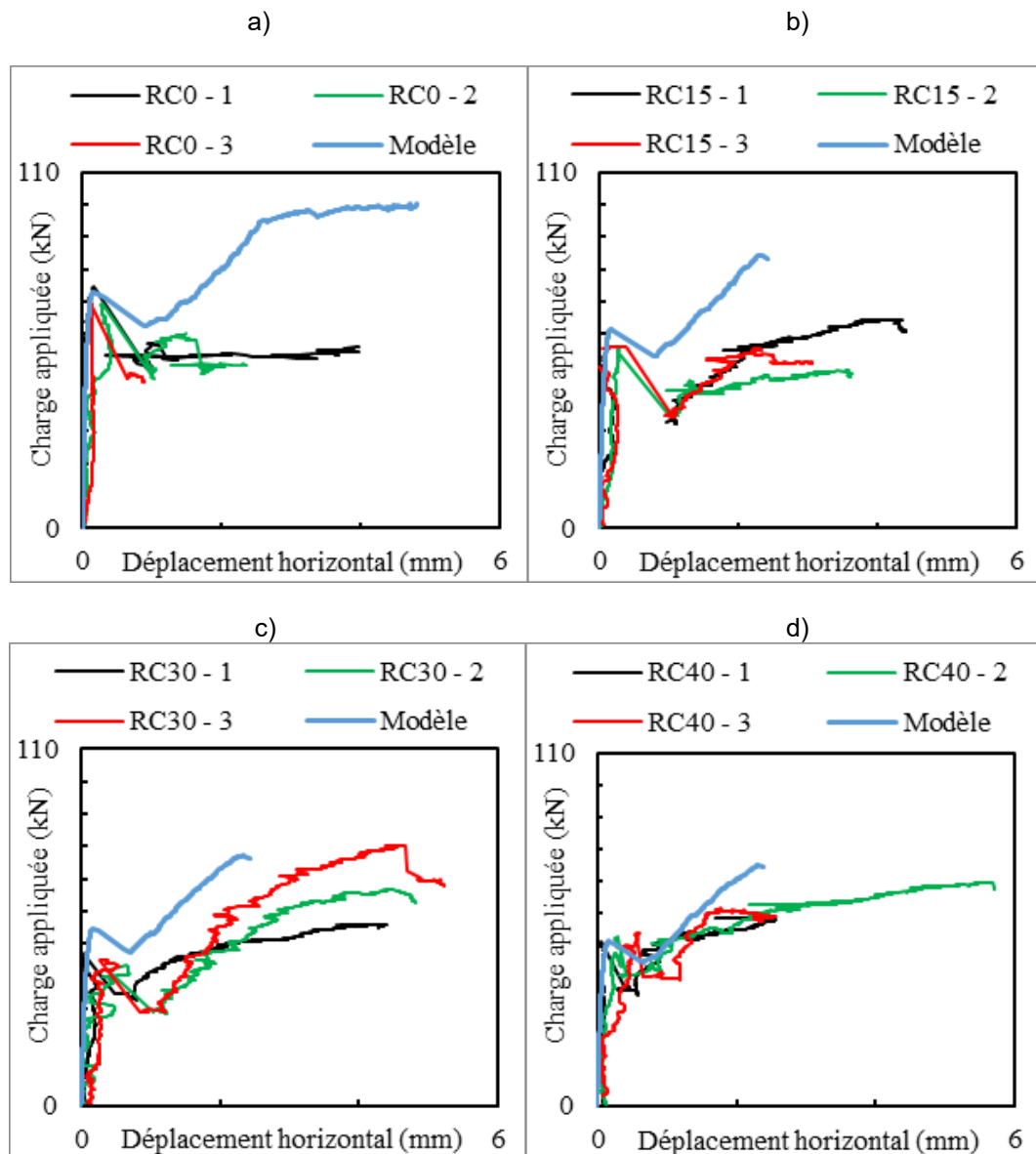


Figure 45 – Comportement charge-déplacement horizontal des sections des tuyaux prédits numériquement et obtenu des essais de laboratoire pour les différents mélanges de béton a) RC0, b) RC15, c) RC30, d) RC40

Pour les modèles des sections des tuyaux, l'armature circonférentielle a été placée à un recouvrement de 23 mm de la paroi intérieure du tuyau. Cette valeur correspond à la moyenne des recouvrements pour les tuyaux testés en laboratoire. Pour une barre au sommet du tuyau, cela se rapporte à une hauteur effective de la section, d , de 42 mm alors que pour une barre positionnée sur le flanc droit du tuyau, cela correspond à un d de 23 mm tel que présenté à la Figure 46. Lors des

essais sur les sections de tuyaux, il a été observé que sur les sections des tuyaux coupées, le recouvrement de l'armature n'était pas constant et il variait d'un endroit à l'autre et d'un tuyau à l'autre. Ainsi, il a été décidé de faire un calcul afin de connaître la profondeur efficace, d , de l'armature pour les résistances de tuyaux obtenues.

Le Tableau 23 présente la profondeur efficace, d , calculé pour la résistance maximale des tuyaux testés en laboratoire. Ces résultats confirment les observations faites lors des essais sur les tuyaux, c'est-à-dire que l'armature n'est pas placée de manière parfaitement symétrique pour les tuyaux testés. Comme mentionné, pour les modèles, l'armature a été placée à la valeur de recouvrement moyen mesurée, soit à un recouvrement de 23 mm de la paroi intérieure du tuyau. Cette différence de positionnement de l'armature dans les modèles versus les tuyaux testés en laboratoire pourrait expliquer une partie des divergences entre les modèles numériques et les tuyaux testés en laboratoire.

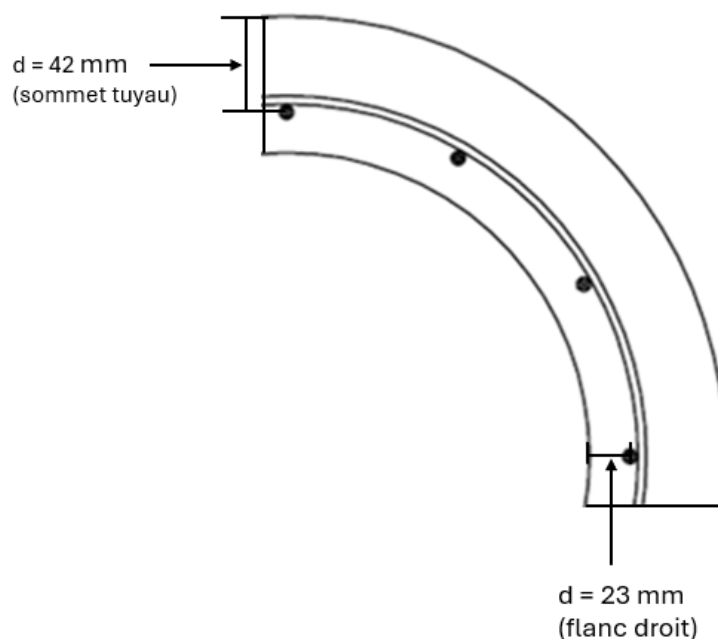


Figure 46 – Profondeur efficace, d , de l'armature pour le sommet et le flanc droit du tuyau

Tableau 23 – Profondeur efficace, d , calculé pour la résistance maximale des tuyaux testés en laboratoire

Tuyau	d pour le sommet du tuyau (mm)	d pour le flanc droit du tuyau (mm)
RC0	51,2	14,4
RC15	41,5	13,3
RC30	47,9	14,0
RC40	43,9	13,5

Le Tableau 24 présente la comparaison entre la résistance lors de l'apparition de la première fissure (V_{fissure}) obtenue par la modélisation et celle mesurée en laboratoire pour les sections de tuyaux ainsi que les déplacements verticaux ($\Delta_{V,\text{fissure}}$) et horizontaux ($\Delta_{H,\text{fissure}}$) correspondant à cette résistance. Pour la comparaison des résultats, un ratio valeurs expérimentales sur valeurs numériques a été calculé. Un ratio près de 1 signifie que le modèle prédit bien le comportement réel. Un ratio supérieur à 1 signifie que les valeurs obtenues en laboratoire sont supérieures à celles des modèles, alors qu'un ratio inférieur à 1 signifie que les valeurs obtenues pour les modèles sont plus élevées que celles obtenues en laboratoire. Les résultats montrent que les modèles numériques prédisent bien la résistance lors de l'apparition de la première fissure dans les sections de tuyaux pour tous les mélanges de béton. Un ratio moyen de 0,93 est obtenu ce qui signifie que, de façon générale, les modèles numériques surestiment légèrement l'effort conduisant la première fissure des sections des tuyaux. La comparaison des déplacements lors de l'apparition de la première fissuration montre que les modèles numériques sous-estiment le déplacement vertical et horizontal. Un ratio moyen de 1,37 et de 1,43 sont obtenus respectivement.

Tableau 24 – Comparatif des résultats des modèles numériques et des essais pour les tuyaux

Tuyau	Résistance $V_{fissure}$			Déplacement vertical $\Delta V_{fissure}$			Déplacement vertical $\Delta H_{fissure}$		
	Lab (kN)	Modèle (kN)	Lab / Modèle	Lab (kN)	Modèle (kN)	Lab / Modèle	Lab (kN)	Modèle (kN)	Lab / Modèle
RC0	70,1	72,8	0,96	0,22	0,17	1,28	0,18	0,20	1,07
RC15	54,8	61,2	0,89	0,24	0,18	1,36	0,19	0,16	0,9
RC30	45,0	54,4	0,83	0,22	0,18	1,23	0,19	0,35	2,03
RC40	52,7	51,2	1,03	0,29	0,18	1,60	0,19	0,31	1,70
Moyenne			0,93	Moyenne		1,37	Moyenne		1,43
COV			9,3%	COV		12,1%	COV		37,1%

La Figure 47 présente la prédiction numérique de la fissuration à la rupture des sections des tuyaux. Sur les figures, le bleu indique le béton intact sans fissure, tandis que le rouge et le vert représentent les fissures. La couleur verte localise la zone où l'ouverture de la fissure est maximale. Tel qu'observables, tous les modèles présentent une fissuration caractéristique d'un comportement en flexion, soit une fissuration radiale (du côté du flanc) et une fissure verticale qui traverse en partie la section de béton en ligne droite. Cette observation est cohérente avec la plastification de l'armature dans chacune des sections de tuyaux modélisées (non présenté à la figure). Pour les tuyaux testés en laboratoire, ce sont davantage des fissurations en cisaillement qui avaient été observées (Figure 30 à Figure 33). Ce type de fissuration se caractérise par des fissures inclinées qui partent des zones d'appuis ou de chargement et qui se propagent vers le flanc du tuyau.

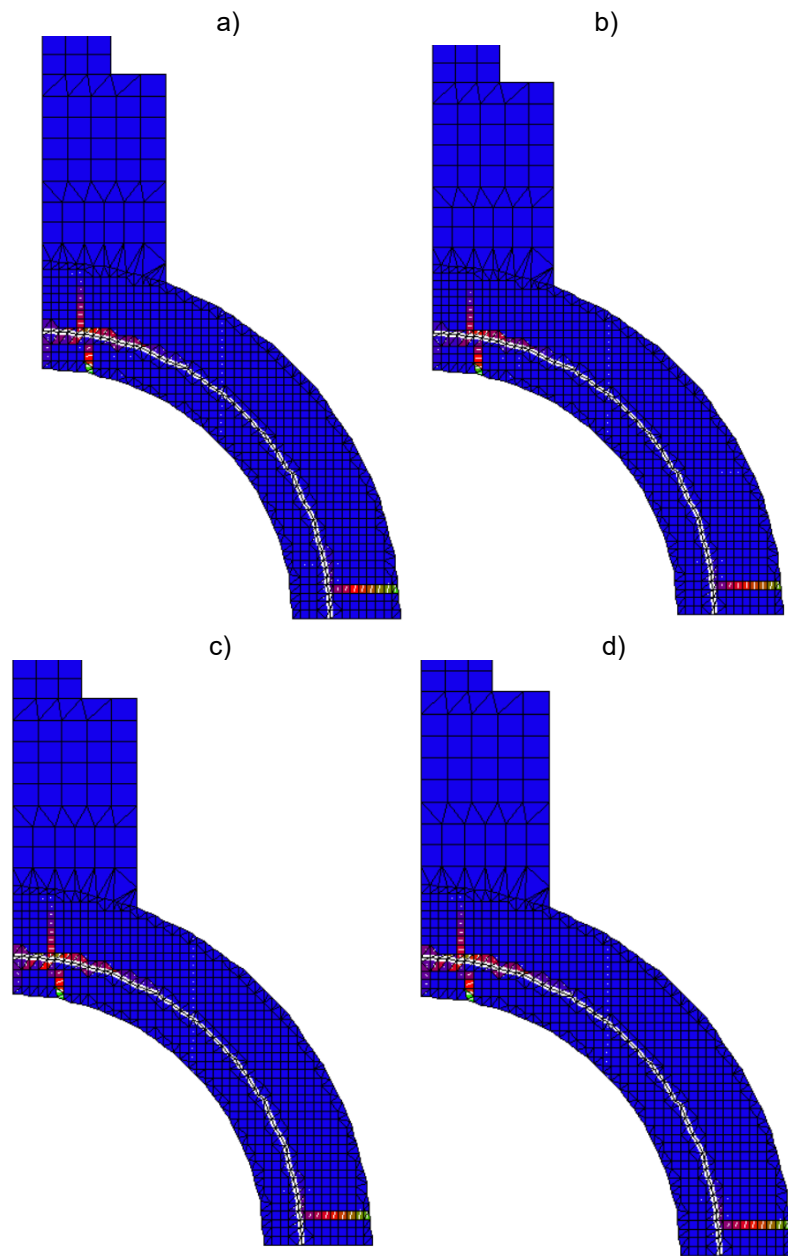


Figure 47 – Fissuration à la rupture des sections des tuyaux prédite numériquement, a) RC0, b) RC15, c) RC30 et d) RC40

La comparaison entre les modèles numériques et les résultats expérimentaux des sections de tuyaux testés en laboratoire démontrent que l'incorporation RB dans les mélanges de béton a peu d'influence sur les résultats obtenus avec VecTor2. Le modèle numérique permet de reproduire adéquatement le comportement observé expérimentalement, tant en termes de résistance et de déformation jusqu'à l'apparition de la première fissure.

5.7 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était, en complément aux essais menés et présentés aux chapitres 3 et 4, d'évaluer dans quelle mesure la modélisation numérique du logiciel VecTor2 conçus pour des éléments en béton de ciment portland demeure applicable aux éléments où une partie du ciment est substituée par des RB. Pour ce faire, les poutres et les tuyaux testés ont été modélisés dans le logiciel de modélisation par éléments finis VecTor2.

La comparaison des prédictions numériques aux résultats obtenus en laboratoire, pour les spécimens testés, montre que l'outil VecTor2 demeure très bien adapté malgré l'incorporation de RB dans les mélanges de béton. En effet, les résultats démontrent que l'incorporation RB dans les mélanges de béton a peu d'influence sur les résultats obtenus avec VecTor2. Le modèle numérique permet de reproduire adéquatement le comportement observé expérimentalement, tant en termes de résistance et de déformation jusqu'à l'apparition de la première fissure. Les différences observées, notamment entre les déplacements à la rupture pour les poutres et ceux apparaissant après la fissuration pour les tuyaux, proviennent principalement des incertitudes liées à certains paramètres utilisés dans les configurations numériques des modèles puisqu'un modèle constitue toujours une représentation simplifiée d'une réalité complexe et imparfaite. L'ensemble des résultats confirme que VecTor2 constitue un outil fiable pour analyser le comportement structural d'éléments en béton contenant du RB.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

RAPPEL DES OBJECTIFS

Ce projet de recherche avait comme objectif principal de développer un béton à base de résidu de bauxite filtré-pressé (RB FP) produit au Saguenay–Lac-Saint-Jean comme ajout cimentaire, pour une utilisation structurale et pour la fabrication de tuyaux de béton destiné aux infrastructures urbaines.

SYNTHÈSE

Des mélanges de béton intégrant des résidus de bauxite (RB) en substitution partielle du ciment ont été développés, optimisés et caractérisés. Le ciment portland d'un mélange de béton de référence a été remplacé par des taux variant de 0 % (mélange de référence) à 25 % de résidus de bauxite et la résistance à la compression a été mesurée après 7, 28 et 790 jours. Les résultats montrent qu'une augmentation de la teneur en RB entraîne une diminution de la résistance à la compression du béton, et ce, autant pour les résistances à court terme qu'à long terme. Une fois les mélanges caractérisés, des poutres en béton armées contenant des RB ont été fabriquées et testées. Trois séries de trois poutres en béton armé, fabriquées à partir des mélanges sélectionnés (un de référence et deux contenant des RB soit 15% et 22% de RB), ont été testées sous un chargement à quatre points. Chaque série de poutres a un ratio a/d différent, soit 2,6, 3,2 et 3,5. Les résultats obtenus pour les poutres ont permis de démontrer que l'ajout de RB réduit la capacité de charge des poutres qui sont critiques en cisaillement. Les poutres contenant du RB, critiques en cisaillement, ont présenté une résistance au cisaillement inférieure à celle des poutres sans RB. Ainsi, pour le béton avec RB, l'augmentation de la proportion de ciment remplacé par les RB entraîne une réduction de la résistance à la compression, ce qui diminue la résistance en cisaillement des poutres. La résistance expérimentale des poutres en béton armé a été comparée aux valeurs nominales prédites selon les normes CSA A23.3 (2024), fib Model Code 2010 (fib, 2013) et ACI-318-19 (2019). Les résultats indiquent que ces différentes méthodes de calcul permettent d'estimer de manière fiable la capacité des poutres en béton armé incorporant des RB. Les écarts observés entre les poutres

testées et les normes sont principalement liés aux modèles de calcul eux-mêmes plutôt qu'à l'effet de la présence de RB dans le béton.

Sur la base des performances observées lors des essais sur poutre, sept mélanges de béton sans affaissement, incorporant des RB, ont été développés pour la fabrication de tuyaux en béton armé. Pour les mélanges sans affaissement développés, 5 à 40 % du ciment portland a été remplacé par du RB. Les résultats obtenus sur les cylindres montrent qu'un remplacement allant jusqu'à 15 % de RB n'affecte pas significativement la résistance à la compression ni le module d'élasticité du béton. Au-delà de ce remplacement, une baisse de la résistance à la compression est graduellement observée lorsque le taux de remplacement augmente. Pour un taux de 40% de remplacement, la perte de résistance à la compression du béton atteint 50%. À la suite des résultats obtenus sur les propriétés mécaniques du béton, trois mélanges contenant du RB (15, 30 et 40%) et un mélange de référence, sans RB, ont été sélectionnés et utilisés pour produire et tester des tuyaux en béton armé par un essai d'écrasement latéral. Les tuyaux ont été produits en industrie et ils ont été testés en laboratoire et en industrie avec l'essai par écrasement latéral. Pour chaque mélange de béton, un tuyau a été testé en industrie et un tuyau coupé en trois sections de 650 mm a été testé en laboratoire. Les résistances des sections de tuyaux avec RB sont moins élevées que les résistances des sections de tuyaux de références. Également, les tuyaux avec 15, 30 et 40% de RB ont montré des résistances comparables. Pour les tuyaux avec RB, des agglomérations de RB ont été observées sur les tuyaux et sur les cylindres préparés lors de la fabrication des tuyaux. Ces agglomérations de RB peuvent affaiblir localement la matrice cimentaire et réduire la résistance à la compression globale du béton. Ainsi, les résultats obtenus suggèrent qu'étant donné que les tuyaux avec RB testés présentaient des agglomérations, l'effet du taux de substitution est significativement moins important que l'effet de la présence de ces agglomérations dans le béton. Une mauvaise méthode de malaxage et d'incorporation du RB dans le mélange de béton peut faire en sorte que des agglomérations de RB demeurent dans le mélange. Malgré tout, tous les tuyaux ont une résistance à la fissuration et à l'ultime supérieure à ce qui est requis pour un tuyau de classe 5 de la norme BNQ 2622-126 (2023).

Finalement, les poutres et les tuyaux ont été modélisés par éléments finis avec le logiciel VecTor2 afin d'évaluer dans quelle mesure la modélisation numérique du logiciel VecTor2 conçus pour des éléments en béton de ciment portland demeure applicable aux éléments où une partie du ciment est substituée par des RB. Ainsi, les résultats expérimentaux ont été comparés aux modèles numériques réalisés avec VecTor2. Pour les poutres, il a été observé que l'allure des courbes est semblable pour les modèles numériques et pour les essais en laboratoire. Les résultats montrent que les modèles numériques prédisent bien la résistance V_u pour les poutres avec les mélanges avec 0 et 15% de RB, et ce, pour les différentes géométries de poutres. Cependant, pour les poutres du mélange avec 22% de RB, un écart plus important est observé. Ainsi, pour ce type de mélange, les modèles numériques prédisent moins bien la résistance des poutres. Également, la comparaison des déplacements à la rupture et la comparaison de la rigidité montrent que les modèles numériques n'ont pas reproduit les déplacements qui ont été obtenus en laboratoire. Cette différence de comportement (rigidité et déplacement) est observée tant pour les poutres faites de béton sans résidu de bauxite que les poutres avec un haut taux de résidu de bauxite (22%), ce qui suggère que cette différence n'est pas de lien avec la composition des différents mélanges de béton. Cette différence de comportement (rigidité et déplacement) pourrait s'expliquer par la présence de retrait dans le béton des poutres, qui n'a pas été représenté dans les modèles numériques. Pour les tuyaux, la comparaison entre le comportement expérimental des sections de tuyaux et celui prédit par modélisation numérique montre une réponse similaire jusqu'à l'apparition de la première fissure. De façon générale pour toutes les sections de tuyaux et tous les types de béton employé (avec et sans résidu de bauxite), la résistance prédite par les modèles numériques est plus élevée que celle obtenue en laboratoire. Les divergences observées, entre les modèles et les tuyaux testés, sont principalement causées par une représentation imparfaite de la position de l'armature dans les modèles plutôt que par l'incorporation de RB dans le béton. En bref, pour les modèles des poutres et des tuyaux, les différences observées, proviennent principalement des incertitudes liées à certains paramètres utilisés dans les configurations numériques des modèles puisqu'un modèle constitue toujours une représentation simplifiée d'une réalité complexe et imparfaite. Malgré quelques

divergences, VecTor2 constitue un outil fiable pour analyser le comportement structural d'éléments en béton contenant du RB.

TRAVAUX FUTURS

D'autres recherches sont nécessaires pour que le béton avec résidus de bauxite soit utilisé à grande échelle. Sur le plan scientifique, des recherches complémentaires sont requises afin de mieux caractériser les mécanismes d'interaction entre les RB et la matrice cimentaire hydratée et aussi pour connaître la réaction pouzzolanique du RB produit au Saguenay–Lac-Saint-Jean. Il sera aussi intéressant d'évaluer l'effet de la variabilité des RB en fonction de leur provenance industrielle, de leur traitement préalable et de leurs caractéristiques chimiques dans la reproductibilité des performances du béton avec RB. Également, des essais devront être faits pour en savoir davantage sur les propriétés à long terme du béton comme la résistance mécanique qui devra être retestée pour valider les résultats obtenus dans les présents travaux. Il sera aussi intéressant d'évaluer la durabilité à long terme du béton avec RB, notamment en ce qui concerne les réactions alcali-granulat, la résistance aux attaques aux sulfates et la diffusion des chlorures.

Sur le plan de l'ingénierie, il serait pertinent que d'autres essais sur des poutres soient réalisés afin d'augmenter la littérature dans ce domaine. De nouveaux essais permettraient d'augmenter la base de données disponible, de mieux caractériser le comportement en flexion et en cisaillement et de mieux évaluer la variabilité des performances en fonction du taux de substitution et des propriétés mécaniques du béton. Également, il pourrait être intéressant d'étudier le comportement en fatigue à long terme pour le béton avec RB. Il serait aussi pertinent d'étudier la performance en condition réelle de service avec différents cycles de chargement et un environnement représentatif des conditions d'utilisation prévues.

Sur le plan environnemental, l'évaluation du potentiel de lixiviation et de la stabilité chimique à long terme sera nécessaire afin de garantir la conformité aux exigences environnementales. De plus,

il serait intéressant de quantifier précisément la réduction des émissions de gaz à effet de serre selon différents taux de substitution.

Pour conclure, ce projet se distingue par son caractère innovant et par son apport scientifique significatif, tout en offrant un fort potentiel industriel grâce à la valorisation des résidus de bauxite dans la production de béton pour les tuyaux d'infrastructures urbaines.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Abbas, S., Faisal, A., Khan, M. A., Nehdi, M. L., Hameed, R., & Shaukat, S. (2025). Systematic state-of-the-art review on precast concrete pipes. *Results in Engineering*, 25, 103826. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103826>
- ACI-318-19. (2019). *ACI Manual of concrete practice, part 3 ACI318-08 to ACI 347.2R-05*. American Concrete Institute.
- Al-Jabali, H. M., El-Latief, A., Ezz, M. S., Khairy, S., & Nada, A. A. (2024). GGBFS and Red-Mud based Alkali-Activated Concrete Beams: Flexural, Shear and Pull-Out Test Behavior. *Civil Engineering Journal*, 10. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-05-09>
- Aladdine, F., Laldji, S., & Tagnit-Hamou, A. (2009). *Glass powder as an alternative cementitious material in concrete*. 10th ACI Int. Conf. Recent Advances in Concrete Tech. and Sustainability Issues, Seville, Espagne.
- Ashley, E., & Lemay, L. (2008). Concrete's Contribution to Sustainable Development. *Journal of Green Building*, 3, 37-49. <https://doi.org/10.3992/JGB.3.4.37>
- ASTM A1064. (2024). Standard Specification for Carbon-Steel Wire and Welded Wire Reinforcement, Plain and Deformed, for Concrete (A1064). Edition. American Society for Testing and Materials. Number of 10 p.
- ASTM C76. (2025). Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe (C76). Edition. American Society for Testing and Materials. Number of p.
- ASTM C469. (2022). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (C469). Edition. American Society for Testing and Materials. Number of 6 p.
- Bentur, A., & Goldman, A. (1989). Curing effects, strength and physical properties of high strength silica fume concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(1), 46-58. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1989\)1:1\(46\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1989)1:1(46))
- Berryman, C., Zhu, J., Jensen, W., & Tadros, M. (2005). High-percentage replacement of cement with fly ash for reinforced concrete pipe. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1088-1091.
- Bin, W., & Zhuoying, T. (2020). Influence of Red Mud Proportion on Circular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns. *Advanced Materials, Technologies and Testing for Structural Performance Improvement 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/8578059>
- Bingöl, A. F., & Tohumcu, İ. (2013). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 51, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.106>
- BNQ 2622-126. (2023). *Tuyaux, branchements latéraux monolithiques et pièces connexes en béton destinés à l'évacuation des eaux d'égout sanitaire et pluvial*. Bureau de normalisation du Québec.
- Brahmi, Y. (2023). Développement d'un type de comportement du béton en fonction de la teneur en résidus de bauxite sous contrainte de compression uni-axiale. (Publication no. Université du Québec à Chicoutimi. 156 p.

- Bresler, B., & MacGregor, J. G. (1967). Review of concrete beams failing in shear. *Journal of the Structural Division*, 93(1), 343-372. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001586>
- Brough, D., & Jouhara, H. (2020). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1, 39. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
- Cavagnis, F., Ruiz, M. F., & Muttoni, A. (2015). Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. *Engineering structures*, 103, 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.015>
- ChemEurope. (2026). *Young's modulus*. Repéré le 20 février 2026 à https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Young%27s_modulus.html
- Collins, M. P., Bentz, E. C., & Sherwood, E. G. (2008). Where is shear reinforcement required? Review of research results and design procedures. *Structural Journal*, 105(5), 590-600.
- Conduites et produits béton. (2021). *Tuyaux en béton armé à compression radiale*. Repéré le 2025-04-17 à <https://cepb.ma/tuyaux-en-beton-arme-a-compression-radiale/>
- CSA A23.1/A23.2. (2024). *Béton : constituants et exécution des travaux/Procédures d'essai et pratiques normalisés pour le béton* (CSA A23.1/A23.2:24). Association canadienne de normalisation.
- CSA A23.3. (2024). *Calcul des ouvrages en béton*. Association canadienne de normalisation.
- CSA A257. (2024). *Standards for concrete pipe and manhole* (CSA A257:24). Association canadienne de normalisation.
- CSA A3001-03. (2023). *Cementitious Materials for Use in Concrete*. Edition. Toronto. Number of 336 p.
- CSA G30.18. (2021). *Barres d'acier au carbone pour l'armature du béton* (CSA G30.18:21). Association canadienne de normalisation.
- CSA O86. (2024). *Règles de calcul des charpentes en bois* (CSA O86:24). Association canadienne de normalisation.
- Dangol, S. (2023). *Development of Geopolymer Concrete for Precast Pipe Application* (Publication no. University of Technology Sydney. 288 p.
- Davies, J., Clarke, B., Whiter, J., & Cunningham, R. (2001). Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban water*, 3(1-2), 73-89.
- Dils, J., De Schutter, G., & Boel, V. (2012). Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. *Materials and structures*, 45, 1673-1683.
- Dodoo-Arhin, D., Nuamah, R. A., Agyei-Tuffour, B., Obada, D. O., & Yaya, A. (2017). Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications. *Case studies in construction materials*, 7, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.003>
- Durastanti, C., & Moretti, L. (2020). Environmental impacts of cement production: A statistical analysis. *Applied Sciences*, 10(22), 25. <https://doi.org/10.3390/app10228212>

- Elehinafe, F. B., Ezekiel, S. N., Okedere, O. B., & Odunlami, O. O. (2022). Cement industry–Associated emissions, environmental issues and measures for the control of the emissions. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 2(1), 17-25. <https://doi.org/10.31603/mesi.5622>
- Ferraris, C. F. (2001). Concrete mixing methods and concrete mixers: state of the art. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 106(2), 391. <https://doi.org/10.6028/jres.106.016>
- fib. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. International Federation for Structural Concrete (fib),.
- Fiset, M. (2019). Étude du comportement des éléments en béton armé post-renforcés à l'effort tranchant (Publication no. Université Laval. 433 p.
- Garneau, E., Fiset, M., Darveau, J. B., & Simard, G. (2026). Flexural and shear behavior of reinforced concrete beams incorporating bauxite residue. *Materials and Structures*, 59(4), 191. <https://doi.org/10.1617/s11527-026-03092-7>
- Haktanir, T., Ari, K., Altun, F., & Karahan, O. (2007). A comparative experimental investigation of concrete, reinforced-concrete and steel-fibre concrete pipes under three-edge-bearing test. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1702-1708.
- Halstead, W. J. (1986). Use of fly ash in concrete. *NCHRP synthesis of highway practice*, (127).
- Hou, D., & Wu, D. (2021). Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC): Design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103862>
- International Aluminium Institute. (2020). Opportunities for use of bauxite residue in special cements. *World Aluminium*, 50 p. <https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-use-of-bauxite-residue-supplementary-cementitious/>
- Jahami, A., Younes, H., & Khatib, J. (2023). Enhancing reinforced concrete beams: investigating steel dust as a cement substitute. *Infrastructures*, 8(11), 157. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8110157>
- Kani, G. N. (1979). *On shear in reinforced concrete*. Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Hooton, R. D., & McGrath, R. J. (2011). *Dosage et contrôle des mélanges de béton : manuel d'applications, méthodes et matériaux* (8e éd. canadienne). Association canadienne du ciment.
- Lima, M. S. S., Thives, L-P. (2017). Red mud application in construction industry: review of benefits and possibilities. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012033>
- Liu, X., & Zhang, N. (2011). Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue — Red mud. *Cement and Concrete Research*, 41, 847-853. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.004>
- Mansur, M., Ong, K., & Paramasivam, P. (1986). Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups. *Journal of structural engineering*, 112(9), 2066-2079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:9\(2066\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:9(2066))

- Megacon Precast Concrete. (2020). *Perbedaan Reinforced Concrete dan Non Reinforced Concrete*. Repéré le 2024-06-12 à <https://megaconbeton.com/blog/perbedaan-reinforced-concrete-dan-non-reinforced-concrete>
- Metilda, D. L., & Selvamony, C. (2015). Investigations on optimum possibility of replacing cement partially by red mud in concrete. *Academic journal*. <https://doi.org/10.5897/SRE2015.6166>
- Mohammed, B. S., Nuruddin, M., Aswin, M., Mahamood, N., & Al-Mattarneh, H. (2016). Structural Behavior of Reinforced Self-Compacted Engineered Cementitious Composite Beams. *Advances in Materials Science and Engineering*, 12. <https://doi.org/10.1155/2016/5615124>
- Naik, T. R. (2008). Sustainability of Concrete Construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13, 98-103. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2008\)13:2\(98\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:2(98))
- Newman, J., Choo, B-S. (2003). *Advanced Concrete Technology - Concrete properties* (Première édition). Elsevier.
- Nikbin, I. M., Aliaghazadeh, M., Sh, C., & Fathollahpour, A. (2018). Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud). *Journal of Cleaner Production*, 172, 2683-2694. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.143>
- Oltulu, M., & Alameri, I. (2019). The mechanical properties of concrete with red mud (bauxite residue) and nano-Al₂O₃ at high temperatures. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(6), 4692-4701.
- Palaniappan, S. M., & Govindasamy, V. (2021). Experimental investigation on flexural performance of functionally graded concrete beams using flyash and red mud. *Revista Materia*, V.26. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1213>
- Patel, A., Patel, V., & Patel, M. (2015). *Review on partial replacement of cement in concrete*. UKIERI concrete congress—concrete research driving profit and sustainability.
- Paultre, P. (2017). *Structures en béton armé : analyse et dimensionnement* (Deuxième édition). Presses internationales Polytechnique.
- Prem, P. R., Bharatkumar, B. H., & Iyer, N. R. (2013). Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. *Sadhana*, 38(6), 1421-1431. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0159-8>
- Price, W. H. (1951). *Factors influencing concrete strength*. Journal Proceedings.
- Qureshi, H. J., & Ahmad, J. (2022). A Study on Sustainable Concrete with Partial Substitution of Cement with Red Mud: A Review. *Materials*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217761>
- Ramadan, A., Younis, A.-A., Wong, L. S., & Nehdi, M. L. (2020). Investigation of structural behavior of precast concrete pipe with single elliptical steel cage reinforcement. *Engineering Structures*, 219, 110881.
- Rathod, R. R., Suryawanshi, N. T., & Memade, P. D. (2013). Evaluation of the properties of red mud concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1, 31-34.
- Rességuier, V. (2024). Les cimenteries confrontées à leur énorme empreinte carbone. *Radio Canada*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2057585/cimenteries-empreinte-carbone-lafarge-quebec>

- Rodríguez-Álvaro, R., Seara-Paz, S., Cantero-Chaparro, B., & González-Fontebo, B. (2025). Effect of fly ash blending in internally cured mortar under air-drying curing conditions. *Construction and Building Materials*, 495, 14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143489>
- Sajedi, F., Razak, H. A., Mahmud, H. B., & Shafigh, P. (2012). Relationships between compressive strength of cement–slag mortars under air and water curing regimes. *Construction and Building Materials*, 31, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.056>
- Savard, V. (2018). Étude de la compaction de la boue rouge sous l'action d'une presse à vis (Publication no. Université du Québec à Chicoutimi. 261 p.
- Shioya, T., Iguro, M., Nojiri, Y., Akiyama, H., & Okada, T. (1990). Shear strength of large reinforced concrete beams. *Special Publication*, 118, 259-280.
- Sirivivatnanon, V., & Baweja, D. (2002). Compliance acceptance of concrete drying shrinkage. *Australian Journal of Structural Engineering*, 3(3), 211-220. <https://doi.org/10.1080/13287982.2002.11464897>
- Statistique Canada. (2020). *Canada's Core Public Infrastructure Survey: Water Infrastructure, 2020*. I. Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220726/dq220726a-eng.htm>
- Tang, W. C., & Wang, Z. (2018). Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 178, 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.171>
- Tang, W. C., & Wang, Z. (2019). Influence of red mud on mechanical and durability performance of self compacting concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120802>
- Tremblay, J. (2021). Décarboner le monde : les défis de l'industrie lourde. *Radio Canada*. <https://ici.radio-canada.ca/recit-numerique/3218/cop26-decarboner-ciment-acier-monde-industrie-lourde>
- Umniati, B. S., & Risdanareni, P. (2017). *Flexural Test of Fly Ash based Geopolimer Concrete Beams*. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences.
- Vecchio, F. J. (2000). Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation. *Journal of structural engineering*, 126(9), 1070-1077.
- Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI J.*, 83(2), 219-231.
- Venkatesh, C., Ruben, N., & Chand, M. S. R. (2020). Red mud as an additive in concrete: comprehensive characterization. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57, 281-289. <https://doi.org/10.1007/s43207-020-00030-3>
- Viyasun, K., Anuradha, R., Thangapandi, K., Santhosh Kumar, D., Sivakrishna, A., & Gobinath, R. (2021). Investigation on performance of red mud based concrete. *Materials Today: Proceedings: Part 1*, 39, 796-799. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.637>
- Wong, P. S., Vecchio, F. J., & Trommels, H. (2013). *VECTOR2 & FORMWORKS User's manual* (Second Edition).
- Yang, K.-H., Chung, H.-S., Lee, E.-T., & Eun, H.-C. (2003). Shear characteristics of high-strength concrete deep beams without shear reinforcements. *Engineering structures*, 25(10), 1343-1352. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00110-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00110-X)

- Younis, A.-A., Shehata, A., Ramadan, A., Wong, L. S., & Nehdi, M. L. (2021). Modeling structural behavior of reinforced-concrete pipe with single, double and triple cage reinforcement. *Engineering Structures*, 240, 112374.
- Zamanian, S. (2016). Probabilistic performance assessment of deteriorating buried concrete sewer pipes (Publication no. The Ohio State University. 108 p.

ANNEXE 1
ARTICLE DE CONFÉRENCE : DEVELOPMENT OF BAUXITE RESIDUE AND CLASS F FLY
ASH BASED GEOPOLYMER CONCRETE

SP-362-044

Development of Bauxite Residue and Class F Fly Ash Based Geopolymer Concrete

Dena Shalaby, Émilie Garneau, Mathieu Fiset, Joao Augusto Lago Araujo Seixas, Ahmed Rahem

Synopsis: The Production of portland cement used in concrete and the large amount of industrial waste generated worldwide represent critical environmental and economic issues. The reuse of bauxite residue generated during alumina production by Bayer's process to replace portland cement and produce sustainable and environmentally friendly geopolymer concrete is a promising solution. This paper presents the development and characterization of bauxite residue and class F fly ash based geopolymer mortar and concrete. The parameters studied for the mixture proportions are the bauxite residue to class F fly ash ratio, the water-to-binder ratio and the curing condition, in terms of duration and temperature. Then, the compressive strength of the geopolymer mortar and concrete are characterized with experimental tests. Results show that, with appropriate mixture proportions and curing condition, a large amount of bauxite residue (up to 70%) can be used to replace fly ash and obtain geopolymer concrete with improved quality characteristics that meet the construction field's sustainable development criteria.

Keywords: Alkali activated materials, Alternative binders, Bauxite Residue, Recycled materials

Dena Shalaby is a civil engineer candidate at Norda Stelo in Sherbrooke, QC, Canada. She received her BEng. and MASc degrees from the Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), QC, Canada, in 2020 and 2023, respectively.

Émilie Garneau is a graduate student in the Department of Applied Sciences at UQAC where she received her BEng. in 2023. She is a student member of the research centre on concrete infrastructures and her research focus on using bauxite residue in structural concrete and for structural applications.

Mathieu Fiset is an Assistant Professor in civil engineering at UQAC and a regular member of the research centre on concrete infrastructures. His research focuses on developing innovative low-carbon and geopolymer concrete, the interaction between concrete, in terms of mixture constituents, properties and pathologies, and the implications for the durability, performance and safety of concrete structures.

Joao Augusto Lago Araujo Seixas is a PhD candidate in the Department of Applied Sciences at Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) and a student member of the research centre on concrete infrastructures (CRIB). He received his MASc. degree from the UQAC in 2021 and his B.Eng. degree from Universidade Federal da Bahia (UFBA) in 2018. His research is in the area of development and characterization of geopolymer concrete.

Ahmed Rahem is Professor/researcher in civil engineering in the Department of Applied Sciences at UQAC. He develops partnership research supported by Rio Tinto, CURAL and REGAL. His research activities in this context is organized around the recovery of residues that are generated during the production of primary aluminum, up to in electrically conductive concretes, geopolymer concretes and bituminous binders.

INTRODUCTION

In the aluminum production process, alumina is extracted from bauxite by the Bayer's process and the resulting bauxite residue must be disposed. It is generally stated that about 1 to 1.5 tons of bauxite residue are produced for every ton of aluminum. In 2019, the production of more than 120 million tons resulting in the generation of over 160 million tons of bauxite residue world wide [1]. Currently, there is no significant way to reuse bauxite residue so that this by-product must be disposed in holding areas. By 2050, aluminum industry estimates that the global inventory of bauxite residue could reach 10 billion tons and the accumulation of this industrial by-product is a major issue, with both environmental and economic impacts.

An alternative to valorize bauxite residue (BR) studied in this paper consists of using BR as geopolymer binder for mortar and concrete [1, 2]. BR has a high concentration of the aluminosilicate required in the geopolymerization process [1-7]. However, the low reactivity of the aluminosilicate content and the low ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (generally below 2) limit the using of BR as the only geopolymer precursor [6]. Several researchers mixed bauxite residue with other industrial by-products to increase this ratio, maximize the geopolymer process and fabricate a geopolymer binder, such as fly ash (FA) or slag [7-14]. Hu et al. [7], Li et al. [9], Tang et al. [14] tested BR and FA based geopolymer concrete and mortar and observed an increase of the mechanical compressive strength up to 50% compared to similar references mixed without BR. Based on one FA based geopolymer mortar mixtures developed by Hardjito et al. [15-17], El-Gass et al. [8] replaced up to 90% of FA by the BR produced in the province of Québec and determined uniaxial compressive strength after a 24 hours heat treatment at 60°C. The authors found satisfactory compressive strength (f_c larger than 25 MPa) for replacement ratio up to 60%. However, they observed a drastic decrease of the compressive strength (f_c below 10 MPa) for larger replacement ratio. To increase the mechanical performance BR geopolymer mortar, they suggested to reduce the water-to-binder ratio or to increase the alkali solution content, the curing duration and the heating temperature, parameters typically resulting in a higher compressive strength for FA based geopolymer [5]. This paper therefore investigates the effect of water-to-binder ratio, the curing conditions and the amount of FA and BR on mortar and concrete compressive strength. To do so, this paper, first study the effect of these parameters to optimize BR and FA based geopolymer mortar. Then, coarse aggregates are added to study and develop BR and FA based geopolymer concrete.

MATERIALS AND METHOD

For this research, class F fly ash and bauxite residue produced in Calgary (AB, Canada) and Saguenay (QC, Canada) were used as solid precursors, respectively. Bauxite residue is a very fine particle with a water content often larger than 50% of its weight. The chemical content of those materials is presented in Table 1.1.

Table 1.1 – Chemical composition of solid precursors (mass percentage)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Other	Ignition lost
Fly ash	53.7	19.0	7.8	4.4	1.3	9.0	2.2	-	2.0	0.5
Bauxite residue	11.1	17.2	2.6	44.4	-	6.4	0.1	4.7	1.6	11.9

A mixture of solid sodium hydroxide and sodium silicate solution containing 287 kg/m³ of SiO₂ and 89 kg/m³ of Na₂O was used as an alkaline solution for the geopolymerization process. The sand used for mortar and concrete had particles size between 0.08 mm and 5 mm, a density of 2680 kg/m³ and was produced in Saint-Henry-de-Taillon (QC, Canada). The coarse aggregate used for concrete had particles size between 2.5 mm and 10 mm, a density of 2850 kg/m³ and was produced at Bergerone (QC, Canada).

To better control the mixture proportions, BR used for the studied geopolymer mixture was first dried and grinded in solid powder (water content of about 0%). Then, water was added during the mixing process of mortar and concrete to accommodate its water absorption of 26%. The fabrication process of the geopolymer mortar consists in mixing sand with solid precursors and about 30% of the amount of water. Then, the sodium hydroxide pre-dissolved with the solution of sodium silicate (alkali solution prepared few hours earlier) was added to the mixture with the remaining amount of water. The total mixing time was monitored after the addition of the alkali solution and limited to about 10 minutes. A similar procedure was followed for geopolymer concrete, but coarse aggregates were added at the beginning of the mixing process that was limited to about 30 min. This duration was required to properly homogenize the bauxite residues with the mixture.

After mixing, fresh geopolymer workability was determined with a slump test (CSA A23.2 5C [18]) as well as the air content (CSA A23.2 4C [18]). Cylinder samples (diameter of 75 mm, height of 150 mm) were prepared according to CSA A23.2 1C and 3C [18] and used for compression tests (CSA A23.2 9C [18]) on hardened geopolymer mortar or concrete. The average value of compressive strength presented in this paper represents the average of three samples.

After geopolymer mortar and concrete pouring, samples were moved to a high temperature cure. The cure consisted of placing samples in a preheated oven for a specific duration and temperature. Then, samples were moved to ambient curing conditions (about 23°C), demolded and tested after a specific duration (generally within the hours following the heat curing and after 28 days, calculated from the geopolymer fabrication).

GEOPOLYMER MORTAR

The mixture proportions of the geopolymer mortar is based on the FA based geopolymer tested by El-Gass et al. [8] and Hardjito et al. [15] Table 1.2 presents the reference mixture proportions for geopolymer mortar. This reference mixture has a density of 2491 kg/m³, a Na₂SiO₃/NaOH ratio of 1.4, a water-to-binder ratio (w/b) of 0.24 and water to FA ratio (w/FA) of 0.24. All the others tested geopolymer mortar are based on this reference mixture. More details regarding the tested geopolymer mortar can be found in [19].

Table 1.2 – Mass of components (in kg) for the reference mixture of geopolymer mortar

Solid precursor – class F fly ash	Solid sodium hydroxide	solution of sodium silicate	Supplementary water	Sand
896	41	209	65	1280

Effect of the replacement ratio of fly ash by bauxite residue on the strength

To study the effect of the amount of bauxite residue (BR) as solid precursors on the strength, fly ash (FA) was progressively replaced in the reference mixture by BR. The studied replacement ratios of 0%, 60%, 70% and 80% were selected based on El-Gass et al. [8] tests to maximize the amount of bauxite residue. The corresponding mixtures are named as RXX-YY, where XX refers to the percentage of bauxite residue and YY refers to the percentage of fly ash (e.g. the solid precursor of the mixture R60-40 contains 60% of BR and 40% of FA). All the samples were placed in an oven at 60°C and during 24h, then tested. Fig. 1.1 presents the average compressive strength, f'_c , according to the replacement ratio of FA by BR.

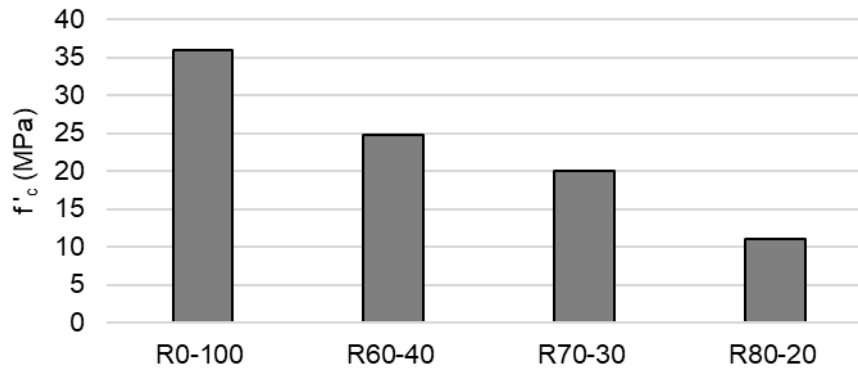


Fig. 1.1 – Effect of the bauxite residue replacement ratio on the average compressive strength of fly ash and bauxite residue base geopolymer mortar determined after a cure at 60°C during 24h (age = 1 day)

As previously observed by other researchers [8, 9, 13], it can be seen that the amount of bauxite residue (BR) has a direct influence on the compressive strength. Increasing the amount of FA replaced by BR reduces the compressive strength. This decrease is relatively limited (less than 15 MPa compared to the reference mixture) when 70% or less of FA is replaced BR. This reduction is more significant for the mixture containing 80% BR and 20% FA, with a compressive strength 24.5 MPa lower than the reference mixture (11.4 MPa for R80-20 compared to 35.9 MPa for R0-100).

Effect of the age of the mortar on the strength

After a cure at 60°C during 24h, the mixture R60-40 was stored in ambient condition (about 23°C) and tested in compression at 14 days and 28 days (see Fig. 1.2). It can be observed that the gain in compressive strength mostly occurred during the cure at 60°C ($f'_c = 21.9$ MPa at 1 day). However, the geopolymer mortar compressive strength still slightly increases after the cure. After 28 days, the compressive strength of the mortar R60-40 increased by 4.4 MPa and reached 26.3 MPa.



Fig. 1.2 – Effect of the age of the geopolymer mortar R60-40 on the average compressive strength, cure at 60°C during 24 h

Effect of the water-to-binder ratio on the strength

The mixture R60-40 was reproduced to examine the effect of the w/b ratio. The amount of BR and FA are both considered as the binder. All the samples were placed in an oven at 60°C and during 24h, then tested. Fig. 1.3 presents the average compressive strength according to the water-to-binder ratio. The water to FA ratio (w/FA) is also presented for comparison purpose.

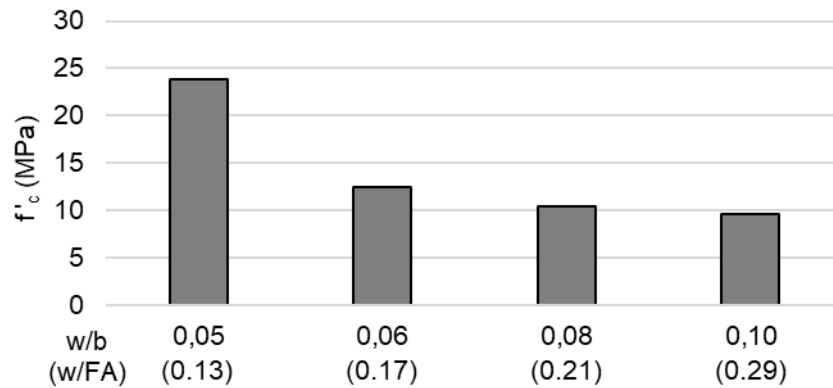


Fig. 1.3 – Effect of the w/b ratio (binder includes FA and BR) and the w/FA ratio on the average compressive strength of BR and FA based geopolymer mortar, determined after a cure at 60°C during 24h, mixtures with 60% of BR and 40% of FA

It may be observed that an increase of the w/b and w/FA ratios reduces the compressive strength. The highest compressive strength of 24.5 MPa is obtained for a w/b ratio of 0.05 (w/FA = 0.13), and increasing this ratio to 0.10 (w/FA = 0.29) reduces the average compressive strength below 10 MPa. This statement is similar as what was observed for a geopolymer concrete made with FA as the only solid precursor [5].

Effect of high temperature and curing duration on the strength

The effect of different temperatures and duration of the cure on compressive strength was studied on the R60-40 and R70-30 mixtures. To do so, cylinder samples of each mixture were placed in the oven for a specific curing duration and temperature. Five specific curing temperatures from 50°C to 90°C were selected. For each temperature, samples were removed after 6 h, 24 h and 48 h from the oven and tested in compression. Fig. 1.4 presents the average compressive strength of each curing condition, in terms of temperature and duration.

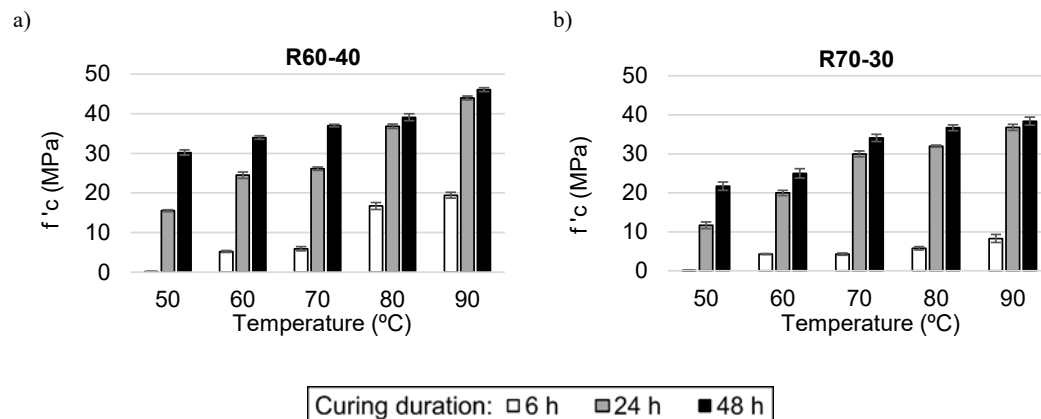


Fig. 1.4 – Effect of the curing condition (temperature and duration) on the average compressive strength measured immediately after the cure and 28 days later, for (a) R60-40 and (b) R70-30

It can be observed that increasing the curing time and temperature increase the compressive strength of the BR and FA based geopolymer mortar mixtures R60-40 and R70-30. At temperatures of 60°C and 70°C, and after

6 hours of curing, the compressive strength of the tested mixtures was about 5 MPa. This result suggests that the geopolymerization process is well on the way, but a longer cure is needed. Extending the curing duration to 24 h significantly increases the compressive strength. Moreover, the increase in compressive strength observed between 6 h and 24 h is more important for high-curing temperature (a gain of about 25 MPa at 90°C) than for low temperature (a gain of about 20 MPa at 60°C). A further extension of the cure up to 48 h still increases the compressive strength of the tested mixtures, but this gain appears rather marginal compared to the resistance measured after the first 24 h (a gain between 2 and 10 MPa between 24 h and 48 h, depending on the mixture and temperature). Also, this compressive strength increases between 24 h and 48 h is lower at 80°C and 90°C than at 70°C or below. Therefore, it appears that the first 24 h of the cure are critical to maximize the compressive strength of the tested geopolymer mixtures. Extending the cure up to 48 h may help to increase compressive strength at low temperature, but the gain is marginal for a cure at 80°C or higher.

GEOPOLYMER CONCRETE

Geopolymer concrete mixtures named C60-40 and C70-30 were fabricated and tested (see Table 1.3). These mixtures are based on the mortar R60-40 and R70-30, respectively. The BR and FA based geopolymer concrete mixtures physical properties are in-between: slump of 200 mm to 230 mm, air content of 2.0 to 3.5%, density of 2100 kg/m³ to 2400 kg/m³. More details regarding the tested geopolymer concrete mixtures and physical properties can be found in [19].

Table 1.3 – Mass of components (kg) for the geopolymer concrete mixtures (1 batch)

Mixture	RB	FA	Solid sodium hydroxide	solution of sodium silicate	Water	Sand	Coarse aggregate
C60-40	556	311	40	202	47	1240	248
C70-30	607	260	40	202	47	1240	248

Mechanical properties

Tests were carried out on the C60-70 and C70-30 concrete mixtures to characterize their mechanical properties after a 24 h cure at 80°C. The determined mechanical properties presented in Table 1.4 are respectively the compressive strength (f'_c), elasticity modulus (E_c), splitting tensile strength (f_{sp}) and flexural tensile strength (f_r). Table 4 also presents ratios between these mechanical properties and $\sqrt{f'_c}$: r_{Ec} , r_{fsp} , r_{fr} .

Table 1.4 – Average mechanical properties and ratios of tested concrete at 28 days (24 h cure at 80°C, MPa units)

Mixture	f'_c	E_c	f_{sp}	f_r	$r_{Ec} = E_c / \sqrt{f'_c}$	$r_{fsp} = f_{sp} / \sqrt{f'_c}$	$r_{fr} = f_r / \sqrt{f'_c}$
C60-40	40.6	19 800	1.6	3.5	3100	0.25	0.55
C70-30	36.7	14 400	1.5	2.9	2380	0.25	0.48

As shown in Table 1.4, a cure at 80°C for 24 hours gives compressive strength of 36.7 and 40.6 MPa, which may be classified as normal weight ordinary structural concrete (f'_c between about 20 and 50 MPa) as for portland cement concrete [20-22]. Comparing the mixtures C60-40 with the mixture C70-30, it appears that increasing the amount of BR slightly reduces all mechanical properties, as for the previously tested BR and FA based geopolymer mortar. However, the mechanical properties for geopolymer concrete with 60% and 70% of bauxite residue (C60-40 and C70-30) remain similar or slightly lower to the values reported in the literature for similar strength FA based geopolymer concrete without bauxite residue (E_c of about 11 GPa to 23 GPa, f_{sp} of about 0.5 MPa to 2.0 MPa, f_r of about 4.5 MPa to 6.0 MPa) [16, 17, 23-28]. This suggests that the partial substitution of FA by BR in geopolymer concrete does not significantly affect the mechanical properties.

Compared to portland cement concrete with similar compressive strength, few authors observed that FA based geopolymer concrete can present lower mechanical properties [5, 15, 27]. Generally, the values of E_c , f_{sp} and f_r can be estimated from the value of $\sqrt{f'_c}$ [21, 22]. For a normal weight ordinary strength portland cement concrete, ACI [21] and CSA [22] ratios r_{Ec} , r_{fr} , r_{fsp} of 4500, 0.5 and 0.6 (MPa units). These ratios are however rough estimations and can easily vary by about 20 to 30% according to the mixture content [20-22]. For the geopolymer concrete studied, the ratios r_{Ec} were 3100 and 2380 for geopolymer concrete C60-40 and C70-30, respectively. These ratios are significantly lower than the value of 4500 specified for portland cement concrete (difference of 32% and 47%, respectively). This suggests that BR and FA based geopolymer concrete is more flexible than portland cement concrete. Regarding the splitting and flexural tensile strengths of the studied BR and FA based geopolymer concrete, the measured values are also lower than the values expected for a similar strength portland cement concrete by about 50% ($1 - 0.25/0.5$) and 20% ($1 - 0.48/0.6$). Similar results were obtained for FA based geopolymer concrete without BR [15, 23-25]. Since the number of tests was limited in this study, more tests are required to identify the causes explaining these lower properties compared to portland cement concrete as well as a clearer relationship between mechanical properties and compressive strength.

Effect of the age on the compressive strength

To find out if the compressive strength of the concrete mixtures C60-40 and C70-30 continues to increase after the cure is over, the C60-40 and C70-30 concrete mixtures that have been under a 80°C cure for 24 hours were stored at an ambient temperature and tested in compression after 28 days, 56 days and 90 days. The results are shown in Fig. 1.5.

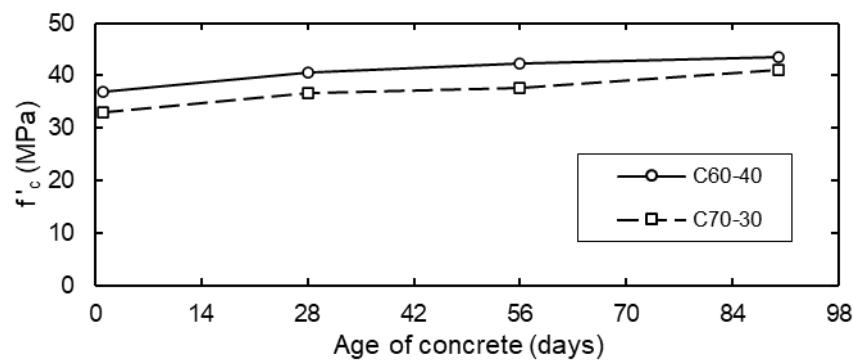


Fig. 1.5 – Effect of the age of geopolymer concrete C60-40 and C70-30 stored in ambient condition after a cure at high temperature (24h at 80°C) on the average compressive strength

It can be seen that most of the compressive strength gain is acquired during the high-temperature curing period of 24 h. For the mixtures C60-40 and C70-30, the strength after the cure at 1 day reported in Table 4 and in Fig. 5 represent 85% and 80% of the strength measured after 90 days ($f'_{c-1 \text{ day}} / f'_{c-90 \text{ days}}$), respectively. After the cure, the compressive strength slightly increases at ambient temperature, but much more slowly. This suggests that the geopolymerization process slowly continues under ambient condition. Similar results were obtained by few authors FA based geopolymer concrete with and without bauxite residue [16, 23, 29-31]. The gain in strength of BR and FA based geopolymer concrete is greater in the first few days than in the last few days. For example, the gains in strength for the mixture C60-40 were 3.8 MPa between 1 and 28 days, 1.8 MPa between 28 and 56 days, and 1.2 MPa between 56 and 90 days (increase of 10%, 4% and 3%, respectively). This suggests that the speed of the geopolymerization process decreased with time at ambient temperature.

CONCLUSIONS

Geopolymer mortar mixtures based on bauxite residue and class F fly ash have been first developed and tested to study main parameters affecting the mechanical performance. These mortars were then used to fabricate bauxite residue and fly ash based geopolymer concrete. With appropriate mixture proportions and curing condition, in terms of temperature and duration, a large amount of bauxite residue can be used to replace fly ash and obtain geopolymer mortar and concrete with good mechanical properties, similar to normally weight

ordinary strength portland cement structural concrete. In general, more research is needed to examine the chemical reactions process and optimizing the mechanical properties. Regarding the tested bauxite residue and fly ash based geopolymer mortar and concrete presented in this paper, it can be concluded that:

- Increasing the amount of bauxite residue reduces the compressive strength of geopolymer mortar. Good compressive strength (20 MPa or more) is obtained for geopolymer mortar with 70% or less of bauxite residue. An increase of the water to binder ratio may, however, reduce the compressive strength of the bauxite residue and fly ash based geopolymer mortar.
- Curing temperature between 50°C and 90°C and cure duration up to 48 h were tested. Selecting a longer cure at the highest temperature increases the resistance of the geopolymer mortar. However, the compressive strength mostly developed within the first 24 h at high temperature. Maximizing curing conditions during the first 24 h helps developing the required compressive strength.
- Much of the compressive strength of bauxite residue and fly ash based geopolymer mortar and concrete compressive strength is developed during the high temperature curing (about 80 to 85%). However, compressive strength continues to increase at ambient conditions, after the high temperature curing period. However, this increase is much lower (gain less than 20%).
- Elastic modulus and tensile strength measured by splitting and flexural tests for bauxite residue and fly ash based geopolymer concrete are similar to the one found in the literature for similar fly ash based geopolymer concrete without bauxite residue. However, these properties are slightly lower than the one expected for similar normal strength portland cement concrete.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to express their gratitude to Rio Tinto, Béton-Préfabriqué-du-Lac and MITACS for financing and supporting this research work. The authors also acknowledge the contributions of the research laboratory CURAL, the Centre on Concrete Infrastructures (CRIB) and the Aluminium Research Centre – REGAL.

REFERENCES

- [1] Institute IA. Opportunities for use of bauxite residue in special cements. 2020. p. 50.
- [2] Archambo MS. New Horizons for Processing and Utilizing Red Mud: Michigan Technological University; 2021.
- [3] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JS. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*. 2007;42:2917-33.
- [4] Kamseu E, Alzari V, Nuvoli D, Sanna D, Lancellotti I, Mariani A et al. Dependence of the geopolymerization process and end-products to the nature of solid precursors: Challenge of the sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 2021;278:123587.
- [5] Hassan A, Arif M, Shariq M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*. 2019;223:704-28.
- [6] Wang S, Jin H, Deng Y, Xiao Y. Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;289:125136.
- [7] Hu W, Nie Q, Huang B, Shu X, He Q. Mechanical and microstructural characterization of geopolymers derived from red mud and fly ashes. *Journal of Cleaner Production*. 2018;186:799-806.
- [8] El-Gass H, Fiset M, Simard G. Formulation d'un mortier géopolymère conducteur à base de résidus de bauxite. Université du Québec à Chicoutimi; 2020. p. 45.
- [9] Li Y, Min X, Ke Y, Liu D, Tang C. Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation. *Waste Management*. 2019;83:202-8.
- [10] Li Y, Liu X, Li Z, Ren Y, Wang Y, Zhang W. Preparation, characterization and application of red mud, fly ash and desulfurized gypsum based eco-friendly road base materials. *Journal of Cleaner Production*. 2021;284:124777.
- [11] Kumar A, Kumar S. Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. *Construction and building Materials*. 2013;38:865-71.
- [12] Kim SY, Jun Y, Jeon D, Oh JE. Synthesis of structural binder for red brick production based on red mud and fly ash activated using Ca (OH) 2 and Na2CO3. *Construction and Building Materials*. 2017;147:101-16.

- [13] Chen X, Guo Y, Ding S, Zhang H, Xia F, Wang J et al. Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions. *Journal of cleaner production*. 2019;207:789-800.
- [14] Tang W, Wang Z, Liu Y, Cui H. Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;178:288-300.
- [15] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DM, Rangan BV. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*. 2004;101:467-72.
- [16] Hardjito D, Rangan BV. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Curtin University of Technology*; 2005. p. 103.
- [17] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw D, Rangan B. Properties of geopolymer concrete with fly ash as source material: effect of mixture composition. *ACI Special Publication*. 2004;222:109-18.
- [18] A23.1-14/A23.2-14 C. Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete. *CSA Group*; 2014. p. 690.
- [19] Shalaby D. Développement d'un béton géopolymère à base de résidu de bauxite et de cendre volante pour des éléments architecturaux: Université du Québec à Chicoutimi; 2023.
- [20] fib. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. fédération internationale du béton: Ernst and Sohn; 2013.
- [21] ACI-318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*. Farmington Hills: American Concrete Institute; 2014. p. 520.
- [22] CSA-A23.3. *Design of Concrete Structures*. Toronto, ON: Canadian Standards Association 2019. p. 301.
- [23] Zhuang XY, Chen L, Komarneni S, Zhou CH, Tong DS, Yang HM et al. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*. 2016;125:253-67.
- [24] Sofi M, Van Deventer J, Mendis P, Lukey G. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and concrete research*. 2007;37:251-7.
- [25] Sofi M, Van Deventer J, Mendis P, Lukey G. Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC). *Journal of Materials Science*. 2007;42:3107-16.
- [26] Lee B, Kim G, Kim R, Cho B, Lee S, Chon C-M. Strength development properties of geopolymer paste and mortar with respect to amorphous Si/Al ratio of fly ash. *Construction and Building Materials*. 2017;151:512-9.
- [27] Nath P, Sarker PK. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2017;130:22-31.
- [28] Fernandez-Jimenez AM, Palomo A, Lopez-Hombrados C. Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*. 2006;103:106.
- [29] Rangan BV, Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw D. Studies on fly ash-based geopolymer concrete. *Proceedings of the world congress geopolymer*, Saint Quentin, France; 2005. p. 133-7.
- [30] Assi LN, Deaver EE, Ziehl P. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;167:372-80.
- [31] Assi LN, Carter K, Deaver E, Ziehl P. Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2020;263:121477.

ANNEXE 2
MÉLANGES DE BÉTON DES POUTRES

Quantités pour les mélanges de béton pour 1 m³ de béton à condition sec et saturé en surface.

Constituants	BR0	BR5	BR10	BR15	BR20	BR22	BR25
Ciment type GU (kg)	400	380	360	340	320	311,7	300
Résidus de bauxite(kg)	0	20	40	60	80	145	100
Granulat fin (kg)	825,9	825,9	825,9	825,9	825,9	797,6	825,9
Gros granulat (kg)	950	950	950	950	950	921,7	950
Eau (kg)	157,8	162,8	157,8	162,8	158,8	182,8	157,8
Entraîneur d'air Sika air 60(kg)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,25	0,15
Superplastifiant Viscocrete 1000 (kg)	2,6	2,5	2,5	2,6	2,6	3	2,6

ANNEXE 3 FICHE TECHNIQUE DES ADJUVANTS

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE



FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT

Sika® Air-60

ADJUVANT ENTRAÎNEUR D'AIR POUR BÉTON

DESCRIPTION DU PRODUIT

Le Sika® Air-60 est un surfactant synthétique en solution aqueuse destiné à l'entraînement d'air dans le béton. Il a été spécialement formulé avec une teneur en matériau actif plus basse pour produire des bétons devant respecter de faibles dosages d'adjuvants entraîneurs d'air. Il permet aussi l'entraînement d'air dans les mélanges de bétons plus rigides. Il améliore également la durabilité du béton en le rendant résistant aux effets néfastes des cycles de gel/dégel tout en améliorant la consistance et en réduisant le ressuage du béton. Sika® Air-60 a été spécialement formulé et soumis à un contrôle de qualité très strict afin de garantir des performances supérieures pour le béton à l'état plastique ainsi que pour le béton durci.

DOMAINES D'APPLICATION

- Béton exposé à faible affaissement.
- Production de tuyau en béton, de béton préfabriqué vibré (fabrication de regards, ponceaux, puisards, etc.) ainsi que pour des applications en construction routière (chaussées, trottoirs, bordures, caniveaux, et autres applications où le béton doit être protégé contre les effets des cycles de gel/dégel ainsi que des sels de déglacage).
- Le Sika® Air-60 permet par ailleurs d'améliorer l'ouvrabilité des bétons maigres ou non optimisés.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

- Offre une résistance supérieure aux cycles de gel/dégel ainsi qu'à l'écaillage.
- Améliore l'ouvrabilité du béton.
- Réduit le ressuage.
- Réduit la taille et le nombre de canaux capillaires, et augmente l'imperméabilité.
- Améliore la résistance en compression de bétons maigres.
- Améliore de façon significative la durabilité du béton.
- Améliore la rétention d'eau facilitant l'hydratation du ciment.
- Procure un réseau d'air entraîné de qualité supérieure.

HOMOLOGATIONS / NORMES

- Répond aux exigences de la norme ASTM C260/260M-10A

Fiche technique du produit
Sika® Air-60
Mai 2023, édition 01.01
021403021000000158

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

DCC MasterFormat®	03 05 00
Conditionnement	Fût de 205 L (54 gal US) GRV de 1040 L (275 gal US) Livraison en vrac
Durée de conservation	1 an, lorsqu'entreposé dans un endroit sec, à l'abri des rayons directs du soleil et à des températures se situant entre +5 °C et +27 °C (40 °F et 80 °F) .
Conditions d'entreposage	Entreposer à une température de plus de +5 °C (40 °F). Si le produit a gelé, le dégeler et l'agiter jusqu'à ce qu'il retrouve son état initial. Remarque : Ne pas utiliser d'air comprimé pour agiter le produit.
Aspect / Couleur	Liquide transparent
Densité	Environ 1,0

MODE D'EMPLOI

Dosage recommandé	Il est recommandé d'utiliser le Sika® Air-60 à un dosage de 30 - 1500 mL/100 kg de matériau cimentaire. Remarque : Les composants du béton, l'affaissement, la température ambiante, l'utilisation de matériaux pouzzolaniques, la durée et l'énergie de malaxage ainsi que le type et la marque de ciment vont influencer le dosage. Il est fortement recommandé de réaliser des gâchées d'essai afin d'établir le dosage en Sika® Air-60 nécessaire à l'obtention de la teneur en air ciblée. Des tests de teneur en air réguliers devraient être institués afin d'ajuster le dosage aux éventuels changements de conditions. Communiquer avec Sika Canada pour tout conseil.
Malaxage	Sika® Air-60 peut être incorporé dans n'importe quel constituant du béton, à l'exception du ciment, du laitier ou des cendres volantes. Il est préférable de l'incorporer au sable. Sika® Air-60 est compatible avec tous les autres produits de la gamme Sika®, néanmoins chaque adjuvant devrait être introduit séparément dans le malaxeur.

VALEURS DE BASE DU PRODUIT

Toutes les valeurs indiquées dans cette Fiche technique du produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ENVIRONNEMENT, SANTÉ ET SÉCURITÉ

L'utilisateur doit lire les fiches de données de sécurité (FDS) correspondantes les plus récentes avant d'utiliser tout produit. La FDS fournit des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination sécuritaire des produits chimiques et contient des données physiques, écologiques, toxicologiques et d'autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter qu'en raison de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la fiche technique du produit local pour connaître les données exactes du produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations contenues dans le présent document et tout autre conseil sont donnés de bonne foi sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika concernant les produits lorsqu'ils sont correctement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales conformément aux recommandations de Sika. Les informations s'appliquent uniquement aux applications et aux produits expressément mentionnés dans le présent document et sont basées sur des tests de laboratoire qui ne remplacent pas les tests pratiques.

Fiche technique du produit
Sika® Air-60
Mai 2013, édition 01.01
011403021000000158

En cas de modification des paramètres de l'application, tels que les changements de substrats, etc., ou en cas d'application différente, consultez le service technique de Sika avant d'utiliser les produits Sika. Les informations contenues dans le présent document ne dispensent pas l'utilisateur des produits de les tester pour l'application et l'usage prévus. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos conditions de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent toujours se référer à la version la plus récente de la fiche technique locale du produit concerné, dont des copies seront fournies sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Autres sites:

Boisbriand (Québec)
Brantford; Cambridge
Sudbury; Toronto (Ontario)
Edmonton (Alberta)
Surrey (Colombie-Britannique)

Sika Canada Inc.

Siège social
601, avenue Delmar
Pointe-Claire, Québec
H9R 4A9
1-800-933-SIKA
www.sika.ca

Fiche technique du produit

Sika® Air-60
Mai 2023, édition 01.01
021403021000000158

3 / 3

SikaAir-60-fr-CA-(05-2023)-1-1.pdf

**BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE**





FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT

Sika® ViscoCrete®-1000

ADJUVANT RÉDUCTEUR D'EAU DE GRANDE PORTÉE



DESCRIPTION DU PRODUIT

Sika® ViscoCrete®-1000 est un adjuvant réducteur d'eau de grande portée qui combine la technologie Sika® ViscoCrete® et Sika® ViscoFlow®. Sa formule unique est basée sur la technologie polycarboxylate.

DOMAINES D'APPLICATION

- Sika® ViscoCrete®-1000 est recommandé pour la production de tous les produits de béton haute résistance, dans les cas où une plasticité élevée, une rétention prolongée de l'affaissement et une résistance initiale et ultime accrue sont désirés.
- Sika® ViscoCrete®-1000 peut être utilisé pour la production de béton autoplaçant (BAP) ainsi que pour la production de béton à affaissement conventionnel.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

La mise en oeuvre des derniers développements de la technologie Sika® ViscoFlow® permet au Sika® ViscoCrete®-1000 de prolonger la rétention de l'affaissement sans impact négatif sur le temps de prise. Cela donne un avantage particulier notamment dans les climats chauds

où la perte de l'affaissement du mélange de béton est plus susceptible de se produire. Le Sika® ViscoCrete®-1000 peut être utilisé pour la production de béton autoplaçant (BAP) ainsi que pour la production de béton à affaissement conventionnel.

Applications pour réducteur d'eau de grande portée :

Lorsqu'il est utilisé comme adjuvant réducteur d'eau de grande portée, une réduction de l'eau pouvant atteindre jusqu'à 35 % peut être obtenue. L'action

superplastifiante permet la production de béton fluide à affaissement élevé avec une maniabilité excellente et une rétention prolongée de l'affaissement pouvant être mis en oeuvre avec un minimum de vibrations même à une faible proportion eau-ciment. L'action dispersante du Sika® ViscoCrete®-1000 maximise l'efficacité de l'hydratation du ciment et améliore les résistances à la compression du béton (au jeune âge et à long terme). La rétention prolongée de l'affaissement ne nuit aucunement au temps de prise.

Applications pour réducteur d'eau de moyenne portée :

À un dosage plus faible, le Sika® ViscoCrete®-1000 peut être utilisé comme un adjuvant réducteur d'eau de moyenne portée économique ou simplement comme adjuvant réducteur d'eau pour la production de béton à affaissement conventionnel. Lorsqu'il est utilisé comme adjuvant réducteur d'eau de moyenne portée, une réduction de l'eau pouvant atteindre jusqu'à 15 % peut être obtenue. Cette application est idéale pour l'utilisation avec les mélanges de béton raides et maigres ou avec le béton contenant des cendres volantes. Le Sika® ViscoCrete®-1000 améliorera la maniabilité et les propriétés de finition.

L'action combinée de réduction d'eau et de superplastification est à l'origine des avantages suivants :

- Permet un développement plus rapide des résistances initiales et à ultimes pour un béton à haute résistance économique et une utilisation structurale du béton plus rapide.
- Des résistances initiales plus élevées permettent un démoulage plus rapide et une utilisation plus efficace des coffrages pour la production de béton préfabriqué.
- La rétention de l'affaissement améliorée prolongera la maniabilité sans nuire au temps de prise du mélange

- de béton.
 - L'augmentation de l'affaissement améliore la maniabilité et réduit les frais de main d'oeuvre.
 - La densité plus élevée du béton réduit la perméabilité et augmente la durabilité du béton.
- Le Sika® ViscoCrete®-1000 ne contient aucun chlorure de calcium ni aucune autre forme de chlorure ajoutée intentionnellement. Il ne va ni initier ni contribuer à la corrosion de l'armature en acier intégrée au béton.

INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

- Conformité LEED®v4 Crédit MR (Option 1) : Divulgateion et optimisation des produits de construction - Déclarations environnementales de produits

HOMOLOGATIONS / NORMES

Le Sika® ViscoCrete®-1000 répond aux exigences de la norme ASTM C494, pour les adjuvants de type A et F.

Fiche technique du produit
Sika® ViscoCrete®-1000
Novembre 2023, édition 01.01
021301011000000654

2 / 4

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE



INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

DCC MasterFormat®	03 05 00
Conditionnement	Fût de 205 L (54 gal US) GRV de 1040 L (275 gal US) Livraison en vrac
Durée de conservation	1 an minimum lorsqu'entreposé dans un endroit sec à une température se situant entre 5 °C et 27 °C (40 °F et 80 °F).
Conditions d'entreposage	Entreposer à l'abri des rayons directs du soleil et à une température de plus de 5 °C (40 °F). Si le produit a gelé, le dégeler et l'agiter jusqu'à ce qu'il retrouve son état initial.
Aspect / Couleur	Liquide brun
Densité	Environ 1,06

INFORMATIONS TECHNIQUES

Conseil particulier	Mûrissement Il faut toujours respecter les directives CSA A23.1 relatives au mûrissement pour obtenir la meilleure qualité possible du béton.
---------------------	---

MODE D'EMPLOI

Dosage recommandé	Le dosage recommandé pour le Sika® ViscoCrete®-1000 est entre 130 et 780 mL/100 kg de matériau cimentaire. Pour une réduction d'eau maximale, il est possible d'utiliser un dosage allant jusqu'à 1170 mL/100 kg de matériau cimentaire. À un dosage élevé, les temps de prise seront prolongés. Les dosages peuvent varier selon la plasticité ou la réduction d'eau désirées. L'affaissement, la température ambiante, le rapport eau/matériaux cimentaires, les temps de malaxage et les différents matériaux cimentaires, tels que le type de ciment et les matériaux cimentaires supplémentaires, affecteront les dosages. Il est recommandé de toujours d'effectuer une gâchée d'essai afin de déterminer le dosage nécessaire pour une performance optimale. Il est possible d'utiliser des dosages en dehors de la plage recommandée lorsqu'on a recours à des matériaux spéciaux comme la silice micronisée, lorsque les conditions ambiantes sont extrêmes ou lorsque le projet présente caractéristiques particulières, communiquer avec Sika Canada pour plus de renseignements.
Malaxage	Mesurer la quantité requise manuellement ou avec un dévidoir automatisé. Le Sika® ViscoCrete®-1000 doit être ajouté directement au béton fraîchement malaxé ou en tant qu'élément intégral pendant le cycle de gachage. Ne pas malaxer au ciment sec. Le Sika® ViscoCrete®-1000 peut aussi être ajouté au béton sur le chantier avant la mise en place. Veiller à malaxer complètement les matériaux. Lorsqu'il est utilisé en combinaison à d'autres adjuvants, verser chaque adjuvant séparément dans le mélange. Sika suggère que le malaxage des matériaux combinés se situe entre 80 et 100 tours, soit à la centrale, soit dans le camion-malaxeur. Compatibilité avec d'autres adjuvants : Sika® ViscoCrete®-1000 peut être utilisé en combinaison avec d'autres adjuvants Sika et peut être utilisé dans les mélanges de conception utilisant des matériaux cimentaires supplémentaires.

Fiche technique du produit
Sika® ViscoCrete®-1000
Novembre 2023, Édition 01.01
021301011000000654

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE



VALEURS DE BASE DU PRODUIT

Toutes les valeurs indiquées dans cette Fiche technique du produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ENVIRONNEMENT, SANTÉ ET SÉCURITÉ

L'utilisateur doit lire les fiches de données de sécurité (FDS) correspondantes les plus récentes avant d'utiliser tout produit. La FDS fournit des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination sécuritaire des produits chimiques et contient des données physiques, écologiques, toxicologiques et d'autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter qu'en raison de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la fiche technique du produit local pour connaître les données exactes du produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations contenues dans le présent document et tout autre conseil sont donnés de bonne foi sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika concernant les produits lorsqu'ils sont correctement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales conformément aux recommandations de Sika. Les informations s'appliquent uniquement aux applications et aux produits expressément mentionnés dans le présent document et sont basées sur des tests de laboratoire qui ne remplacent pas les tests pratiques. En cas de modification des paramètres de l'application, tels que les changements de substrats, etc., ou en cas d'application différente, consultez le service technique de Sika avant d'utiliser les produits Sika. Les informations contenues dans le présent document ne dispensent pas l'utilisateur des produits de les tester pour l'application et l'usage prévus. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos conditions de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent toujours se référer à la version la plus récente de la fiche technique locale du produit concerné, dont des copies seront fournies sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

Autres sites:

Boisbriand (Québec)
Brantford; Cambridge
Sudbury; Toronto (Ontario)
Edmonton (Alberta)
Surrey (Colombie-Britannique)

Sika Canada inc.

Siège social
601, avenue Delmar
Pointe-Clair, Québec
H9R 4A9
1-800-933-SIKA
www.sika.ca

Fiche technique du produit

Sika® ViscoCrete®-1000
Novembre 2023, Édition 01.01
021301011000000654



ENTRAÎNEURS D'AIR

Format principal n° : 03 30 00 03 40 00 03 70 00

EUCON™ AIR MAC12

AGENT ENTRAÎNEUR D'AIR POUR LE BÉTON



EUCLID CHEMICAL

INFORMATION SUR LE PRODUIT

EMBALLAGE

Offert en vrac et en contenants de 1000 litres, 205 litres et 20 litres

DURÉE DE CONSERVATION

Deux ans dans son contenant d'origine non ouvert

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

ASTM C260

AASHTO M154

ANSI/NSF 61

DESCRIPTION

EUCON AIR MAC12 est conçu pour être utilisé à titre d'adjuvant entraîneur d'air dans tous les types de béton et est fabriqué dans des conditions rigoureusement contrôlées, ce qui assure une performance uniforme et précise. EUCON AIR MAC12 ajoute des bulles d'air microscopiques dans le béton et peut être utilisé dans tous les types de béton, y compris dans les formulations pour lesquelles il est difficile d'entraîner de l'air. EUCON AIR MAC12 ne contient pas de produits chimiques ou d'ions de chlorure ajoutés connus pour favoriser la corrosion de l'acier.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT

CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

- Produit un réseau de bulles d'air stable dans lequel la taille des bulles et l'espacement entre les bulles sont adéquats
- Le réseau de bulles d'air amélioré protège le béton contre les dommages causés par les cycles de gel/dégel répétitifs
- Augmente la résistance du béton aux sels déglacants, aux attaques des sulfates et à l'eau corrosive
- Réduit la quantité d'eau de gâchage requise par mètre cube de béton
- Améliore l'ouvrabilité
- Améliore la maniabilité
- Minimise le ressuage et la ségrégation du béton

DOMAINES D'APPLICATION

- Béton prêt à l'emploi
- Béton structural
- Béton de masse
- Béton de revêtement
- Béton extérieur

PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- EUCON AIR MAC12 doit être maintenu à l'abri du gel; toutefois, le gel et le dégel subséquent n'endommagent pas le matériau si ce dernier est mélangé vigoureusement. Ne pas agiter avec de l'air.
- Veuillez consulter votre représentant Euclid Chemical afin de connaître les ajustements de dosage requis lorsque des cendres volantes, du laitier de haut fourneau ou des superplastifiants sont utilisés.
- Ajouter au mélange séparément des autres adjuvants.
- Toujours consulter la fiche de données de sécurité avant l'utilisation.

MODE D'EMPLOI

EUCON AIR MAC12 est typiquement utilisé à des dosages de 6 à 260 ml par 100 kg de liant. Afin d'obtenir la teneur en air désirée, la quantité d'EUCON AIR MAC12 à utiliser variera en fonction du type de ciment, de la finesse du sable, de la température ambiante et du béton, de la formulation, des autres adjuvants, du type d'équipement de malaxage, etc. Les mélanges de béton doivent être testés de façon régulière afin de confirmer la présence d'une teneur en air adéquate. EUCON AIR MAC12 doit être ajouté avec la première eau de gâchage ou directement au sable afin d'obtenir une performance maximale.

Révision : 3.21

La version anglaise de la présente fiche pourrait contenir de l'information plus récente.

GARANTIE : Euclid Canada, (Euclid), garantit uniquement et expressément que ses produits sont sans défauts de matériel ou de main-d'œuvre pendant un (1) an à partir de l'achat. À moins d'être autorisée par écrit par un responsable d'Euclid, aucune représentation ou déclaration verbale ou écrite par Euclid et ses représentants ne peut modifier cette garantie. EN RAISON DE LA GRANDE VARIABILITÉ DES CONDITIONS DE CHANTIER, EUCLID NE FAIT AUCUNE GARANTIE IMPLICITE OU EXPLICITE QUANT À LA QUALITÉ LOYALE ET MARCHANDE OU L'APTITUDE À REMPLIR UNE UTILISATION ORDINAIRE OU PARTICULIÈRE DE SES PRODUITS ET LES EXCLUT DE SA GARANTIE PAR LE FAIT MÊME. Si un produit Euclid ne rencontre pas la garantie, Euclid remplacera le produit, sans frais pour l'acheteur. Le remplacement du produit sera le seul et exclusif remède disponible et l'acheteur n'aura aucune autre compensation pour des dommages supplémentaires ou consécutifs. Toute réclamation doit être faite dans l'année qui suit l'infraction. Euclid n'autorise personne, en son nom, à faire des énoncés verbaux ou écrits qui modifient les renseignements et les instructions d'installation qui se trouvent sur les fiches techniques ou sur l'emballage. Tout produit Euclid qui n'est pas installé selon les renseignements et les instructions d'installation perd sa garantie. Les démonstrations de produits, s'il y en a, sont faites uniquement pour illustrer l'utilisation du produit. Elles ne constituent pas une garantie ou une variante à la garantie. L'acheteur sera l'unique responsable pour déterminer la pertinence des produits Euclid en fonction des utilisations qu'il veut en faire.

ANNEXE 4
FICHE TECHNIQUE DES RÉSIDUS DE BAUXITE



Advanced concrete

Activité : C-1830799.04.50

Clients: Emilie Garneau, Joao Augusto Lago Araujo Seixas,
Marie Côté

LIMS 45A0074

C. Girard, G. Tremblay-Goupille

F. Laplante, chimistes

2025-05-15



Conclusions recommandations

- L'analyse minérale des échantillons démontre quatre échantillons de composition similaires.
- L'analyse Rietveld est difficile à réaliser dû au grand nombre de réflexions superposées. Conséquemment, la quantification de phase n'est pas disponible et l'assignation minéralogique doit être considérée de manière informative. L'identification a été abordée avec en tête, les phases les plus probables présentes dans les résidus de bauxite.
- Pour toutes références analytiques, employer l'analyse obtenue par XRF.
- La présence de fluor, à l'état d'élément mineur, n'a pas été observé. Si une analyse à l'état de trace est nécessaire, prière de contacter le service analytique.

RioTinto

Francois
Laplante,
Chimiste

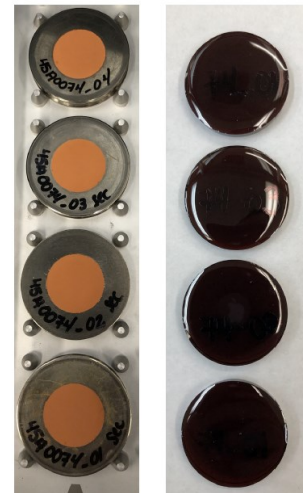
Signature numérique
de Francois Laplante,
Chimiste
Date: 2025.05.26
16:30:55 -04'00'

Références techniques:
Cahier: 2559
Page: 72

Site Title (Attention) Site Title (Attention) (pour développement Anso)		N° de rapport N° Web		45A004 WP15030
Designeur de campagne?		Non		
Si on continue: Oui		Non		
1 - INFORMATION CLIENT USINE				
Nom de l'usine CRDA-BA	Nom du représentant COTE MARIE	N° d'ordonne 0000		
2 - DÉTAIL DE LA DEMANDE (voir les instructions plus bas)				
Cette loi 020510202	Scénario par COTE MARIE	Téléphone 41810600	Exp. 000	
Est. (sans pour) 120510202	* Type de livraison Autre	Description, but et l'importance Dans le cadre de l'audit annuel, concret. Analyse et préparation WFP pour l'analyse de l'analyse. Gérer les analyses. Statist. WFP, ANSO, IRT		
Est. de 120510202				
Scénario 120510202	Quantité	Scénario/Quantité	N° de distribution 4	
	Autre	Autre		
Département des schémas A jour		Réviser les schémas à jour		
Évaluation de l'analyse? Non		Marie COTE marie.cote@ricelab.com		
3 - TRAITEMENT DE LA DEMANDE				
Données de base		Préparation		Préparation
Statut/EXP/ORD	Statut	EXP	ORD	Préparation
Statut: EXP/ORD	Statut: EXP/ORD	EXP: 100	ORD: 100	Préparation: 100
Statut: EXP/ORD	Statut: EXP/ORD	EXP: 100	ORD: 100	Préparation: 100
Statut: EXP/ORD	Statut: EXP/ORD	EXP: 100	ORD: 100	Préparation: 100

RioTinto

Description des échantillons



RioTinto

Détails des échantillons

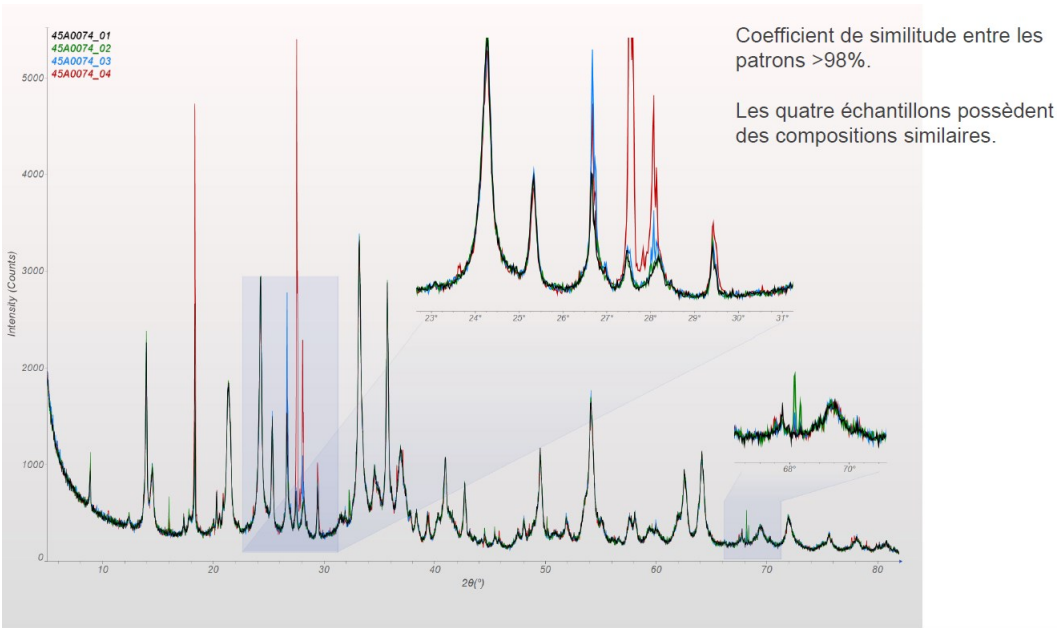
ID client	LIMS	Description
mc-1143	45A0074_01	Échantillon utilisé tel quel (sec et<100M)
mc-1144	45A0074_02	Échantillon utilisé tel quel (sec et<100M)
mc-1145	45A0074_03	Échantillon utilisé tel quel (sec et<100M)
mc-1146	45A0074_04	Échantillon broyé au mortier/pilon en agate (sec et<100M)

RioTinto

Résultats (FRX par S8)

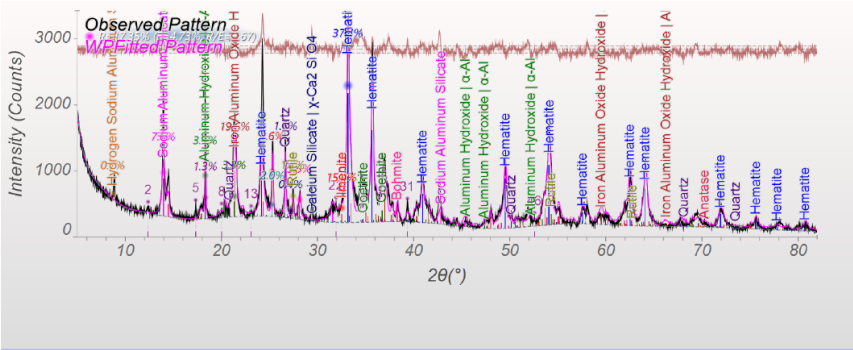
Identification	45A0074_01	45A0074_02	45A0074_03	45A0074_04
Méthode d'analyse	1359_Boues rouges	1359_Boues rouges	1359_Boues rouges	1359_Boues rouges
Composés	mc-1143	mc-1144	mc-1145	mc-1146
Na ₂ O (%)	6.98	6.97	6.97	6.36
MgO (%)	0.103	0.103	0.102	0.102
Al ₂ O ₃ (%)	19.76	19.87	19.96	19.04
SiO ₂ (%)	12.81	12.84	12.77	13.96
P ₂ O ₅ (%)	0.136	0.139	0.136	0.131
SO ₃ (%)	0.170	0.174	0.167	0.156
K ₂ O (%)	0.072	0.072	0.073	0.140
CaO (%)	1.80	1.77	1.79	2.02
TiO ₂ (%)	4.65	4.60	4.61	4.16
V ₂ O ₅ (%)	0.150	0.149	0.151	0.141
Cr ₂ O ₃ (%)	0.092	0.096	0.091	0.089
MnO (%)	0.016	0.015	0.015	0.016
Fe ₂ O ₃ (%)	40.33	40.29	40.57	40.27
ZnO (%)	0.004	0.005	0.004	0.004
ZrO ₂ (%)	0.194	0.190	0.192	0.167
LOI (%)	11.61	11.63	11.66	12.34
Sum (%)	98.89	98.90	99.26	99.08

RioTinto



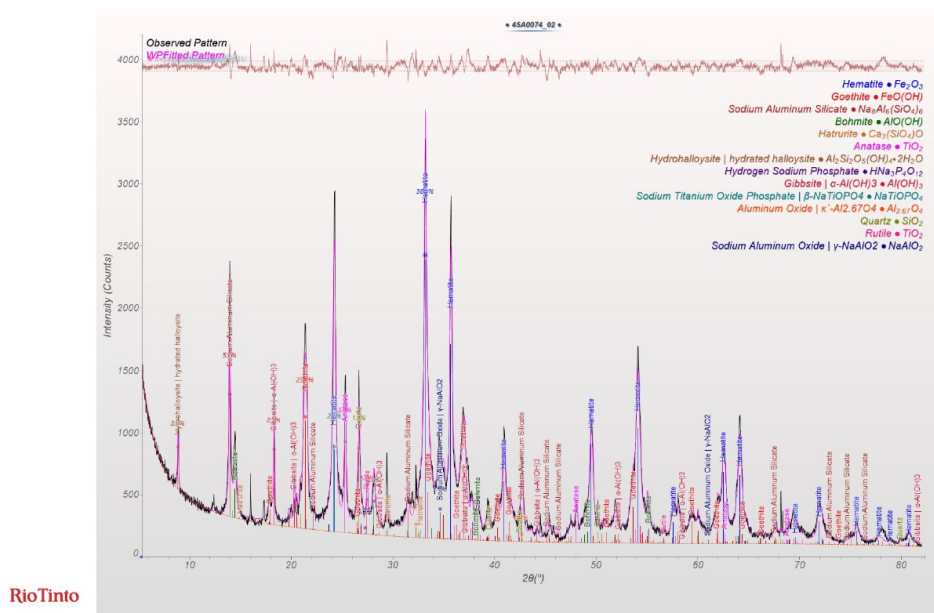
45A0074_01

#	Phase ID	Chemical Formula	PDF#	RIR	Wt%	BR%	FOM (n)	Scale(I)	Shift(x)	Cell Type	a (Å)	b (Å)	c (Å)
1	Hematite, syn diron(III) oxide	Fe ₂ O ₃	01-089-8103	3.05	37.4	15.7	2.8 (18)	1.000	-0.080°	Hexagonal	5.0206	5.0206	13.719
2	Iron Aluminum Oxide Hydroxide	(Fe _{0.93} Al _{0.07})O(OH)	00-059-0344	2.59	19.6	16.5	*5.6 (23)	0.251	0.020°	Orthorhombic	4.5940	9.8865	3.0012
3	Ilmenite, syn	FeTiO ₃	01-071-1140	2.68	15.4	17.4	—	1.000	0.000°	Hexagonal	5.0870	5.0870	14.0420
4	Sodium Aluminum Silicate (?)	Na ₈ (Al ₆ Si ₆ O ₂₄)	01-071-5356	2.89	7.6	28.9	4.7 (17)	0.498	-0.060°	Cubic (P)	8.9430	8.9430	8.9430
5	Böhmite	Al(OH) ₃	01-073-6509	1.32	3.5	16.6	4.1 (12)	0.163	0.000°	Orthorhombic	3.6936	12.2140	2.8679
6	Goethite, syn	FeO(OH)	01-077-9313	2.56	3.3	16.1	8.4 (23)	0.373	0.080°	Orthorhombic	9.9333	3.0160	4.6010
7	Gibbsite (?)	Al(OH) ₃	01-080-6432	1.79	3.1	24.4	*5.7 (22)	0.980	0.040°	Monoclinic	8.8676	5.0741	9.7280
8	Anatase	TiO ₂	01-071-1166	4.57	2.6	10.3	—	0.342	0.020°	Tetragonal	3.7842	3.7842	9.5146
9	Grossite (?)	CaAl ₄ O ₇	00-073-0851	1.20	2.0	21.8	17.5 (19)	0.210	-0.040°	Monoclinic	12.8938	8.8905	5.4490
10	Quartz, syn	SiO ₂	00-046-1045	4.12	1.8	13.1	10.5 (13)	0.350	0.000°	Hexagonal	4.9134	4.9134	5.4052
11	Gibbsite (?)	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	00-001-0263	1.78	1.3	22.2	22.1 (18)	0.272	0.080°	Monoclinic	8.6240	5.0600	9.7000
12	Rutile	TiO ₂	03-065-1119	3.23	1.2	12.7	*8.1 (12)	0.140	-0.040°	Tetragonal	4.5880	4.5880	2.9670
13	Hydrogen Sodium Aluminum	H ₂ 7Na _{4.3} Al _{6.9} Si _{4.1} O ₉₆	04-011-1869	3.83	0.7	11.2	*19.9 (17)	0.074	0.120°	Hexagonal	13.6447	13.6447	19.7293
14	Calcium Silicate x-Ca2 Si O4	Ca ₂ SiO ₄	00-061-0379	0.94	0.4	39.7	*5.6 (27)	0.160	-0.040°	Monoclinic	8.2127	9.7930	9.7954



RioTinto

[G:_RESULTS\2025-45A0074_Advanced_concrete\DR\45A0074_01.tsm] 5.0°/1.00°/0.100°/28cc, tgo:3322.977.0, Cu(Kα) 25mA, 22 mai 2025, 09:20 28 mai 2025, 10:15 • Rio Tinto



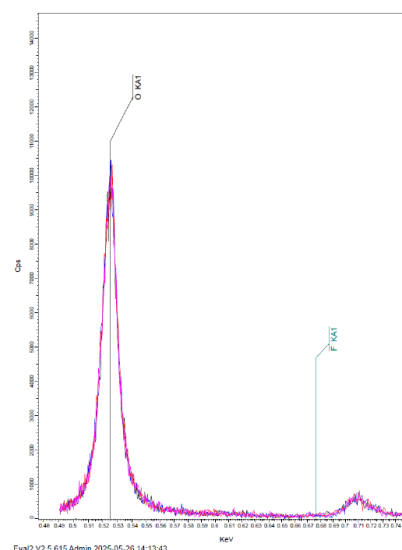
RioTinto

Analyse qualitative du Fluor.

Le patron d'énergie du fluor contenu dans les quatre échantillons soumis sont présentés dans le graphique de droite.

Le fluor est invisible dans les échantillons. Conséquemment, l'analyse Skalar pourrait être remise en question. La réflexion à 0.71 KeV est associée à la raie $L_{\alpha 1}$ du fer, très présent dans les échantillons.

La cliente est invitée à contacter le service analytique si elle désire pousser plus loin l'analyse du fluor dans ses échantillons.



Eval2 V2.5.615 Admin 2025-05-26 14:13:43

RioTinto

<Footer>

ANNEXE 5
MÉLANGES DE BÉTON DES TUYAUX

Constituants	0%	5%	10%	15%	30%	40%
Ciment type GU (kg)	360	342	324	306	252	216
Résidus de bauxite(kg)	0	18	36	54	108	144
Granulat fin (kg)	1115	1115	1115	1115	1115	1115
Gros granulat (kg)	525	525	525	525	525	525
Eau (kg)	140,4	133,4	126,4	119,4	98,28	84,2
Entraîneur d'air Sika air 60(kg)	0,2	0,19	0,18	0,17	0,14	0,12

DIMENSIONS ET INFORMATIONS GÉNÉRALES POUR TUYAU Ø300mm, CLASSE 5											
DIAMÈTRE NOMINAL	DIAMÈTRE INT. MOYEN	ÉPAISSEUR PAROI MOYENNE	LONG. MÂLE	LONG. FEMELLE	DIAMÈTRE EXT. MOYEN	DIAMÈTRE EXT. CLOCHE	DIAMÈTRE INT. CLOCHE	DIAMÈTRE EXT. CLOCHE	RECOUVREMENT	X1	X2
300	305	67	2.44	1.16	512	440	392	372	30	N/A	N/A

TYPE DE CAGE	EMPLACEMENT CAGE CIR.	DIAMÈTRE INTÉRIEUR	TYPE D'ARMATURE			REEL	SURFACE D'ACIER	POIDS
			ESPACE	FL. CR.	POTEAU			
A	INTÉRIEUR	365mm	76.2mm (3")	0.3	W3	1.51	2.58	2.6
	EXTÉRIEUR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	11.34

POUR PLUS D'OPTIONS, SE RÉFÉRER AU CARTABLE DES OPÉRATEURS

ARMATURE			
SANS ARMATURE D'ACIER AVEC ARMATURE D'ACIER CAGE CIRCULAIRE SIMPLE TYPE A			
SANS ARMATURE D'ACIER AVEC ARMATURE D'ACIER CAGE CIRCULAIRE SIMPLE TYPE A			
SANS ARMATURE D'ACIER AVEC ARMATURE D'ACIER CAGE CIRCULAIRE SIMPLE TYPE A			

DIMENSIONS ET INFORMATIONS GÉNÉRALES POUR TUYAU Ø300mm, CLASSE 5											
DIAMÈTRE NOMINAL	DIAMÈTRE INT. MOYEN	ÉPAISSEUR PAROI MOYENNE	LONG. MÂLE	LONG. FEMELLE	DIAMÈTRE EXT. MOYEN	DIAMÈTRE EXT. CLOCHE	DIAMÈTRE INT. CLOCHE	DIAMÈTRE EXT. CLOCHE	RECOUVREMENT	X1	X2
300	305	67	2.44	1.16	512	440	392	372	30	N/A	N/A

TYPE DE CAGE	EMPLACEMENT CAGE CIR.	DIAMÈTRE INTÉRIEUR	TYPE D'ARMATURE			REEL	SURFACE D'ACIER	POIDS
			ESPACE	FL. CR.	POTEAU			
A	INTÉRIEUR	365mm	76.2mm (3")	0.3	W3	1.51	2.58	2.6
	EXTÉRIEUR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	11.34

POUR PLUS D'OPTIONS, SE RÉFÉRER AU CARTABLE DES OPÉRATEURS

ARMATURE			
SANS ARMATURE D'ACIER AVEC ARMATURE D'ACIER CAGE CIRCULAIRE SIMPLE TYPE A			
SANS ARMATURE D'ACIER AVEC ARMATURE D'ACIER CAGE CIRCULAIRE SIMPLE TYPE A			
SANS ARMATURE D'ACIER AVEC ARMATURE D'ACIER CAGE CIRCULAIRE SIMPLE TYPE A			

DIMENSIONS ET INFORMATIONS GÉNÉRALES POUR TUYAU Ø300mm, CLASSE 5											
DIAMÈTRE NOMINAL	DIAMÈTRE INT. MOYEN	ÉPAISSEUR PAROI MOYENNE	LONG. MÂLE	LONG. FEMELLE	DIAMÈTRE EXT. MOYEN	DIAMÈTRE EXT. CLOCHE	DIAMÈTRE INT. CLOCHE	DIAMÈTRE EXT. CLOCHE	RECOUVREMENT	X1	X2
300	305	67	2.44	1.16	512	440	392	372	30	N/A	N/A

TYPE DE CAGE	EMPLACEMENT CAGE CIR.	DIAMÈTRE INTÉRIEUR	TYPE D'ARMATURE			REEL	SURFACE D'ACIER	POIDS

ANNEXE 7
CERTIFICAT DE CONFORMITÉ DE L'ARMATURE



3000 Francis-Hughes ,Laval (Québec), Canada H7L 3J5 - Tel. : (450) 663-8700
Wats :1-800-363-0847 Fax.: (450) 663-9049 E-mail : numesh@numesh.com

CERTIFICAT DE CONFORMITÉ

CERTIFICATE OF COMPLIANCE

Ce rapport certifie que le produit décrit ci-dessous rencontre le standard ASTM A1064-18a.
This report certifies that the product described below meets the standard ASTM A1064-18a.

Sauf demande spéciale le fil d'acier rencontre - Unless otherwise request the wire steel meets:

Tensile	Fil lisse Plain Wire	Fil déformé Deformed Wire
Steel grade	Grade 70 (485)	Grade 75 (515)
UTS min KSI (MPa)	80 (550)	85 (585)
Fy min KSI (MPa)	70 (485)	75 (515)
RoA % min	30	NA

SO: 34679A

Description: D3

BOL: _____

ESSAIS DE TRACTION / TENSILE TEST

#Coulée/Heat #	Calibre/Size	Diam. (po)	Area	Fy(MPa)	UTS(MPa)	ROA%	Pliage / Bend
2305N5849	D3	0.195	0.030	554	606	N.A	OK
2305N5870	D3	0.195	0.030	579	589	N.A	OK

MILL TEST %

Coulée/Heat	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq
2305N5849	0.086	0.493	0.014	0.033	0.120	0.264	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.186

OK QC

Eric SABOURIN
Coordonnateur QA/QC

NUMESH INC.

Date: 2024-04-04

CERTIFICAT DE CONFORMITÉ
CERTIFICATE OF COMPLIANCE

Ce rapport certifie que le produit décrit ci-dessous rencontre le standard ASTM A1064-22
This report certifies that the product described below meets the standard ASTM A1064-22

Sauf demande spéciale le fil d'acier rencontre - Unless otherwise request the wire steel meets:

Tensile	Fil lisse Plain Wire	Fil déformé Deformed Wire
Steel grade	Grade 70 (485)	Grade 75 (515)
UTS min KSI (MPa)	80 (550)	85 (585)
Fy min KSI (MPa)	70 (485)	75 (515)
RoA % min	30	NA

SO: 36577A

Description: W3.5

BOL:

ESSAIS DE TRACTION / TENSILE TEST

#Coulée/Heat #	Calibre/Size	Diam. (po)	Area	Fy(MPa)	UTS(MPa)	ROA%	Pliage / Bend
A68255	W3.5	0,211	0,035	615	661	63.7	OK
A68764	W3.5	0,211	0,035	608	676	61.9	OK
A68765	W3.5	0,211	0,035	615	675	63.4	OK

MILL TEST %

Coulée/Heat	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq
A68255	0,060	0,400	0,010	0,011	0,160	0,160	0,060	0,070	0,010	0,000	0	0,157
A68764	0,070	0,420	0,018	0,020	0,140	0,200	0,090	0,090	0,020	0,000	0,0001	0,181
A68765	0,060	0,410	0,011	0,019	0,120	0,210	0,100	0,090	0,030	0,000	0,0001	0,173

Eric SABOURIN
Coordonnateur QA/QC

NUMESH INC.

Date: 2024-08-12

OK QC

