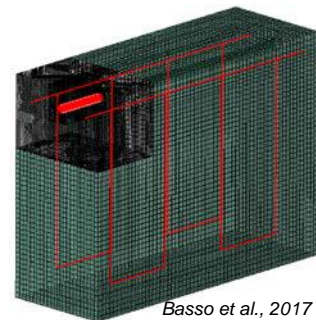
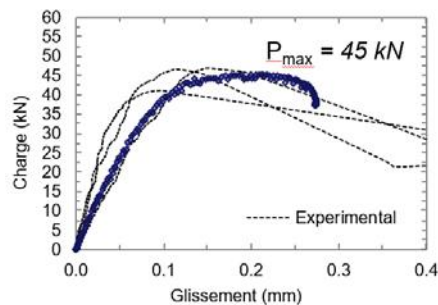


Actes de la 18^e édition des Journées Scientifiques

(RF)²B Regroupement Francophone
pour la Recherche et la
Formation sur le Béton

« Les nouveaux matériaux et les méthodes innovantes utilisés dans un
contexte de développement durable »



6 et 7 Juillet 2017

Université Laval
CRIB Québec



TABLE DES MATIÈRES

Programme des Journées pp. iv

Liste des affiches pp. viii

Articles

UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES BÉTONS AUTO-COMPACTANTS pp.1-11

Md El K. Bouarroudj^{A,B}, C. Colman^{A,B}, E. Robinet^A, Z. Zhao^A, F. Michel^A, L. Courard^A, S. Remond^B, D. Bulteel^B

A : Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège Belgique

B : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES DIMENSIONS pp. 12-22

C. Nader^A, P. Rossi^A, J-L. Tailhan^A

A : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE BÉTONS D'ENROCHEMENT pp. 23-33

C. Perlot^A, H. Carré^A

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS ET DOSAGES pp. 34-42

R. Trauchessec^A, E. Ghorbel^B, A. Lecomte^A, O. Safiuallah^B, Z. Ben Aouda^A, G. Wardeh^B

A : Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

B : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France



*ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES
ADDITIONS REACTIVES* pp. 43-58

S. Fattahi^A, R. Gagné^A

A : Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université
de Sherbrooke, Québec, Canada

*FLUAGE DU BÉTON ET DU BÉTON PRÉCONTRAINTE SOUS
CONDITIONS THERMO-HYGRO-MÉCANIQUES VARIABLES* pp. 59-69

H. Cagnon^A, V.N. Nguyen^B, T. Vidal^A, J.M. Torrenti^B, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et
Durabilité des Constructions); 135, avenue de Ranguel; F-31 077
Toulouse Cedex 04, France.

B : Institut français des sciences et technologies des transports, de
l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), 14-20 Boulevard Newton -
Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

*RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES
SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT
DES SULFURES DE FER* pp. 70-80

B. Fournier^A, J. Duchesne^A, A. Rodrigues^B

A : Département de géologie et de génie géologique, Université Laval,
Québec, Canada

B : GHD Consultants Ltée, Québec, Canada

*EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE
L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE* pp. 81-89

P. Basso Trujillo^A, M. Jolin^A, B. Massicotte^B, B. Bissonnette^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval,
Québec, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique
de Montréal, Québec, Canada

*AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGÉES PAR
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon^A, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des
Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

*INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA
FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLlicitÉ EN
TRACTION* pp. 99-117

T. Plagué^A, C. Desmettre^A, J.-P. Charron^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



UNIVERSITÉ
LAVAL



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton (CRIB)

PASSERELLE PIETONNE ISABEY-DARNLEY – UTILISATION DE
DALLES PREFABRIQUEES EN BFUP

pp. 118-143

É. Cantin-Bellemare^A, J.-P. Charron^B

A : Ville de Montréal, QC, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



PROGRAMME DU 6 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 Mot de bienvenue et présentation du (RF)²B par Gilles Escadeillas

9h15 **Conférencier invité** : Jacques Marchand, SIMCO Technologies
Titre : L'ingénierie de la durabilité - Concevoir des structures qui
atteindront une durée de vie de 100 ans et plus

10h15 **Étude du comportement résiduel de structures atteintes par la RAG**
Farid Benboudjema (1), Georges Nahas (1, 2), Ejona Kishta (1)
(1) LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), France
(2) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

10h45 : Pause-café – (affiches)

11h15 **Mécanismes d'hydratation des liants à base de ciments alumineux
en système dilué - confrontation mesures expérimentales et
modélisation numérique**
Nicolas Maach (1), Jean-François Georgin (1), Judith Pommay (2)
(1) LGCIE – INSA de Lyon, France
(2) Kerneos, France

11h45 **Passerelle piétonne Isabey-Darnley – Utilisation de dalles
préfabriquées en BFUP**
Étienne Cantin-Bellemare (1), Jean-Philippe Charron (2)
(1) Ville de Montréal
(2) École Polytechnique de Montréal

12h15 Repas

13h45 **Utilisation de bétons recyclés dans la formulation de bétons
autocompactants**
Mohamed El Karim Bouarroudj (1,2), Charlotte Colman (1,2), Eva
Robinet (1), Zengfeng Zhao (1), Frédéric Michel (1) Luc Courard (1),
Sébastien Remond (2), David Bulteel (2)
(1) Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental
Engineering, – Université de Liège, Belgique
(2) IMT Lille Douai, Université de Lille, France

14h15 **Stratégie multi-échelle de modélisation numérique de la fissuration
des structures en béton armé de grandes dimensions**
Christian Nader, Pierre Rossi, Jean-Louis Tailhan
IFSTTAR, France



14h45 **Valorisation de laitiers d'aciérie dans des blocs de bétons d'enrochement**

Céline Perlot, Hélène Carré

Université de Pau et des Pays de l'Adour - laboratoire SIAME, France

15h15 **Mélange de sable naturel avec une faible proportion de sables de bétons recyclés : dosages et propriétés**

Romain Trauchessec (1), Elhem Ghorbel (2), André Lecomte (1), Omary Safiuallah (2), Zakaria Ben-Aouda (1), George Wardeh (2)

(1) Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

(2) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France

15h45 **Visite des laboratoires de l'Université Laval**

19h00 **Restaurant Le Cosmos** (terrasse), 2813 boulevard Laurier, Québec



PROGRAMME DU 7 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 **Conférencier invité** : Luc Bédard, Association béton Québec (ABQ)
Titre : L'avenir de l'industrie du béton et l'intégration du développement durable

10h00 **Influence des additions cimentaires à forte teneur en chaux libre sur l'autocicatrisation naturelle des mortiers**
Salma Fattahi, Richard Gagné
Université de Sherbrooke

10h30 Pause-café (affiches)

11h00 **Fluage du béton et du béton précontraint sous conditions thermo-hygro-mécaniques variables**
Hugo Cagnon (1), V.N. Nguyen (2), T. Vidal (2), J.M. Torrenti (2), A. Sellier (1)
(1) LMDC, France
(2) IFSTTAR, France

11h30 **Récents développements dans la recherche et les spécifications sur les granulats à béton incorporant des sulfures de fer**
Benoit Fournier, Josée Duchesne et Andreia Rodrigues
CRIB, Université Laval

12h00 Repas

13h30 **Analyse du cycle de vie pour les infrastructures en génie civil : passé, présent et futur**
Ben Amor, Jean-Martin Lessard
CRIB, Université de Sherbrooke

14h00 **Calcul de la longueur de développement en présence de défauts**
Pasquale Basso (1), Marc Jolin (1), Bruno Massicotte (2)
(1) CRIB, Université Laval
(2) CRIB, École Polytechnique de Montréal

14h30 **Améliorer l'évaluation des structures endommagées par des réactions de gonflement interne à l'aide de modélisations physico-chimiques.**
Stéphane Multon, Alain Sellier
LMDC, France



15h00 **Influence de l'orientation et du type de fibres sur la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé**

Thibault Plagué, Clélia Desmettre, Jean-Philippe Charron
École Polytechnique de Montréal

15h30 Clôture des Journées scientifiques

15h45 Réunion du Conseil d'orientation (interne)
Salle 3347, pavillon Alphonse-Desjardins



AFFICHES POUR LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU (RF)2B

BÉDARD, Frédéric. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton en conditions de service*. Université Laval

COLMAN, Charlotte. *Residues de plâtre dans les fines de recyclage*. Université de Liège

ESSALIK, Samy-Joseph. *Nouvel essai annulaire adapté aux bétons à retrait compensé*. Université Laval

FAUCON, Samuel. *Réactions de gonflement interne (RAS et DEF) soumis à des chocs thermiques*. Université de Sherbrooke

FRECH-BARONET, Jessy. *Influence de l'humidité relative sur le comportement du fluage et de la relaxation de la pâte de ciment à l'échelle de la microstructure*. Université Laval

GAGNON, Antoine. *Conception et évaluation de la performance du béton projeté renforcé de fibres : concepts et défis*. Université Laval

HILT, Mélodie. *Production de béton en usine et développement durable : utilisation de technologie de contrôle continu*. Université Laval

MENU, Bruce-Ghandi. *Comportement différé des bétons au jeune âge*. Université Laval

MBINA, Mihindou. *Évaluation non-destructive de la qualité de l'adhérence entre deux bétons par la méthode de la réponse impulsionnelle (RI)*. Université de Sherbrooke

VU, Viet Anh. *Mur radiant : panneaux composite hybride bois et matériel inorganique*. Université Laval

MASOUD, Hosseinpoor. *Simulation numérique de l'écoulement du béton autoplaçant (BAP)*. Université de Sherbrooke

AHMED, Mostafa. *Nouvelle méthode pour quantifier la structuration des suspensions cimentaires*. Université de Sherbrooke

DIMA, Youness. *Caractérisation améliorée de l'écoulement des liants, ajouts cimentaires et liants alternatifs*. Université de Sherbrooke

18^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Université Laval, Québec, Canada
6 et 7 juillet 2017

EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE

P. Basso Trujillo^A, M. Jolin^A, B. Massicotte^B, B. Bissonnette^A

A Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval, Québec, Canada

B Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ : Cette recherche a pour but d'étudier l'importance de la réduction de l'adhérence entre le béton et les barres d'armature causée par les vides créés en béton projeté. Des éprouvettes du type *pull-out* faites en béton projeté par *voie sèche* ont été construites et des vides derrière les barres ont été intentionnellement produits en faisant varier la *consistance* du mélange projeté. De plus, des éprouvettes du même type possédant des *vides artificiels* ont été coulées en place afin d'étudier le phénomène avec des tailles de vides contrôlées. Ces premiers résultats ont permis de démontrer, au moyen de comparaisons statistiques, que cette stratégie reproduit adéquatement la force à l'ultime obtenue en béton projeté. Elle a aussi permis de détecter clairement une réduction prononcée de la force d'adhérence (pour des glissements inférieurs à l'ultime) lorsque la *longueur transversale* des vides dépasse approximativement 20% du périmètre nominal de la barre.

1. INTRODUCTION

Le béton projeté est une méthode de mise en place où le béton est propulsé à grande vitesse sur une surface. Afin d'enrober parfaitement les barres d'armature (surtout avec le procédé par *voie sèche*), la technique de projection, la *consistance*¹ du mélange et la vitesse d'air utilisée par les lanciers lors de la projection représentent les principaux aspects à surveiller et doivent être adéquatement choisies. Cependant, la difficulté d'accès et la quantité des barres à encapsuler doivent aussi être considérées. Une *consistance* trop « sèche », en combinaison avec une technique déficiente de projection et en présence de congestion d'acier, peut causer l'apparition de vides et de *lentilles de sable* (zones poreuses constituées notamment de granulats fins) derrière les barres d'armature (voir Figure 1). Conséquemment, afin de prouver la compétence des lanciers et la qualité de l'équipement et du mélange pour un chantier en particulier, une pratique courante (et parfois obligatoire) consiste à projeter du béton dans une réplique du segment le plus complexe de la structure réelle et de la carotter afin d'analyser la qualité de l'enrobage des barres. Cependant, la taille des vides définie comme étant acceptable est basée, à l'heure actuelle, sur l'expérience des inspecteurs et non à partir d'une étude rigoureuse où l'influence de la taille des vides a été liée à la perte d'adhérence.

¹ Terme communément utilisé en béton projeté pour caractériser la maniabilité du mélange.

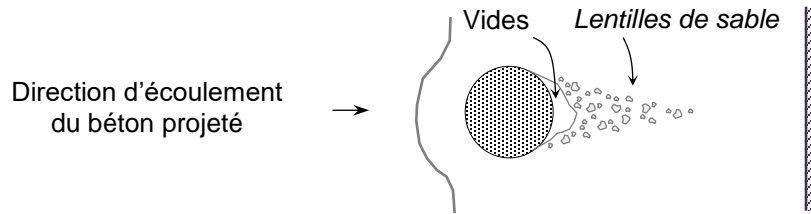


Figure 1. *Lentilles de sable* et vides créés lorsque la technique de projection est inadéquate

Malgré l'importance que ce phénomène représente dans la conception et la supervision des ouvrages en béton armé, peu des recherches ont été menées sur le sujet. Soylev et al. (2003), au moyen d'éprouvettes du type *pull-out*, ont démontré que la force d'adhérence à l'ultime diminue linéairement en fonction de la *longueur transversale* des vides en contact avec la barre d'armature et que cette réduction est indépendante de la résistance à la compression du béton lorsque des vides sont présents. Puisque l'adhérence des barres d'armature dans les éléments structuraux en béton armé est majoritairement assurée par la butée des crénelures avec le béton qui les entoure (Lutz et al., 1967; Treece et al., 1989 et *fib*, 2000), des défauts peuvent occasionner une perte significative de la force d'adhérence et donc une rupture prématurée des éléments structuraux. Afin de contourner ce problème, une alternative viable consisterait à introduire des facteurs de modification à l'équation pour le calcul de la *longueur de développement* des barres droites en traction qui est spécifiée par la norme CSA A23.3-14 et ACI 318-14 en fonction des difficultés prévues lors de la projection du béton. De cette manière, les barres d'armature pourraient atteindre, même en présence de vides, leur pleine capacité de conception, c.-à-d. leur plastification (f_y). En fait, des facteurs de modification ont déjà été ajoutés à l'équation dans le passé pour prendre en compte diverses situations (Clark, 1946 ; Jirsa et al., 1981; Johnston et al., 1982; Treece et al., 1989; ACI 318-14, 2014) à l'aide des éprouvettes d'arrachement (ACI 408-03, 2003).

2. OBJECTIFS ET PORTÉE DE L'ÉTUDE

Cet article porte sur la première phase de l'étude où l'influence de la *longueur transversale* des vides sur la perte de la force d'adhérence est étudiée à l'aide d'essais du type *pull-out*. L'objectif de cette phase est d'étudier l'impact de la longueur transversale d'un vide ainsi que d'étudier les avantages et les limitations de l'usage des vides *artificiels* pour ce faire. Une fois que cette stratégie sera validée, il sera ultérieurement possible de l'appliquer avec des essais d'arrachement du type *beam-end* (ASTM A944-10, 2015) lequel simule l'état de contraintes d'un élément fléchi en béton armé de manière plus réaliste. L'étude complète vise à proposer des recommandations, et même des facteurs de modification, aux codes de calcul nord-américains (CSA-A23.3-14 et ACI 318-14) afin d'augmenter la confiance des ingénieurs lorsqu'ils spécifient les *longueurs de développement* pour les structures en béton projeté où des vides derrière les barres pourraient être présents.

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Éprouvettes d'arrachement

Le béton a été projeté dans des moules rectangulaires en utilisant le procédé par *voie sèche* tel qu'illustré à la Figure 2a. Une machine *Aliva 246.5* avec une configuration de lance longue (anneau de mouillage à 2.2 mètres de l'embout du type « double bubble ») a été utilisée. Les blocs de béton ont été démoulés un jour après la projection suivi d'une cure à jute humide pendant une semaine. Par la suite, chaque éprouvette a été découpée en suivant les lignes pointillées montrées à la Figure 2b; trois éprouvettes ont été obtenues par moule. Chacune mesurait 285 x 150 x 150 mm et possédait une seule barre de 16 mm de diamètre nominal centrée par rapport à leur axe longitudinal. La longueur initiale de la barre était protégée par un manchon de PVC afin de contrôler la longueur de la barre adhérente au béton. Afin d'éviter la plastification de la barre avant la rupture du béton, cette longueur est de 40 mm. Par ailleurs, deux plaques de 40 mm

chacune ont été découpées ensuite afin de mesurer à 5 endroits différents (2 par plaque et 1 sur l'éprouvette) la *longueur transversale* des vides (voir section 3.2). Le reste du béton dans le moule a été utilisé pour mesurer la résistance à la compression sur carottes (ASTM C1604/C1604M-05, 2012).

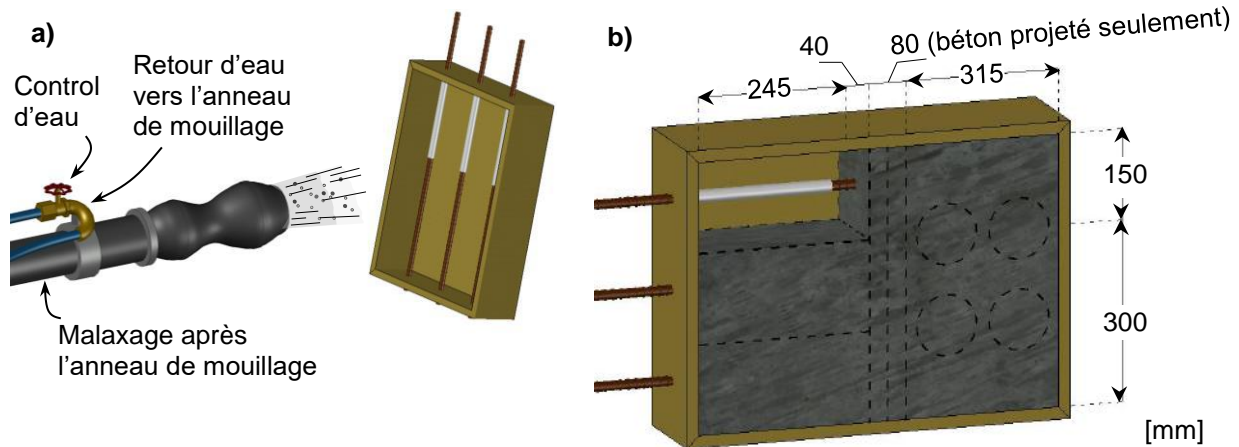


Figure 2. (a) Représentation de la projection et (b) dimensions des éprouvettes dans le moule

Le béton a été projeté par deux lancers (N1 et N2) lesquels ont utilisé trois *consistances* différentes mais tout en appliquant une technique de projection adéquate (se référer à Crom et al., 1981). La *consistance* a été mesurée immédiatement après la projection en utilisant un *pénétrömètre de poche* gradué avec un anneau glissant similaire à celui décrit par la norme ASTM D1558-10 (2010). De plus, le rapport e/l a été calculé; la masse d'eau a été obtenue en utilisant un four à micro-ondes (Nagi et al., 1994) et celle du ciment en calculant la proportion des particules plus fines que 80 μm traversent le tamis No. 200 (ASTM C117-13, 2013). Puisque la taille des vides n'était pas contrôlée, des éprouvettes du même type, mais coulées en place avec le même mélange et ayant des *vides artificiels*, ont été construites en parallèle; le but étant de recréer le comportement des éprouvettes en béton projeté. Ainsi, les mêmes moules ont été utilisés et la taille des éprouvettes a été conservée. Cependant, un rapport e/l constant de 0.45 a été choisi pour obtenir des propriétés mécaniques semblables au béton projeté. L'affaissement (ASTM C143/C143M-15a) et le pourcentage d'air (ASTM C231/C231M-17) ont été mesurés pour ces éprouvettes. Les essais d'arrachement ont été conduits en contrôlant le déplacement à 1.0 mm/min avec le montage illustré à la Figure 3. Le glissement de la barre a été mesuré avec deux capteurs fixés mécaniquement du côté chargé de la barre à l'aide d'un collier métallique à charnière. Les essais sont faits 21 jours suivant la fabrication des éprouvettes; le temps minimal requis pour appliquer la cure, découper les blocs, carotter, etc.

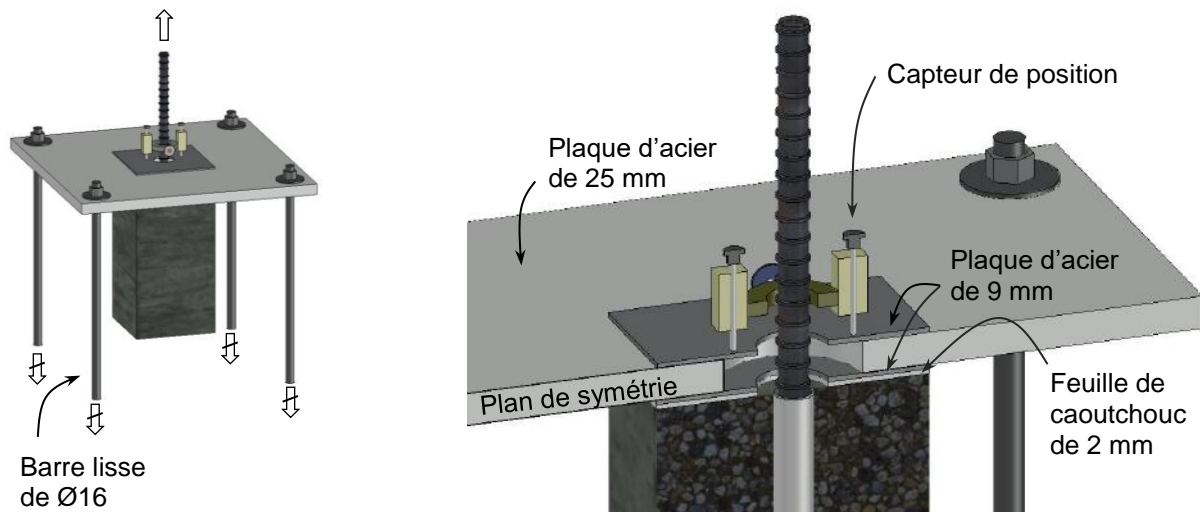


Figure 3. Montage de l'essai du type *pull-out*

3.2 Vides réels vs. artificiels

La *longueur transversale* des vides (Figure 4a et 4b), dorénavant identifiée comme « *l.t.* », a été mesurée avec précision au moyen de photos haute définition et d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAD). La valeur représente une fraction du périmètre nominal de la barre d'armature. Pour les éprouvettes en béton projeté, la mesure représente la moyenne des valeurs obtenues aux 5 sections différentes de coupe transversale tel que décrit à la section 3.1.

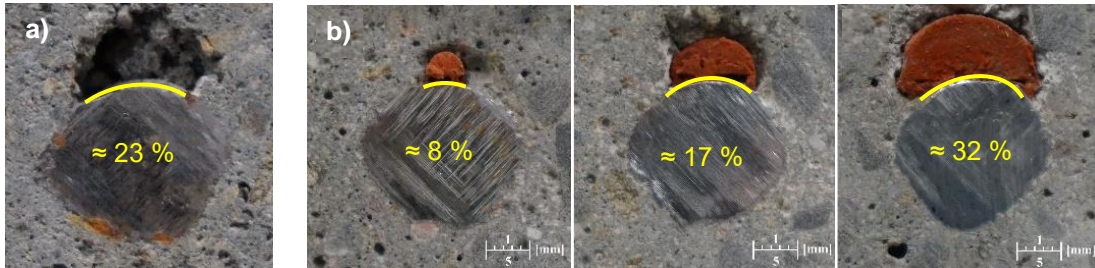


Figure 4. (a) Mesure de la « *l.t.* » d'une éprouvette en béton projeté et (b) pour différents vides *artificiels*.

Les vides *artificiels* ont été fabriqués avec du silicone. D'abord, le silicone a été inséré dans des tuyaux de 4.8, 9.6 et 15.9 mm de diamètre intérieur afin de créer des *vides artificiels* ayant une « *l.t.* » nominale de 10, 20 et 30 % respectivement. Les tuyaux, lesquels servent simplement de moules, ont été découpés par la suite afin d'en extraire les tubes de silicone durcis qui sont ensuite découpés en deux moitiés le long de leur axe longitudinal et, finalement, soigneusement collés sur les barres d'armature sur toute la longueur de 40 mm de la barre après le manchon de PVC. Afin de ne pas déposer de silicone ailleurs sur les barres, la surface prévue pour le vide *artificiel* a été délimitée avec du *ruban de masquage* lequel a été retiré avant la mise en place du béton dans les coffrages.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Propriétés du béton

La nomenclature utilisée pour les essais ainsi que les propriétés du béton mesurées et décrites au sous-chapitre 3.1 sont présentées au tableau 1.

Tableau 1: Résultats des essais sur le béton

Méthode de mise en place	Famille	Longueur des vides, « <i>l.t.</i> » (%)		e/l	f_c^{21} (MPa)	Consistance (MPa)		Air (%)	Commentaires [§]
						Affaissement (mm)			
Béton Projeté (S)	S-N1-H (A-B)	Mesurée après la projection	0.40	41.9	1.4 (14%)	N/D	<i>E. P.</i>		
	S-N1-M (A-B)		0.35	44.7	2.2 (23%)		V.		
	S-N1-L (A-B)		0.32	47.3	2.9 (10%)		V.		
	S-N2-H (A-C)		0.44	40.0	0.8 (13%)		<i>B. ÉC., V.</i>		
	S-N2-M (A-C)		0.36	49.7	1.4 (14%)		<i>E. P.</i>		
	S-N2-L (A-C)		0.25	44.7	≥ 4.8 (-)		V.		
Coulé en place (CIP)	CIP (A-B)	0 10 20 30 [†]	0.45	49.0 (1%)	180 (11%)	4.7 (6%)	<i>Vides artificiels</i>		

[§] *E. P.*: Enrobage Parfait, *V.*: Vides, *B.ÉC.*: Béton qui s'écoule

[†] Deux éprouvettes additionnelles (C et D)

Chaque famille d'éprouvettes a été nommée d'abord par la méthode de mise en place du béton (*shotcrete* ou *cast-in-place* pour leur nom en anglais). Pour celles faites en béton projeté, le lancier (N1 ou N2) ainsi que la quantité d'eau ajoutée (*Highest*, *Medium* ou *Lowest* pour leur nom en anglais) ont également été identifiés. De plus, les valeurs de *consistance* représentent la moyenne des 10 mesures et sont accompagnées de leur coefficient de variation entre parenthèses. Pour la famille S-N2-L, la quantité d'eau ajoutée au mélange a été « trop faible » et l'échelle maximale de 4.8 MPa du *pénétrömètre de poche* a été atteinte. Des commentaires ont également été ajoutés à la fin du tableau 1 afin de faciliter la compréhension de l'effet de la *consistance*, et donc de l'eau ajoutée, sur la présence des vides. Deux répliques (B et C) ont été créées pour les éprouvettes en béton projeté. Cependant, dû aux défauts dans certaines éprouvettes (résultat du rebond), seulement deux éprouvettes faites par le lancier N1 (A et B) ont pu être testées par famille. Quant aux éprouvettes ayant des vides *artificiels*, une seule réplique (B) a été créée. Cependant, quatre éprouvettes (A-D) ayant une « *l.t.* » de 30% ont été créés au total; deux d'entre elles (C et D) possédaient des vides dont la hauteur était deux fois plus grande que la hauteur de tout le reste des éprouvettes mais ceci n'a pas eu une influence significative sur la perte d'adhérence. Au total, les résultats de 15 éprouvettes faites en béton projeté et 10 coulés en place sont présentées.

4.2 Éprouvettes du type *pull-out*

La force d'arrachement à l'ultime des éprouvettes en béton projeté en fonction de la valeur moyenne de la « *l.t.* » est présentée à la Figure 5a. Les barres d'erreur représentent les valeurs minimales et maximales mesurées sur les plaques de 40 mm découpées au-dessous les éprouvettes. On observe comment les valeurs de la « *l.t.* » sont amplement variables d'une éprouvette à l'autre et s'écartent, sans aucun patron bien défini, entre 60 et 10% à partir de la valeur moyenne. De plus, les résultats offrent malheureusement peu d'information entre les valeurs de 0% et 20% de « *l.t.* ». En effet, les vides ont été créés de manière indirecte en faisant varier la *consistance* du mélange et des éprouvettes ayant des *longueurs transversales* de vides à l'intérieur de cette plage n'ont pas pu être créées. Les valeurs de la force à différentes valeurs de glissements n'ont pas été présentées par clarté mais elles représentent le même comportement.

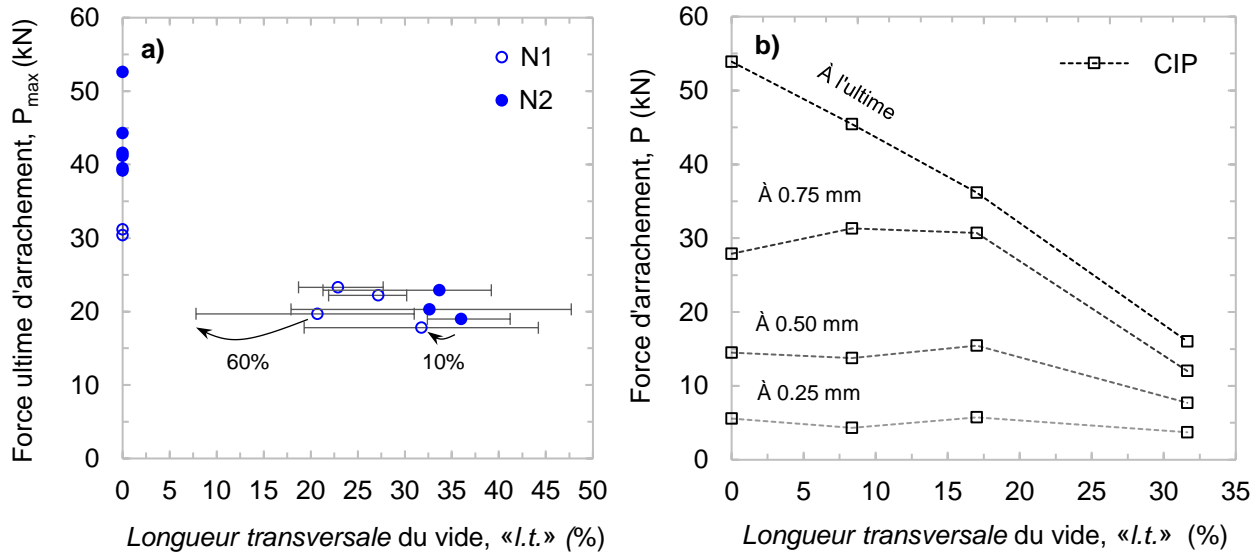


Figure 5. Évolution de la force d'arrachement des éprouvettes faites en béton projeté

Ainsi, il a été important d'étudier et de valider une méthodologie où la taille des vides peut être contrôlée; de éprouvettes ayant des vides *artificiels*. Les résultats obtenus avec ce type d'éprouvettes sont montrés à la Figure 5b où on observe, de façon plus claire, comment la force mesurée à différentes valeurs de glissements de la barre « évolue » jusqu'à ce que la charge ultime soit atteinte. Puisque la « *l.t.* » a été contrôlée, il a été possible de déterminer le pourcentage d'encapsulation d'une barre qui occasionne une perte significative de la force d'adhérence pour des glissements inférieurs à ceux obtenus lorsque la charge ultime est atteinte (0.75 mm et moins). Ce seuil se trouve à être autour de 17% selon les résultats de cet

étude. La similarité entre la charge obtenue avec une encapsulation parfaite (0% de « *l.t.* ») et celle où la barre possédait des vides plus petits que 20% de « *l.t.* » est probablement due à la capacité de l'acier à redistribuer les contraintes auxquels il est soumis avant la rupture. En revanche, la perte d'adhérence à l'ultime suit une relation linéaire tel que décrit par Soylev et al. (2003). Par contre, elle n'est pas proportionnelle au pourcentage de la barre encapsulé ou la « *l.t.* ».

4.3 Comparaison des résultats provenant des deux méthodes

Afin de déterminer la justesse des résultats obtenus avec des *vides artificiels*, une « comparaison statistique par paires » (Montgomery, 2009) a été effectuée entre les résultats obtenus par les deux types de méthodes de mise en place. Pour ce faire, deux groupes ont été définis: un avec des éprouvettes ayant des barres parfaitement enrobées et l'autre, avec des éprouvettes avec vides ayant une « *l.t.* » entre 30 et 36 %. Seul les résultats obtenus par le lancier N2 ont été utilisés pour la comparaison puisqu'ils possédaient une résistance à la compression approximativement égale aux éprouvettes coulées en place avec un enrobage parfait ($f_c \approx 49$ MPa pour la famille S-N2-M). De plus, la vitesse d'air choisie par le lancier N2 a été optimale en comparaison à celle choisie par le lancier N1 selon les observations faites en laboratoire. Lorsque des vides sont présents, la résistance en compression devient un paramètre secondaire (Soylev et al., 2003) et donc les résultats du lancier N2 (S-N2-L), même avec une résistance à la compression légèrement plus faible ($f_c \approx 44$ MPa), peuvent être utilisés également. Puisque la variabilité des résultats est différente (dû à la différence intrinsèque de mise en place du béton avec les deux méthodes), les variances des populations des deux méthodes de mise en place ont été considérées différentes lors de la comparaison statistique (comparaison par paires du type « Welch »). Trois paramètres ont été choisis à des fins de comparaison entre les résultats parmi chaque groupe: la force maximale (P_{max}) et la rigidité initiale (K_{so}) et finale (K_{su}) de la courbe force – glissement tel que montrées à la Figure 6. Ces dernières ont été définies de façon subjective comme étant la pente entre 0 et 20% ainsi que 40 et 70% de la force maximale de chaque courbe respectivement.

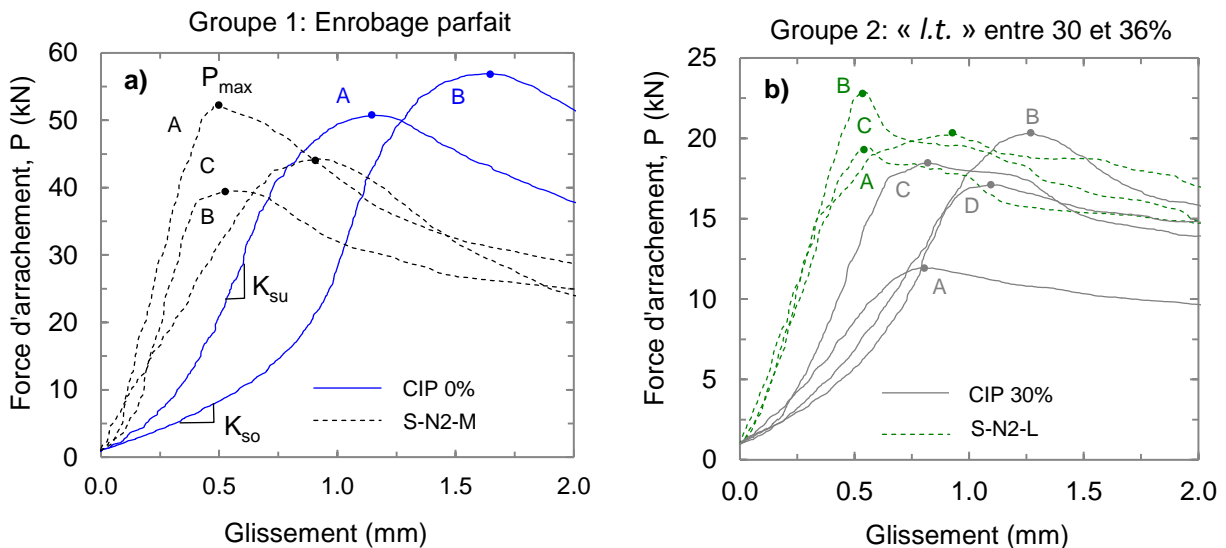


Figure 6. (a) Courbe force - glissement pour les éprouvettes coulées et projetées sans et (b) avec vides

La moyenne et l'écart type pour chaque groupe et chaque paramètre sont montrés au tableau 2. Ces valeurs permettent de calculer une statistique t_0 (suivant une distribution *t-student*) et les degrés de liberté associés à celle-ci avec lesquelles on peut par la suite calculer la *valeur-p* (en anglais *p-value*). C'est en comparant cette valeur contre un seuil (α) préalablement établie par *le décideur* qu'on peut déterminer si les moyennes obtenues par les deux méthodes de mise en place du béton sont statistiquement égales ou non. Une *valeur-p* plus grande que α confirme avec un niveau de confiance ($1 - \alpha$) que les moyennes sont égales. Dans cette étude, α a été choisie comme 0.05 (niveau de confiance de 95 %). Les résultats du test pour chaque

paramètre sont présentés au tableau 2; \underline{E} et D indiquent des moyennes égales et différentes respectivement en se basant sur le seuil α établi.

Tableau 2: Résultat de la comparaison du type « Welch »

Groupe	Paramètre	Moyennes	Écart - types	t_0	ν	valeur-p	Résultat [‡]
S-N2-M	P_{max} (kN)	45.4	6.6	1.70	2.9	0.189	\underline{E}
		53.8	4.4				
vs. CIP 0%	K_{so} (GPa)	65.3	20.3	3.29	2.8	0.051	\underline{E}
		22.1	8.4				
(Enrobage parfait)	K_{su} (GPa)	108.6	44.1	0.67	2.1	0.572	\underline{E}
		91.5	4.5				
S-N2-L	P_{max} (kN)	20.7	2.0	1.76	4.8	0.142	\underline{E}
		17.0	3.6				
vs. CIP 30%	K_{so} (GPa)	30.0	4.7	6.73	2.6	0.010	D
		10.6	2.1				
(« l.t. » entre 30 et 36%)	K_{su} (GPa)	46.4	6.5	4.11	4.8	0.010	D
		24.9	7.3				

[‡] \underline{E} : Moyennes égales ; D: Moyennes différentes (basé sur $\alpha = 0.05$)

D'abord, on constate que la force d'arrachement à l'ultime mesurée avec les *vides artificiels* est statistiquement similaire à celle trouvée avec les éprouvettes faits en béton projeté. Cependant, les barres d'armature encapsulées avec du béton coulé en place glissent plus que celles enrobées avec du béton projeté et ceci, indépendamment s'il y a des vides ou non. Ceci est probablement dû à la grande énergie avec laquelle le béton est compacté lorsqu'il frappe le coffrage et la barre, et aussi à la diminution du ressuage caractéristique en béton projeté. Selon la pente des courbes, il existe suffisamment d'évidence pour croire que le comportement à de petits glissements est différent entre les deux méthodes mais qu'une fois la fissuration se propageant vers la matrice cimentaire loin de la barre d'armature, le comportement se rapproche à celui observé en béton projeté. En effet, même si la comparaison entre la rigidité initiale (K_{so}) du premier groupe indique que les moyennes sont égales, le résultat est très proche du seuil α et elle est effectivement différente lorsqu'on compare les valeurs du deuxième groupe. De plus, on observe comment la rigidité finale (K_{su}) devient la même pour le groupe 1 lorsque la force d'arrachement à l'ultime est atteinte. Ceci n'arrive pas avec le groupe 2 puisque les éprouvettes se rompent avant de développer le même comportement. L'usage des *vides artificiels* est alors une option viable pour étudier l'impact qu'ils ont sur la perte d'adhérence en béton projeté. Il faut cependant reconnaître que les valeurs du glissement sont surestimées mais, en revanche, le comportement global de ces éprouvettes peut donner des indices importants tel que le seuil de la « l.t. » trouvé à la section 4.2 lequel devrait aussi se produire en béton projeté.

5. CONCLUSION

L'étendue de la perte d'adhérence causée par les vides derrière les barres d'armature a été étudiée. D'abord, des éprouvettes du type *pull-out* en béton projeté par *voie sèche* ont été créées en laboratoire et des vides derrière les barres ont été développés intentionnellement en faisant varier la *consistance* du mélange. La création d'un éventail adéquat de la *longueur transversale* des vides et l'obtention des propriétés mécaniques semblables parmi les éprouvettes avec cette technique s'est avérée considérablement difficile étant donné la sensibilité des différents facteurs à ajuster avant la projection (vitesse d'air, quantité d'eau ajoutée et lancier). Ainsi, des éprouvettes possédant les mêmes propriétés géométriques ont été coulés en place et les vides derrière les barres ont été reproduits avec du silicone.

Malgré le fait que les barres des éprouvettes coulées en place glissent plus que celles enrobées avec béton projeté, il est démontré que la valeur de la force à l'ultime correspond statistiquement à la valeur obtenue avec les éprouvettes faites en béton projeté. Des éprouvettes ayant des vides *artificiels* ont permis de détecter l'existence d'un seuil variant autour 20% de la *longueur transversale* à partir duquel l'adhérence est réduite de façon significative. Des *longueurs transversales* plus petites que ce seuil produisent un comportement similaire aux résultats trouvés avec des barres parfaitement bien enrobées. En outre, il est important de souligner comment l'énergie de compaction en béton projeté produit une interface barre-béton améliorée comparativement au béton coulé en place ayant des propriétés semblables. Ultérieurement, cette stratégie pour recréer des vides pourra être appliquée (en considérant ses limitantes) pour proposer des facteurs de modification à l'équation pour le calcul de la *longueur de développement* en utilisant des éprouvettes plus représentatives du champ de contraintes des éléments en flexion tel que l'éprouvette du type *beam-end* décrit par la norme ASTM A944-10 (2015).

REFERENCES

- ACI 318-14 (2014) Building code requirements for structural concrete and commentary, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, USA.
- ACI 408-03 (2003) Bond and development of straight reinforcing bars in tension, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, USA.
- ASTM A944-10 (2015) Standard test method for comparing bond strength of steel reinforcing bars to concrete using beam-end specimens, *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C117-13 (2013) Standard test method for materials finer than 75- μm (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing, *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C143-15a (2015) Standard test method for slump of hydraulic cement concrete, *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C1604-05 (2012) Standard test method for obtaining drilled cores of shotcrete, *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C231-17 (2017) Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method, *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D1558-10 (2010) Standard test method for moisture content penetration resistance relationships of fine-grained soils, *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, USA.
- Clark, A.P. (1946) Comparative bond efficiency of deformed concrete reinforcing bars, *Journal of Research*, 37: 399-407.
- Crom, T.R. (1981) Dry mix shotcrete nozzling, *Concrete International*, 3: 80-93
- CSA A23.3-14 (2014) Design of concrete structures, *Canadian Standards Association*, Toronto, ON, Canada.
- fib* (2000) Bond of reinforcement in concrete - State-of-the-Art report (Bulletin 10), *Fédération Internationale du Béton*, Lausanne, VD, Suisse.
- Jirsa, J.O. et Breen, J.E. (1981) Influence of casting position and shear on development and splice length - Design recommendations, *The University of Texas*, Austin, TX, USA.
- Johnston, D.W. et Zia, P. (1982) Bond characteristics of epoxy-coated reinforcing bars, *North Carolina State University*, Raleigh, NC, USA.
- Lutz, L.A. et Gergely, P. (1967) Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete, *American Concrete Institute*, 64: 711-721.
- Montgomery, D.C. (2009) *Design and analysis of experiments*, 7^{ème} éd., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Nagi, M. et Whiting, D. (1994) Determination of water content of fresh concrete using a microwave oven,

- Cement, Concrete and Aggregates*, 16: 125-131.
- Soylev, T.A. et Raoul F. (2003) Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete Research*, 33: 1407-1415.
- Treece, R.A. et Jirsa, J.O. (1989) Bond strength of epoxy-coated reinforcing bars, *ACI Materials Journal*, 86: 167-174.

MERCI À NOS PRÉCIEUX COMMANDITAIRES



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil
et de génie des eaux



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton

Québec 



LA référence



Association
Canadienne
du Ciment



QUEBEC &
E. ONTARIO



www.bm-underground.com



Ciment Québec



EUCLID CANADA



INTERNATIONAL
CONCRETE REPAIR
INSTITUTE

SECTION
du Québec



LAFARGE