

DÉFAUTS À L'INTERFACE BARRE D'ARMATURE-BÉTON ET LEUR INFLUENCE SUR L'ADHÉRENCE

Pasquale Basso Trujillo[§], Marc Jolin[†] et Bruno Massicotte[‡]

§ Étudiant au doctorat, Université Laval.

† Professeur titulaire, ing., Ph. D., Université Laval

‡ Professeur titulaire, ing., Ph. D., École Polytechnique de Montréal

RÉSUMÉ

Les défauts derrière les barres d'armature représentent un problème courant dans les structures en béton armé. Qu'ils soient créés par une mauvaise consolidation, une forte accumulation d'eau de ressuage sous les barres d'armature ou une mauvaise technique de projection du béton, l'adhérence entre l'acier et le béton qui l'entoure peut être considérablement réduite. Certaines études démontrent une possible relation entre cette perte d'adhérence et le périmètre des barres d'armature encore en contact avec le béton coulé sur place, et ce, peu importe le type de béton. D'autres études en béton projeté suggèrent également une relation avec l'aire transversale de ces vides. Cependant, ces recherches concordent avec le fait qu'une telle réduction est liée principalement à la géométrie des vides alors que les propriétés mécaniques des matériaux jouent un rôle secondaire. Conséquemment, cet article a pour but de présenter les résultats trouvés par ces chercheurs ainsi qu'analyser les résultats d'une première phase de l'étude en cours afin de faire le lien entre la géométrie des vides et leur influence sur l'adhérence acier-béton. Ceci a été possible par le recueil et l'analyse des données tels la force ultime et le glissement des barres lors des essais d'arrachement où des vides artificiels de différentes tailles ont été disposés sur les barres d'armatures. Finalement, les paramètres géométriques des vides influençant l'adhérence font l'objet d'une discussion qui inclue une réflexion sur le calcul de la *longueur de développement* des barres en traction tel que proposé par la norme CSA A23.3-04.

INTRODUCTION

Lorsqu'on conçoit un élément en béton armé, on considère que l'adhérence entre le béton et l'acier (adhérence) est parfaite^[1, 2]. Les barres d'armature requises sont par la suite prolongées sur une distance additionnelle appelée « *longueur de développement* » pour qu'elles puissent atteindre leur pleine capacité, c.-à-d., leur plastification^[3]. La *longueur de développement* des barres en traction, selon la norme CSA A23.3-04, se calcule par l'équation 1.

$$\ell_d = 1.15 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{(d_{cs} + K_{tr})} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} A_b \quad ; \quad \text{avec } K_{tr} = \frac{A_{tr} f_{yt}}{10.5 s n} \quad (1)$$

Cette dernière (voir liste de symboles à la fin) a été développée à la suite d'une régression non linéaire à partir des résultats obtenus avec des poutres en flexion^[4] présentant une rupture par fendage.

En réalité, lors du chargement, les barres d'armature sont capables de glisser à l'intérieur de l'élément; phénomène attribué à la différence entre les modules de Young des deux matériaux. D'autres aspects liés à la conception des mélanges et aux techniques de placement du béton peuvent également être responsables de glissements excessifs si la qualité d'enrobage des barres d'armature est compromise.

Un mélange instable (rapports eau/liant élevé ou distribution granulaire inadéquate) susceptible de provoquer le tassement de ses constituants solides peut inciter la remontée

d'eau libre dans le béton frais sous la forme d'eau de ressuage et occasionner la présence de vides à l'interface acier-béton^[5, 6]. Dans les éléments de grande hauteur, par exemple les colonnes et les murs, plus la quantité de béton frais sous les barres est grande plus la taille des vides augmente^[5-7]. Soylev et al.^[5] ont constaté que ces vides représentent jusqu'à 30% du périmètre total des barres d'armature quand plus de 40 cm de béton (rapport E/L égal à 0,53) est placé sous elles; une réduction de 50% de l'adhérence a été observée par rapport aux éprouvettes avec 15 cm du béton placé sous les barres d'armature. De plus, ils ont observé que l'adhérence diminue linéairement et proportionnellement avec la longueur des vides en contact avec la barre d'armature et ce, indépendamment de la résistance à la compression du béton.

Une mauvaise consolidation peut également causer des vides autour des barres d'armature et provoquer une perte d'adhérence. Whiting et al.^[8] ont observé avec des essais d'arrachement, une perte d'adhérence de 50% pour une consolidation faite à 95% de ce qui est normalement désiré, et ce, indépendamment du type de gros granulat employé. Avec la présence accrue des vides de consolidation, le mode de rupture des éprouvettes a changé de fendage du recouvrement à l'arrachement de la barre. Ils mentionnent qu'un glissement de 0,25 mm représente la limite critique d'utilisation des structures puisque, au-delà de ce chiffre, elles peuvent subir des dommages significatifs^[8, 9].

Quand la projection du béton est utilisée pour sa mise en place (béton projeté), la création des vides est majoritairement attribuable à l'expérience insuffisante des lanciers. Si le béton projeté possède une consistance¹ sèche, des vides peuvent se former derrière les barres d'armature. Cependant, si la consistance est adéquate, mais la technique de projection ne l'est pas, des lentilles de sable (une zone poreuse constituée des granulats fins) se forment. Ces deux types de défauts peuvent entraîner des pertes d'adhérence significatives. Gagnon et al.^[10] n'ont pas observé une réduction significative de la contrainte d'adhérence avec des essais d'arrachement faits en béton projeté quand la taille des vides derrière les barres était inférieure à 9.5 mm (approximativement 20% du périmètre des barres 15M) en hauteur, largeur et épaisseur. Cependant, au-delà de ces dimensions, ils ont constaté une diminution importante de la contrainte d'adhérence.

Dans la présente étude de recherche, l'influence de la taille et la longueur des vides recréés de manière artificielles sur l'adhérence a été étudiée à l'aide d'essais d'arrachement; la force d'arrachement ainsi que le glissement des barres ont été mesurés puis analysés.

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Trois séries avec un total de 18 éprouvettes d'arrachement ont été construites. Afin de recréer les vides qui se présentent avec une mauvaise consolidation derrière les barres d'armature, des défauts artificiels faits en silicone ont été collés sur leur surface. Trois différentes tailles des vides et deux longueurs sur la barre ont été testées; elles ont été sélectionnées à partir de l'expérience acquise et l'analyse des carottes prélevées lors des nombreuses certifications de lanciers de béton projeté faites à l'Université Laval.

¹ Terme communément utilisé pour caractériser la maniabilité du mélange.

Essais d'arrachement

Les éprouvettes ont été coulées dans des coffrages en bois de 600 x 450 x 150 mm comme il est montré à la Figure 1. Le démoulage s'est fait 24 heures après la coulée, puis une période de cure de sept jours a suivi immédiatement après avec l'utilisation d'une toile de jute maintenue constamment humide. Les blocs ont été coupés le long des lignes pointillées montrées à la Figure 1 afin d'obtenir trois éprouvettes de 150 x 150 x 285 mm. Chacune d'entre elles contenait une longueur non-adhérée où la barre d'armature est couverte par une manche de PVC puis une longueur adhérente (ℓ_d) à l'extrémité. La longueur d'adhérence pour les deux premières séries a été de $4d_b$ et de $2.5d_b$ pour la troisième. La première et la troisième série possédaient des défauts artificiels tout le long de ℓ_d alors que pour la deuxième, les défauts ne correspondaient qu'à la moitié de ℓ_d (placés au centre de celle-ci). Deux éprouvettes identiques ont été construites pour chaque condition testée.

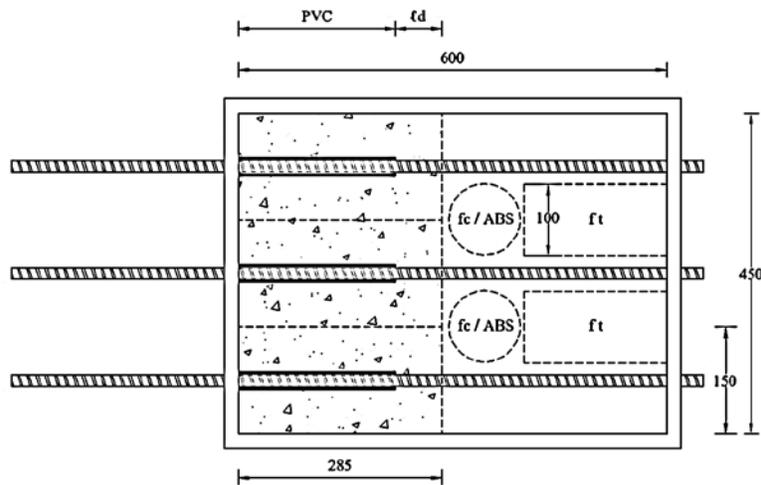


Figure 1: Coffrage pour trois éprouvettes (mm).

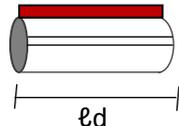
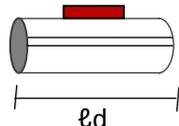
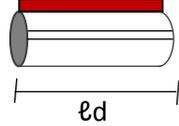
Vides artificiels

Du silicone a été placé dans des tubes flexibles de 3/16", 3/8" et 5/8" (D.I.) et laissé jusqu'à durcissement complet. Par la suite, les tubes flexibles ont été coupés afin d'extraire les morceaux de silicone et ceux-ci ont été coupés en deux sur le plan longitudinal. La surface des barres a été délimitée avec du ruban à masquer avant de coller les vides artificiels (aussi avec du silicone). Le ruban a été enlevé une fois la silicone complètement durcie. Les trois différentes tailles des vides ont été associées aux qualités d'enrobage « bonne », « inadéquate » et « médiocre »; « excellente » a été utilisée pour les éprouvettes sans vides. Les éprouvettes ont été nommées de la façon suivante: « Q - L - R » où:

Q = Qualité d'enrobage, E, B, I et M en ordre décroissant de qualité d'enrobage
L = Longueur des vides (si 'il a lieu), 1.0 ou 0.5 fois la longueur ℓ_d
R = Réplique, A ou B.

Le Tableau 1 présente un résumé de la quantité des éprouvettes dans chaque série ainsi que la longueur et position des vides sur la longueur d'adhérence.

Tableau 1: Géométrie des vides

Série	Éprouvette	ℓd (mm)	Position des vides
1	E-A	64	
	E-B		
	B-1.0-A		
	B-1.0-B		
	I-1.0-A		
	I-1.0-B		
	M-1.0-A		
M-1.0-B			
2	I-0.5-A	64	
	I-0.5-B		
	M-0.5-A		
	M-0.5-B		
3	E-A	40	
	E-B		
	B-1.0-A		
	B-1.0-B		
	I-1.0-A		
I-1.0-B			

Propriétés des matériaux

Le béton a été fait à partir des sacs préensachés pour béton projeté. Le rapport E/L a été de 0,45 pour les trois séries et, afin de garder la maniabilité du mélange, du superplastifiant a été ajouté. Le Tableau 2 montre les proportions du mélange. Seulement des barres d'armature 15M de grade 400 MPa ont été utilisées.

Tableau 2: Proportions du béton (kg/m^3)

Ciment Portland type I	398.1
Fumée de Silice	34.8
Gros granulat†	719.3
Granulat fin	1032.0
Eau	196.3
Plastol 341 (ml/100kg de liant)	500.0

† Diam. nom. max. de 10 mm

Procédure des essais

Des essais de teneur en air sur le béton frais (ASTM C231) et d'affaissement (ASTM C143) ont été exécutés pour chaque série après le malaxage. Les essais d'arrachement, testés à 21 jours, ont été accompagnés par des essais de résistance en compression (ASTM C39), de résistance au fendage (ASTM C496) et d'absorption (ASTM, C642) faits sur des carottes extraites à partir des moules de départ (voir Figure 1). Le calcul du module de Young (ASTM 469) à partir des cylindres coulés sur place a également été effectué. La longueur des vides artificiels en contact avec les barres d'armature ainsi que leur aire

transversale ont été mesurées à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) à partir des photos de haute résolution des vides artificiels. Lors des essais d'arrachement, la force et le glissement de la barre ont été suivis (le glissement est mesuré à l'aide de deux potentiomètres linéaires comme il est montré à la Figure 2).

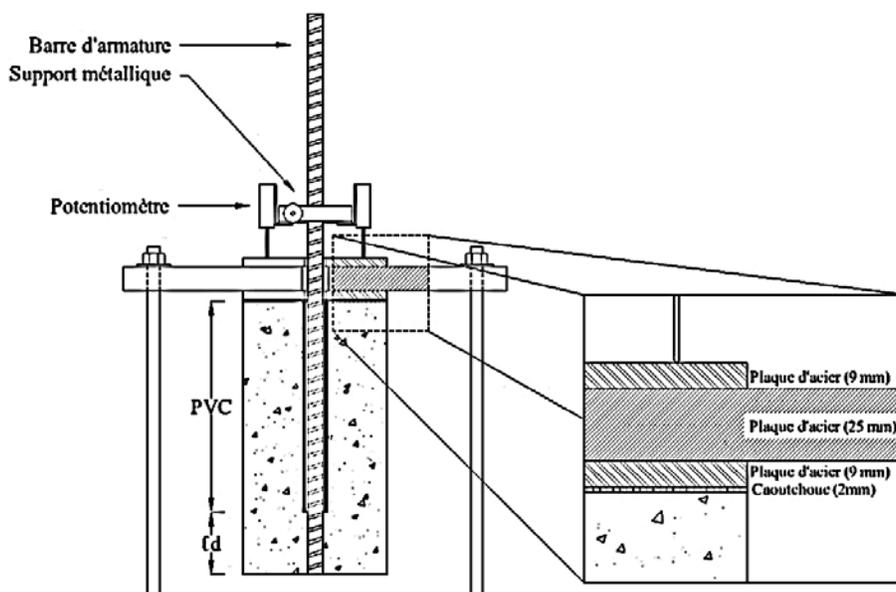


Figure 2: Montage pour l'essai d'arrachement

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Propriétés des matériaux

Les résultats des essais pour chaque série sont montrés au Tableau 3. Tel que souhaité, les propriétés mécaniques entre chaque série sont semblables, et ce, même s'il y a eu une plus grande variabilité entre les mesures d'air et d'affaissement. Le pourcentage d'air reste un peu plus élevé que pour des bétons normaux. Ceci s'explique par l'utilisation de sacs préensachés pour béton projeté. Aussi, l'affaissement relativement élevé était nécessaire pour bien enrober les vides artificiels et ne pas en créer davantage.

Tableau 3: Proportions du béton

Séries	Air (%)	Affaissement (mm)	$f_{c \text{ core}}$ (MPa)	$f_{t \text{ core}}$ (MPa)	$f_{c \text{ cyl}}$ (MPa)	E_{cyl} (GPa)	Absorption (%)	Vides perméables (%)
1	3.9	200	51.8	3.5	56.8	33.0	6.7	14.8
2	3.7	150	49.7	3.5	55.3	31.6	6.5	14.4
3	5.0	157	48.9	3.2	59.7	32.0	6.3	14.0

Taille des vides

La Figure 3 montre les photos prises et analysées avec le logiciel CAO afin de mesurer la longueur des vides en contact avec les barres d'armature. Le but étant de calculer le

pourcentage de cette longueur par rapport au périmètre nominal de la barre (*périmètre non-adhéré*). En général, les qualités d'enrobage « *Bonne* », « *Inadéquate* » et « *Médiocre* » représentent des *périmètres non-adhérés* de 10, 20 et 35 % respectivement.

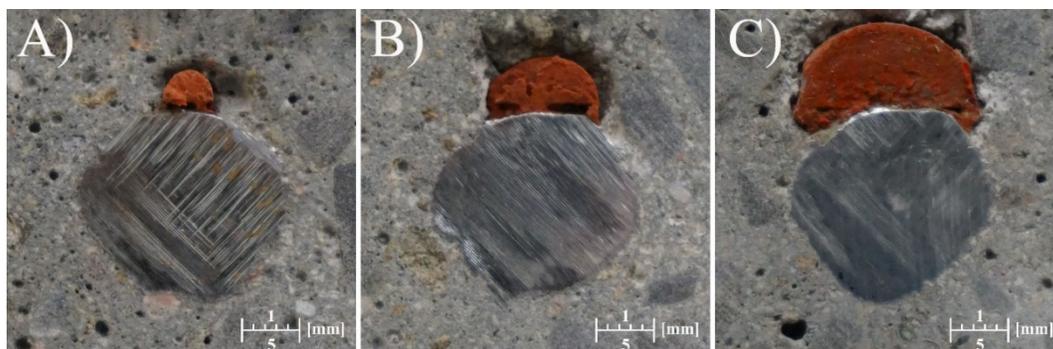


Figure 3: Photos des vides artificiels A) “Bonne”, B) “Inadéquate” et C) “Médiocre”

Efficacité d'adhérence

À partir de la force ultime d'arrachement mesurée, *l'efficacité d'adhérence*, définie comme le ratio entre la charge ultime d'une éprouvette (P_i) sur la charge ultime de l'éprouvette sans défaut de la même série (P_{max}) a été calculée. Ainsi, nous sommes capables de comparer la performance des éprouvettes à l'ultime en présence des vides derrière les barres d'armature et d'observer jusqu'à quel point un défaut d'une taille donnée diminue la résistance à l'arrachement de l'éprouvette. La Figure 4 montre *l'efficacité d'adhérence* pour les trois séries en fonction du *périmètre non-adhéré*.

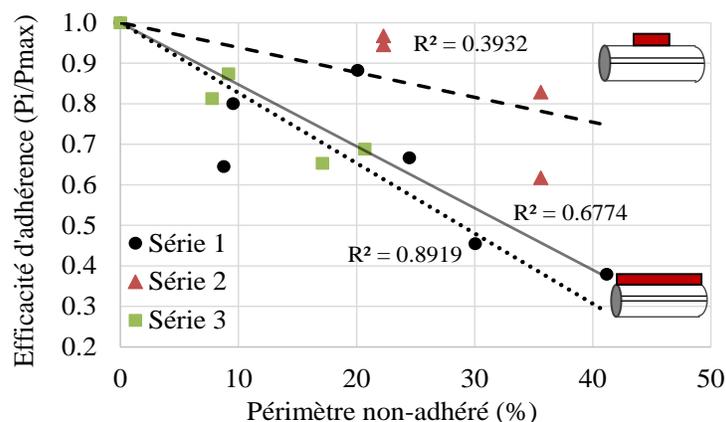


Figure 4: Efficacité d'adhérence

On observe comment *l'efficacité d'adhérence* diminue linéairement avec *l'augmentation du périmètre non-adhéré*. Ceci est en accord avec les résultats présentés par Soylev et al.^[5]. Il reste toutefois difficile de prédire la perte d'efficacité puisqu'elle semble être dépendante de la longueur du défaut. En effet, si les vides sont présents seulement sur une petite partie, la réduction d'efficacité (représenté par les lignes de tendance) est moins importante que si le vide est présent sur toute la longueur ℓ_d . Nonobstant, la réduction entre les séries 1 et 3

est similaire, indiquant que pour la géométrie d'éprouvettes testées, la longueur ℓ_d ne semble pas avoir d'impact. Ceci s'avère une constatation importante puisque les barres sans défaut dans la série 1 se sont plastifiées avant la rupture; la réduction d'efficacité d'adhérence pour la série 1 devrait alors être plus prononcée. Cependant, puisque les résultats de la série 3 montrent une réduction semblable, on peut considérer la perte d'efficacité de la série 1 encore représentative du phénomène. Pour la série 1, une perte d'efficacité moyenne de 0,42 pour une qualité d'adhérence « *Médiocre* » a été observée. Le défi demeure encore à identifier quelle perte d'efficacité devient inacceptable.

Glissement versus charge appliqué

Le glissement des barres mesuré à l'aide des potentiomètres a été analysé afin d'évaluer l'influence de la taille et la longueur des vides sur le comportement des éprouvettes. La Figure 5 montre les mesures obtenues lors de cette étape pour la série 1. Comme il a été mentionné précédemment, les barres sans défaut (E-A et E-B) dans cette série se sont plastifiées avant que l'adhérence cède. Ceci est montré par le glissement excessif en forme de plateau une fois la contrainte d'érouissage est atteinte ($f_y = 430$ MPa dans ce cas) comme on peut le voir sur la Figure 5.

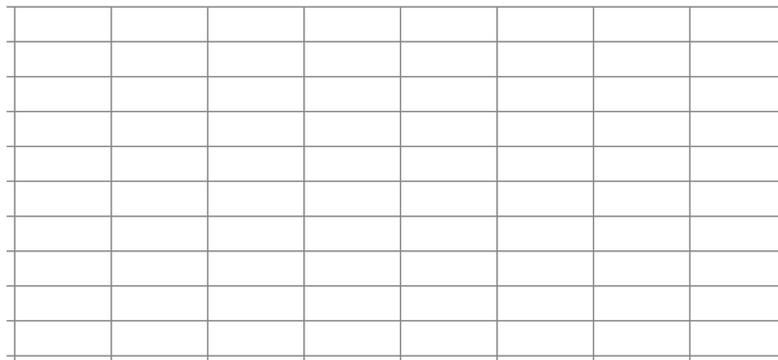


Figure 5: Glissement Vs. Charge pour la série 1

Le glissement de 0,25 mm considéré auparavant comme critique par d'autres chercheurs^[8, 9] a été choisi pour comparer la performance des éprouvettes relative au glissement. La contrainte d'adhérence (τ) sur la longueur ℓ_d des éprouvettes a été considérée uniforme étant donné sa courte longueur. Elle a été calculée par l'équation 2 (voir liste de symboles à la fin) en enlevant la surface des vides en contact avec la barre d'armature (S_v).

$$\tau = \frac{P_g}{\pi d_b \ell_d - S_v} \quad (2)$$

La Figure 6 montre la contrainte d'adhérence (τ) versus le *périmètre non-adhéré* pour la valeur de glissement limite considérée. On constate qu'au-delà d'un *périmètre non-adhéré* d'approximativement 20% (surface ombrée sur la Figure 6), l'adhérence devient

considérablement inférieure par rapport aux éprouvettes où la qualité d'enrobage est « *excellente* », et ce, peu importe la longueur du défaut. Cette importante réduction est appréciable seulement pour les séries 1 et 2. La série 3 confirme que des *périmètres non-adhérés* à l'intérieur de cette limite sont encore acceptables; la contrainte d'adhérence est semblable à celle des éprouvettes où la qualité d'enrobage est « *excellente* ». Il semble alors qu'il existe une limite du *périmètre non-adhéré* pour lequel le comportement relatif au glissement n'est pas compromis. Ainsi, les structures en béton armé possédant des barres d'armature dont leur qualité d'enrobage reste à l'intérieur de cette valeur limite peuvent encore être acceptables. Cependant, afin d'assurer leur efficacité d'adhérence, la longueur de l'ancrage (ℓ_d) devra être prolongée.

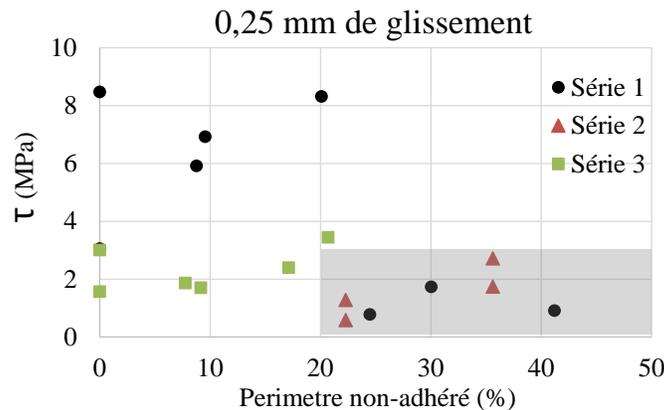


Figure 6: Comportement relatif au glissement

Si la pratique démontre, par exemple, qu'une procédure de mise en place donnée peut occasionner des *périmètres non-adhérés* de 20%, la longueur de l'ancrage pourrait être augmentée de $1/0,65 \approx 1.6$ (voir Figure 4 pour un *périmètre non-adhéré* de 20% et vides sur le long de ℓ_d pour la série 3). Avec la même procédure on pourrait augmenter l'ancrage de $1/0,85 \approx 1.20$ afin de conserver l'efficacité d'adhérence optimale pour des *périmètres non-adhérés* de 10%.

Ces « coefficients » ne peuvent pas, bien sûr, s'appliquer directement à cause de la relativement faible quantité d'éprouvettes testées à ce jour. De plus, d'autres facteurs comme la corrosion pourraient occasionner une perte additionnelle d'efficacité d'adhérence^[5] si la présence des vides a un effet direct sur la pénétration d'eau, d'oxygène ou d'agents agressifs comme le chlore; davantage de recherche est nécessaire. Il est toutefois intéressant de noter que la valeur limite du *périmètre non-adhéré* de 20% est en accord avec les résultats trouvés par Gagnon et al.^[10]

Type de rupture Vs. Calcul de ℓ_d avec la norme CSA A23.3-04

Comme il a été mentionné précédemment, seulement le type de rupture par fendage est considéré par l'équation de la norme pour le calcul de ϕd ; le type de rupture observé plutôt dans cette étude a été l'arrachement de la barre. L'analyse faite ici doit alors être vérifiée avec des éprouvettes à faible recouvrement afin d'obtenir le fendage du recouvrement comme mode de rupture et pouvoir apporter des recommandations adéquates pour la norme. Ainsi, une deuxième phase similaire à celle-ci, mais avec des éprouvettes représentant des poutres en flexion, est prévue (ASTM A944).

CONCLUSION

À partir de l'analyse et discussion présentée dans la section précédente, on peut conclure ceci :

1. L'adhérence diminue avec la présence des vides; plus le *périmètre non-adhéré* est grand, plus l'*efficacité d'adhérence* est réduite. Cette relation est fortement influencée par la largeur des vides.
2. Pour le comportement relatif au glissement, un *périmètre non-adhéré* de 20% a été trouvé critique; indépendamment de la longueur des vides.

Ces résultats démontrent que la présence des vides derrière les barres d'armature peut occasionner une réduction importante de l'adhérence. Puisque le calcul des ouvrages en béton armé est basé sur l'hypothèse que l'adhérence est parfaite, des révisions dans la norme doivent être considérées lorsque la présence des vides derrière les barres d'armature est possible. Une compréhension fondamentale de l'adhérence en présence des vides est requise et doit être étudiée plus en détail afin d'apporter des recommandations pour le calcul de la *longueur de développement*. Ainsi, la réalisation et l'analyse des essais additionnels avec une plus grande quantité d'éprouvettes ainsi que l'utilisation des éprouvettes représentant des poutres en flexion sont nécessaires.

LISTE DES SYMBOLES

A_b	= Aire transversale des barres d'armature (L^2)
d_b	= Diamètre nominal des barres d'armature (L)
A_{tr}	= Aire totale des barres transversales dans le possible plan de rupture (L^2)
d_{cs}	= Le plus petit de: <ul style="list-style-type: none"> (a) La distance du centre de la barre jusqu'à la surface libre la plus proche (L); ou (b) Deux tiers de l'espacement c/c entre deux barres d'armature (L)
f_y	= Contrainte d'écrouissage de l'acier (M/LT^2)
f'_c	= Contrainte ultime du béton à la compression (M/LT^2)
f_{yt}	= Contrainte d'écrouissage de l'acier transversal (M/LT^2)
k_1	= Facteur de position de la barre d'armature
k_2	= Facteur de recouvrement de la barre d'armature

k_3	= Facteur du poids pour le béton
k_4	= Facteur de taille de barre d'armature
ℓ_d	= Longueur de développement (L)
n	= Quantité des barres à développer sur le plan de rupture
s	= Espacement entre les aciers transversaux (L)
Pi	= Charge ultime pour une éprouvette donnée (ML/T ²)
Pg	= Charge à un glissement donné (ML/T ²)
τ	= Contrainte d'adhérence (M/LT ²)
Sv	= Surface du vide en contact avec la barre d'armature (L ²)

BIBLIOGRAPHIE

- 1 CAC, (2005), "Concrete Design Handbook", *Canadian Portland Cement Association*, Ottawa, CA.
- 2 Massicotte, B., (2013), "Calcul Des Structures En Béton Armé - Concepts De Base", *Ed. Da Vinci*.
- 3 Treece, R. A., (1987), "Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcing Bars (M. Sc.)", *The University of Texas*, Austin, TX, 116 p.
- 4 Orangun, C. O., Jirsa, J. O. et Breen, J. E., (1975), "The Strength of Anchor Bars: A Reevaluation of the Test Data on Development Length and Splices" - 154-3F, *The University of Texas*, Austin, TX, 78 p.
- 5 Soylev, T. A., et François, R., (2003), "Quality of Steel-Concrete Interface and Corrosion of Reinforcing Steel", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, N. 9, pp. 1407 - 1415.
- 6 Khayat, K. H., (1998), "Use of Viscosity-Modifying Admixture to Reduce Top-Bar Effect of Anchored Bars with Fluid Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, N. 2, pp. 158 - 167.
- 7 Jirsa, J. O. et J. E. Breen, (1981), "Influence of Casting Position and Shear on Development and Splice Length - Design Recommendations" - 242-3F, *The University of Texas*, Austin, TX, 45 p.
- 8 Whiting, D., Seegebrecht, G. W., et Tayabji, S., (1987), "Effect of Degree of Consolidation on Some Important Properties of Concrete", *Special publication*, Vol. 96, pp. 125 - 160.
- 9 Avi, M., (1992), "Steel-Concrete Bond in High-Strength Lightweight Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, N. 1, pp. 76 - 82.
- 10 Gagnon, F., (2004), "Enrobage De L'armature Dans Le Béton Projeté: Évaluation Et Effets (M. Sc.)", *Université Laval*, Sainte-Foy, 166 p.