

Quatorzième édition des Journées scientifiques  
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

Sherbrooke, Québec, Canada  
22-23 août 2013

## EFFET DE L'ENDOMMAGEMENT SUR LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES DALLES ÉPAISSES EN BÉTON ARMÉ ET MÉTHODES DE RENFORCEMENT

M. Fiset<sup>A</sup>; F.-A. Villemure<sup>A</sup>; J. Bastien<sup>A</sup>; D. Mitchell<sup>B</sup>; B. Fournier<sup>A</sup>.

A Centre de recherche sur les infrastructures en béton, Université Laval, Québec, Canada

B Centre de recherche sur les infrastructures en béton, Université McGill, Montréal, Canada

**Résumé :** Plusieurs phénomènes de dégradations des ouvrages en béton armé sont la cause de déficiences structurales. Les ponts de types dalle épaisse sans armatures de cisaillement sont particulièrement sensibles à la dégradation du béton car ce matériau est le seul pouvant résister aux efforts de cisaillement. Cette recherche porte donc sur l'effet de l'endommagement du béton sur la résistance au cisaillement des dalles épaisses existantes et sur les moyens de les renforcer en cisaillement. Pour y arriver, trois axes de recherche sont étudiés : les effets de l'endommagement et de la réaction alcali-silice sur la résistance au cisaillement du béton, l'effet de l'endommagement du béton sur leur ancrage et les méthodes de postrenforcement. Le type de postrenforcement étudié consiste à installer des barres verticales à l'intérieur d'ouvertures percées dans la dalle et d'y ancrer des renforcements selon différentes méthodes : ancrage époxydique, ancrage mécanique interne ou externe.

### 1 INTRODUCTION

Les ouvrages d'art en génie civil sont conçus pour des durées de vie s'étalant de 75 ans à près de 100 ou 150 ans dans certains cas particuliers. Inévitablement, ces ouvrages se dégradent dès leur mise en service. La grande quantité de chantiers routiers et les sommes colossales investies au Québec depuis les 10 dernières années pour la réfection des infrastructures en sont la preuve. Avec le temps, plusieurs ouvrages ne répondent plus aux attentes de sécurité, d'efficacité et d'esthétisme requis.

Les dégradations en cause sont d'origines multiples. Au regard des connaissances actuelles, les matériaux utilisés lors de la construction de certains ouvrages pouvaient être mal adaptés aux conditions d'exposition auxquelles ils étaient soumis. Les cycles de gel-dégel, une exposition aux sels de déglaçage, la corrosion de l'acier et les réactions alcali-silice sont des exemples répandus d'endommagement des matériaux pouvant conduire à des défaillances结构urales prématuées des ouvrages.

Également, les conditions d'exploitation des ouvrages sont sujettes à évoluer avec le temps. Par exemple, la vocation d'un bâtiment peut changer, modifiant ainsi les charges ou la classe de l'ouvrage (normal vers protection civile). Également, le trafic routier a grandement augmenté (en termes de charges et de volume), entre le moment de la conception de certains ponts et l'utilisation en étant fait aujourd'hui. A ceci

s'ajoute l'évolution des normes de conception qui reflètent l'avancement des connaissances du domaine. Un bon exemple est la prise en compte de l'effet d'échelle dans le mécanisme de résistance au cisaillement des éléments en béton armé. Ce n'est qu'à partir des années 80 qu'il a été reconnu que la profondeur d'une dalle réduit la résistance moyenne au cisaillement du béton.

L'effondrement du viaduc de la Concorde en 2006 à Laval (Québec) est un exemple de premier plan. La rupture menant à l'effondrement de ce viaduc s'est produite dans sa partie en porte-à-faux, zone constituée d'une dalle épaisse sans armatures de cisaillement. La commission d'enquête menée sur cet effondrement, communément appelée *Commission Johnson* (Johnson et coll. 2007) a identifié plusieurs causes probables de l'effondrement du viaduc : matériaux de l'époque montrant des problèmes de durabilité vis-à-vis les cycles de gel-dégel; conception se basant sur les normes de l'époque et qui ne sont plus nécessairement compatibles aux normes actuelles; construction et réparations qui n'ont pas respecté les plans et les devis, et dont l'exécution a produit des désordres plus importants que ceux présents à l'origine. Par ailleurs, cet évènement a soulevé un questionnement sur la capacité en cisaillement des dalles épaisses existantes et corolairement a mis en évidence la nécessité de développer et de mettre en place des techniques de renforcement en cisaillement adaptées à ce type de structure.

La littérature scientifique présente quelques méthodes de renforcement en cisaillement de poutres mises à l'épreuve expérimentalement. Parmi celles-ci, l'ajout de barres verticales (NSM)(De Lorenzis et Nanni, 2001) et l'ajout de gaines polymères (Barros et Dias, 2006 ; Adhikary et Mutsuyoshi, 2006) ancrées en surface de la poutre par différents adhésifs. Bien que ces méthodes puissent renforcer efficacement une poutre, l'ancrage des renforcements à la surface latérale de la section de béton soulève des questions concernant leur efficacité pour un élément de largeur importante, telle une dalle épaisse. D'ailleurs, cela est d'autant plus problématique, car ces renforcements sont ancrés dans la surface la plus exposée aux agents agresseurs et dans le béton le plus endommagé d'une structure, soit le béton d'enrobage. Plus récemment, l'ajout de barres d'armature verticales ancrées par adhésif époxydique à l'intérieur d'une dalle et renforcées par une plaque sous la dalle a permis de procurer un renforcement en cisaillement efficace contre le poinçonnement d'une dalle mince (Fernández-Ruiz et coll., 2010). Toutefois, peu d'études ont été réalisées sur des dalles épaisses pour lesquelles l'effet d'échelle peut influencer la résistance au cisaillement.

De façon parallèle, le béton est le principal matériau résistant au cisaillement dans une dalle. L'étude de l'influence de l'endommagement sur la résistance au cisaillement est donc primordiale. En effet, une meilleure connaissance de la résistance au cisaillement d'un béton endommagé permet une meilleure évaluation de la capacité portante, et peut ainsi permettre d'éviter de renforcer ou de reconstruire inutilement un ouvrage. La réaction alcali-silice (RAS) est un type d'endommagement provoqué par une réaction entre certaines phases siliceuses des granulats avec les hydroxydes présents dans la solution interstitielle du béton. Le produit de cette réaction est la formation d'un gel expansif dans les granulats. En résulte ainsi la formation de contraintes de traction dans la matrice cimentaire et la fissuration du béton. Cet endommagement s'accompagne d'une réduction des propriétés mécaniques : résistance à la compression, résistance à la traction et rigidité du matériau. Cependant, la littérature ne présente pas une conclusion unique en ce qui a trait à la résistance au cisaillement d'une dalle. Les auteurs qui ont étudié le comportement d'une poutre avec étriers en cisaillement ont trouvé, pour la plupart, que la réaction alcali-silice (RAS) n'a pas un impact réel sur le comportement structural (Koyanagi, Rokugo et coll., 1986; Fuji; Kojima et coll., 1986; Abe, Kikuta et coll., 1989; Ahmed, Burley et coll., 1998; Den Uijl, Kaptijn, 2002; Multon, Dubroca et coll., 2004.). En fait, la précontrainte chimique (précontrainte de l'armature de flexion suite à l'expansion du béton provoquée par la RAS) permet d'augmenter la résistance au cisaillement. Les études de Chana, Thompson (1992) et Inoue, Mikata et coll., (2012), ont cependant permis d'observer un effet négatif de la RAS, dû à une perte d'ancrage des barres d'armatures de flexion et des étriers.

## 1.1 Problématique

L'expérience et la littérature montrent que la résistance au cisaillement des ouvrages endommagés est un sujet à approfondir. D'une part, plusieurs ouvrages de génie civil arrivent à la fin de leur vie utile et

montrent des signes d'endommagement, ce qui peut engendrer des déficiences structurales. D'autre part, le calcul de la capacité portante d'une structure existante endommagée et calculée avec les normes et les charges d'aujourd'hui peut conclure à une capacité insuffisante de l'ouvrage. Également, la littérature montre que l'endommagement du béton affecte grandement l'ancrage des armatures de flexion et de cisaillement.

La RAS est un type d'endommagement retrouvé dans les structures exposées en béton. Bien que la RAS puisse avoir un effet négatif sur les propriétés mécaniques du béton et sur l'ancrage des armatures, elle peut néanmoins permettre d'augmenter la résistance au cisaillement par le phénomène de précontrainte chimique. Cet aspect demande également à être approfondi afin d'éviter le renforcement ou le remplacement inutilement une structure atteinte de RAS. Ainsi, dans le cas où effectivement une structure montre une carence au niveau de la résistance au cisaillement, un moyen de renforcer ces structures en cisaillement (dit postrenforcement en cisaillement) doit être disponible. Dans le cas des dalles épaisses, la littérature et les normes en vigueur ne permettent pas de mettre aisément de l'avant un renforcement adéquat. En effet, les normes actuelles (CAN/CSA S6-06; AASHTO LRFD 2007) ont été développées afin de concevoir deux types de structures, les éléments de béton sans étriers et les éléments en contenant la quantité minimale recommandée. Les structures existantes en béton et postrenforcées ne sont donc pas couvertes par ces normes, puisque les étriers ne peuvent évidemment pas être disposés au cœur de l'élément avant la coulée.

## 1.2 Objectifs

Ce programme de recherche a donc pour objectif global d'étudier l'effet de l'endommagement et de la RAS sur le comportement en cisaillement des structures de type dalle épaisse, d'identifier une méthode de postrenforcement efficace en cisaillement et de proposer une méthode de calcul pour leur dimensionnement. L'ancrage des renforcements dans un béton endommagé et l'effet de cet ancrage sur la résistance au cisaillement est l'un des paramètres importants étudiés dans cette recherche.

## 2 PROGRAMMES DE RECHERCHE

Le programme de recherche entrepris comporte trois axes de recherche réalisés conjointement. Une première étude a permis d'étudier l'effet de différentes méthodes de postrenforcement sur la résistance au cisaillement de dalles épaisses composées de béton sain (Provencher 2011; Cusson 2012; Fiset 2012). Des essais expérimentaux de flexion trois points ont été réalisés à l'Université Laval sur 17 tranches de dalles épaisses (poutres). Parmi celles-ci, six tranches de dalle ne comportaient pas de renforcements en cisaillement, une poutre était renforcée avant la coulée du béton par des étriers standards et les 10 autres poutres ont été renforcées en cisaillement uniquement après la prise finale du béton (postrenforcées). Le type de postrenforcement étudié consiste à installer des barres verticales à l'intérieur de la structure existante. Pour y arriver, des ouvertures doivent être percées dans la dalle selon différentes configurations et des barres de renforcement doivent y être ancrées selon différentes méthodes : ancrage chimique époxydique, ancrage mécanique interne ou externe. Il a ainsi été possible d'observer des gains en résistance au cisaillement pouvant atteindre 145%. Il a également été possible de reproduire à l'aide du logiciel d'analyse par éléments finis VecTor2 (Wong et Vecchio 2002) le comportement des différentes tranches de dalle. Ce Logiciel d'analyse par éléments finis est utilisé afin de vérifier l'influence de plusieurs paramètres, tels l'ancrage des postrenforcements et leurs espacements. Ces analyses sont toujours en cours de réalisation.

L'analyse du comportement des 17 poutres testées en laboratoire a confirmé que le comportement de l'ancrage est un paramètre important gouvernant la capacité des postrenforcements à reprendre les efforts. Cette affirmation est également corroborée dans la littérature (Khalifa et coll. 1998, De Lorenzis et Nanni 2001, Rizzo et coll. 2009). De plus, la loi de comportement régissant le comportement adhésion-glisement ( $\tau-s$ ) de l'armature ancrée s'avère nécessaire pour une modélisation numérique du comportement global de ces éléments en béton à l'aide du logiciel d'analyse par éléments finis VecTor2. Ainsi, une seconde étude est réalisée sur le comportement des ancrages époxydiques dans un béton sain et dans un béton endommagé. À ce jour, 10 essais d'arrachements ont été réalisés sur des cubes de

béton sain. D'autres essais sont en cours de réalisation et ont pour objet l'adhésion dans un béton sain et dans un béton endommagé par la RAS. Étant donné la haute réactivité des granulats utilisés dans le mélange de béton, la matrice est endommagée par un réseau complexe et multidirectionnel de microfissurations. Les tests servent à caractériser l'effet de cet endommagement sur l'adhésion chimique de l'acier d'armature ainsi que sur le type de rupture à l'ultime. Ce choix de variante s'explique par le désir de vouloir reproduire en laboratoire une structure ayant subi un endommagement au cours de ses années de service. Le but est ainsi de mieux comprendre le comportement du lien béton-époxy-acier pour un ouvrage réel, à la suite du postrenforcement.

L'effet de l'endommagement et de la réaction alcali-silice est le cœur du troisième axe de cette recherche. Douze dalles épaisses de béton armé non renforcées en cisaillement, et attaquées par la RAS sont testées en laboratoire sous un essai de flexion trois points. Les matériaux utilisés ont été choisis afin d'obtenir l'expansion due à la RAS dans un court délai. Le gros granulat utilisé est un gravier naturel provenant de la région d'Albuquerque, au Nouveau-Mexique. Il a été sélectionné à cause de son degré élevé de réactivité. Les dimensions des tranches de dalles des axes de recherche 1 et 3 de ce programme sont similaires.

### 3 CARACTÉRISTIQUES DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

#### 3.1 Tranches de dalles

Des essais de chargement sont réalisés sur trois séries de poutres (tranches de dalle) de béton sain, soit les séries PP, BC et FP. La désignation des poutres XXY fait référence à la série XX et à la catégorie Y de la poutre chargée. Pour ces trois séries, chacune des poutres était conçue afin d'avoir une rupture en cisaillement. Elles avaient une portée libre de 4m et une largeur « b » de 610mm. Les propriétés des poutres et des renforcements des séries PP et BC sont résumées au tableau 1 et à la figure 1. La géométrie des poutres de la série FP est identique à celle de la poutre non renforcée PP3.

Tableau 1 : Description des poutres saines renforcées

Poutre	Ancrage	h [mm]	d [mm]	a/d	P <sub>flex</sub> [%]	s [mm]	s/d <sub>v</sub>	A <sub>v</sub> [mm <sup>2</sup> ]	f <sub>c</sub> [MPa]
PP1	Époxy	450	370	3,60	3,10	240	0,72	400	32,5
PP2	Époxy	450	398	3,35	2,06	260	0,73	200	35,2
PP3	Époxy	750	698	2,87	1,17	470	0,75	400	35,0
BC1	Étrier standard	750	694	2,88	1,65	380	0,61	400	33,3
BC2	Époxy	750	694	2,88	1,65	380	0,61	400	34,5
BC3	Époxy	750	694	2,88	1,65	380	0,61	400	32,6
BC4	HSLG	750	694	2,88	1,65	380	0,61	292	31,5
BC5	Plaque	750	694	2,88	1,65	1000	1,60	1290	31,2

Pour chacune des catégories de poutres PP (PP1, PP2 et PP3) 2 poutres non renforcées et 2 poutres renforcées ont été chargées. La méthode de renforcement utilisée pour la série PP et la poutre BC2 consiste à introduire à des espacements précis une barre d'armature dans des ouvertures verticales forées à partir du haut de la poutre et à les combler y en injectant un adhésif époxydique. Une résine époxy commerciale Hilti Re-500-SD est utilisée pour l'ancrage des postrenforcements des poutres de la série PP et des poutres BC2 et BC3. La poutre BC1 contient des étriers conventionnels tel que prescrit par la norme canadienne. C'est d'ailleurs le seul spécimen de poutre pour lequel les renforcements en cisaillement ont été disposés avant la coulée du béton. La poutre BC3 contient des renforcements insérés à la fois à partir du bas et du haut de la poutre et se chevauchant à la mi-hauteur. La poutre BC4 a été renforcée par des armatures verticales filetées insérées dans des ouvertures percées du haut de la poutre. Elles sont ancrées au haut de la poutre par une plaque d'ancrage boulonnée et par un ancrage mécanique expansif HSLG (figure 2). Lorsqu'elle est ouverte, la coquille de cet ancrage mécanique exerce une pression sur la surface de l'ouverture forée, ce qui permet d'ancrer la barre par friction. La

poutre BC5 a été renforcée par une seule paire de barres d'acier Dywidag haute résistance insérées dans des ouvertures percées sur toute la hauteur de la poutre et ancrées aux faces supérieure et inférieure par des plaques d'ancrage boulonnées.

Les essais réalisés sur des tranches de dalles de béton endommagé par la RAS correspondent à la série FP. La géométrie de ces dalles est la même que la série de dalles PP3, sans renforcements. Trois coulées de quatre dalles chacune sont prévues afin de fabriquer 12 corps d'épreuve montrant quatre différents niveaux d'expansion ( soit 0%; 0,07%, 0,14% et 0,22%). .

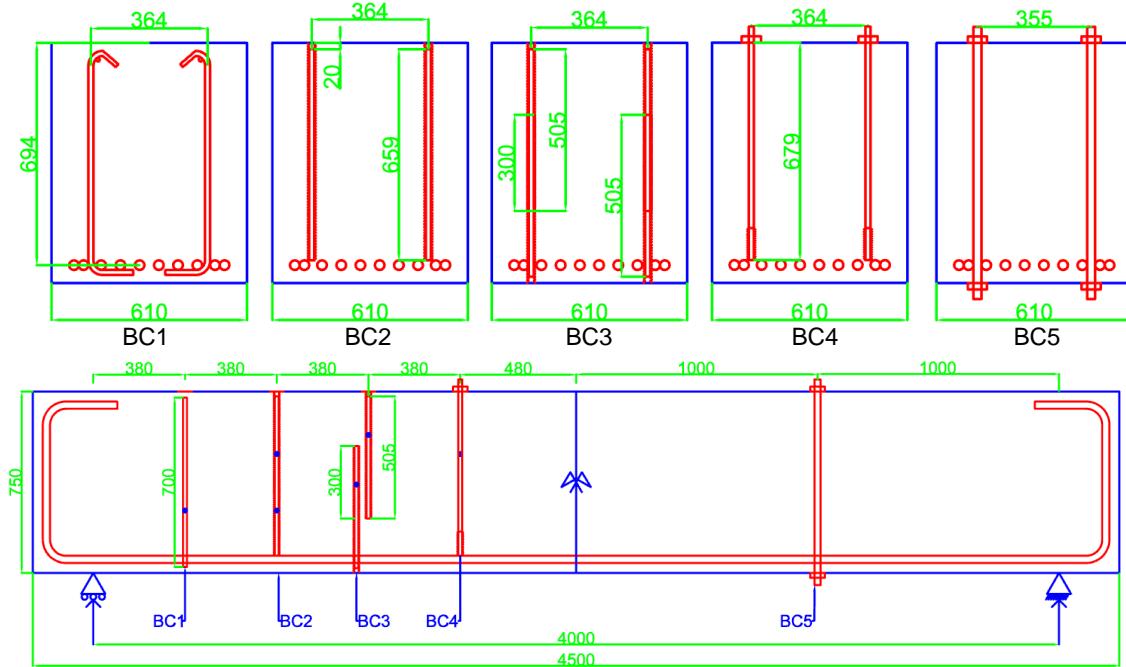


Figure1 : Poutres de la série BC

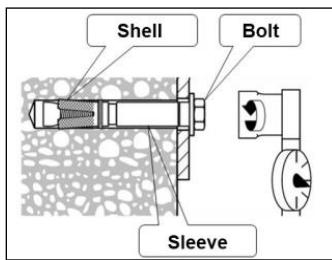


Figure 2: Ancrage HSLG utilisé pour la poutre BC4

### 3.2 Essais d'arrachement

Pour cet aspect de la recherche, trois séries de blocs sont testées afin de déterminer les caractéristiques de la colle époxy Hilti Re-500 SD ainsi que les longueurs de développement de barres d'armature. Les séries BC et MF ont permis de tester 10 blocs de béton sain ayant des longueurs d'ancrage entre 70 et 500mm (70, 75, 90, 160, 330 et 500mm) pour une barre 15M. Les blocs de longueur d'ancrage de 330mm et de 500mm étaient de 660mm et 1000mm de côté respectivement. Les autres blocs d'une longueur d'ancrage inférieure étaient de 320mm de côté.

La série FV va permettre de tester 18 blocs supplémentaires de béton sain et 18 blocs de béton endommagé par la RAS. Ces essais permettront de tester deux diamètres d'armatures (10M et 15M) et trois longueurs d'ancrages (30, 100 et 160mm). Tous les blocs de cette série sont de 350mm de côté.

Étant donné l'importance du contrôle du mode de rupture, les 100 premiers millimètres à partir de la face supérieure ne sont pas liés chimiquement à la barre d'acier. Cette technique permet d'augmenter le diamètre du cône de rupture et d'obtenir une rupture de type arrachement (« pullout »).

Les blocs des trois séries sont testés sous un montage semblable. La figure 3 présente le montage de la série MF. Le montage est composé d'une plaque de soutien en acier de 25,4 mm (1 po) d'épaisseur et de 405 mm (15,9 po) par 455 mm (17,9 po) de côté. À son centre se trouve une rotule permettant d'orienter le bloc durant le chargement de manière à obtenir une contrainte de traction «pure» (non représenté à la figure 3). Une plaque d'acier d'une épaisseur de 21 mm est située sous la rotule afin de permettre une distribution uniforme des contraintes à l'interface du bloc de béton. Suite aux recommandations de la norme ASTM E488/E488M-10, une feuille de polytetrafluoroéthylène (PTFE) est utilisée sur la surface supérieure du béton. Pour ces trois séries de blocs, la résistance à la compression du béton visée est de 35MPa et l'acier d'armature est de nuance 400W.

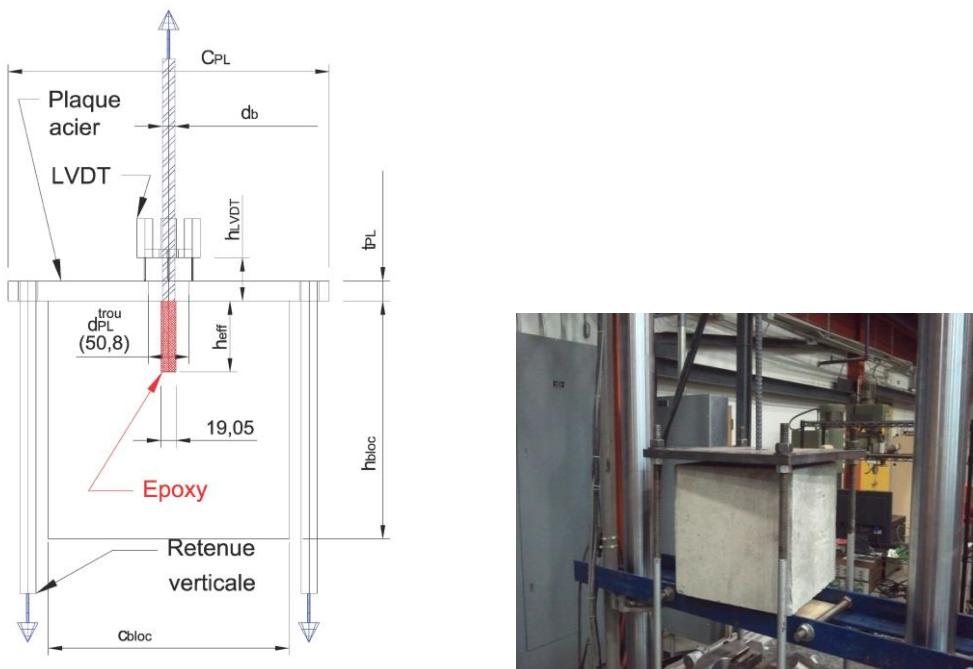


Figure 3 : Schéma d'un essai d'arrachement (Série MF)

## 4 RÉSULTATS ET ANALYSE

### 4.1 Essais sur poutres

La série PP a permis d'examiner l'influence de paramètres géométriques et d'espacement des postrenforcements sur le gain en résistance offert par l'ancrage époxydique. La série BC a permis d'examiner plusieurs méthodes de renforcement et de les comparer avec les étriers conventionnels spécifiés par les normes en vigueur. Quant à la série FP, elle va permettre d'examiner l'effet de l'endommagement et de la RAS sur la résistance au cisaillement. Cette série étant actuellement en cours d'essais, aucun résultat n'est disponible pour le moment.

Un résumé des résultats des poutres renforcées et des poutres sans renforcement est présenté aux tableaux 2 et 3 respectivement. La résistance au cisaillement  $V_{CSA}$  prédictive est calculée selon les spécifications de la norme canadienne (CAN/CSA S6-06, 2006). Cette méthode de calcul basée sur la *Théorie des champs de compression modifiés* (MCFT) (Vecchio an Collins 1986) considère la résistance totale comme étant la somme de la contribution du béton  $V_C$  et de la contribution des renforcements en

cisaillement  $V_s$ . La contribution du béton  $V_c$  est associée au produit entre la résistance en traction du béton et une constante  $\beta$ , constante fonction de la déformation longitudinale de la structure et de l'espacement des renforcements. La contribution  $V_s$  correspond à la charge menant à la plastification des renforcements traversant la fissure principale de cisaillement. Pour la poutre BC3, le chevauchement des barres à la mi-hauteur n'est pas considéré dans le calcul de l'aire des renforcements  $A_v$ .

Tableau 2 : Résumé des résultats pour les poutres renforcées en cisaillement

Poutre	$V_{exp}$ [kN]	$V_{CSA}$ [kN]	$V_{CSA}/V_{exp}$
PP1	466	591	1,268
PP2	297	417	1,409
PP3	498	680	1,366
BC1	767	796	1,038
BC2	756	801	1,060
BC3	942	794	0,843
BC4	579	787	1,356
BC5	843	893	1,059

Tableau 3 : Résumé des résultats pour les poutres sans renforcement

Poutre	$V_{exp}$ [kN]	$V_{CSA}$ [kN]	$V_{CSA}/V_{exp}$	$V_{renforcé}/V_{non-renforcé}$
PP1	320	275	0,860	1,456
PP2	286	274	0,960	1,037
PP3	342	363	1,061	1,454

Les résultats présentés au tableau 2 montrent que la procédure de calcul spécifiée par la norme canadienne actuelle pour les éléments renforcés en cisaillement ne permet pas de prédire adéquatement la résistance au cisaillement de la plupart des méthodes de postrenforcement. La norme de calcul en cisaillement surestime d'ailleurs la capacité de la poutre PP2 de 41%. Toutefois, les résultats présentés au tableau 3 permettent d'observer qu'avec un ratio moyen  $V_{CSA}/V_{exp}$  de 0,960, la norme canadienne actuelle prédit adéquatement la résistance en cisaillement des poutres sans renforcement. Le ratio de l'espacement  $s/d_v$  des renforcements en cisaillement influence également la résistance ultime. Ceci peut être observé, entre autres, avec les poutres renforcées de la catégorie PP3 et la poutre BC2. En effet, tel que présenté à la figure 4, l'espacement  $s/d_v$  de 0,75 utilisé pour la poutre PP3 a pour effet de permettre à la fissure de progresser près des extrémités de la barre. Par conséquent, la position de la fissure ne permet pas aux renforcements de développer pleinement leur capacité  $F_y$  avant leur décrochement.

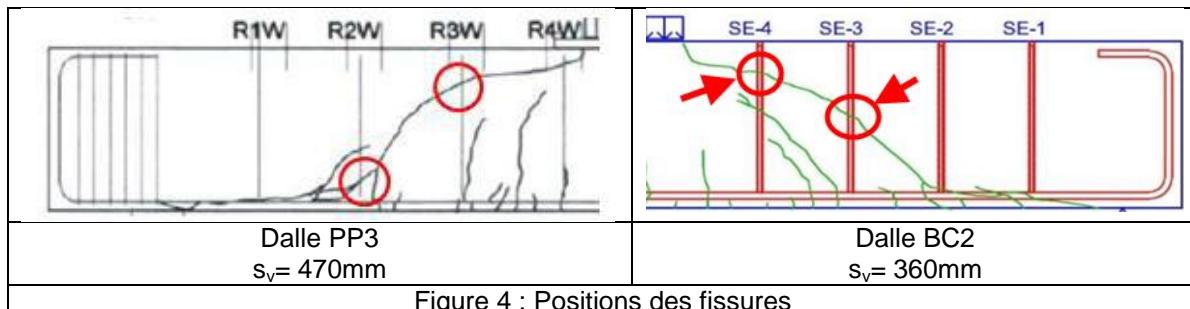


Figure 4 : Positions des fissures

L'utilisation d'un espacement inférieur d'environ 0,6 pour la poutre BC2 permet d'assurer le développement de la fissure de cisaillement plus près du centre du renforcement, ce qui assure un meilleur ancrage du renforcement et donc, le développement de sa pleine capacité. Ceci peut également être observé en comparant les poutres renforcées et non renforcées de la série PP. Avec un espacement  $s/d_v$  légèrement inférieur, le rapport des résistances  $V_{renforcé}/V_{non-renforcé}$  de la catégorie PP1 (1,46) est

beaucoup plus important que la catégorie PP2 (1,04). C'est donc que les postrenforcements ancrés par époxy ont besoin d'une longueur minimale d'ancrage afin de développer la capacité plastique de la barre. La position de la fissure critique est donc un paramètre majeur.

Parmi les méthodes de postrenforcement étudiées, toutes les méthodes ont permis d'augmenter la résistance au cisaillement d'une dalle. Par contre, l'ajout d'armatures verticales ancrées par époxy à la face supérieure de la poutre, telle que dans la poutre BC2, est la méthode qui semble la plus appropriée pour le postrenforcement d'une dalle épaisse. D'un point de vue pratique, son installation est simple, facile et rapide. En comparant avec la méthode utilisée pour la poutre BC3, la difficulté associée à la mise en place des postrenforcements depuis la face inférieure a nécessité un temps d'installation environ 4 fois plus important que la mise en place depuis la face supérieure de la poutre BC2. Cela permet donc de grandement limiter le temps de l'intervention, les coûts de main-d'œuvre et l'impact sur les utilisateurs de l'ouvrage. La mise en place de cette méthode a également pour avantage d'être installée à l'intérieur de la dalle existante. Aucun ancrage mécanique n'excède la hauteur de la dalle et aucune surépaisseur n'est nécessaire au-dessous ou en dessous de la dalle. Pour un pont existant, cela a pour avantage de conserver une hauteur libre parfois déjà limitante pour le trafic routier.

#### 4.2 Adhérence des barres

Les essais des séries BC et MF réalisés jusqu'à présent ont permis de déterminer la capacité en adhérence d'une barre d'armature ancrée par une colle époxydique dans un bloc de béton sain. Les ruptures obtenues ont donc été principalement par fendage des blocs de béton ainsi que par rupture de l'adhérence du béton à la colle époxydique. Deux autres types de ruptures ont été observés : la rupture de l'armature pour les longueurs d'ancrages supérieurs à 300mm et l'arrachement de l'armature à la suite de la plastification de celle-ci pour des ancrages de plus de 150mm. La figure 5 montre quelques résultats typiques d'essais d'arrachement.

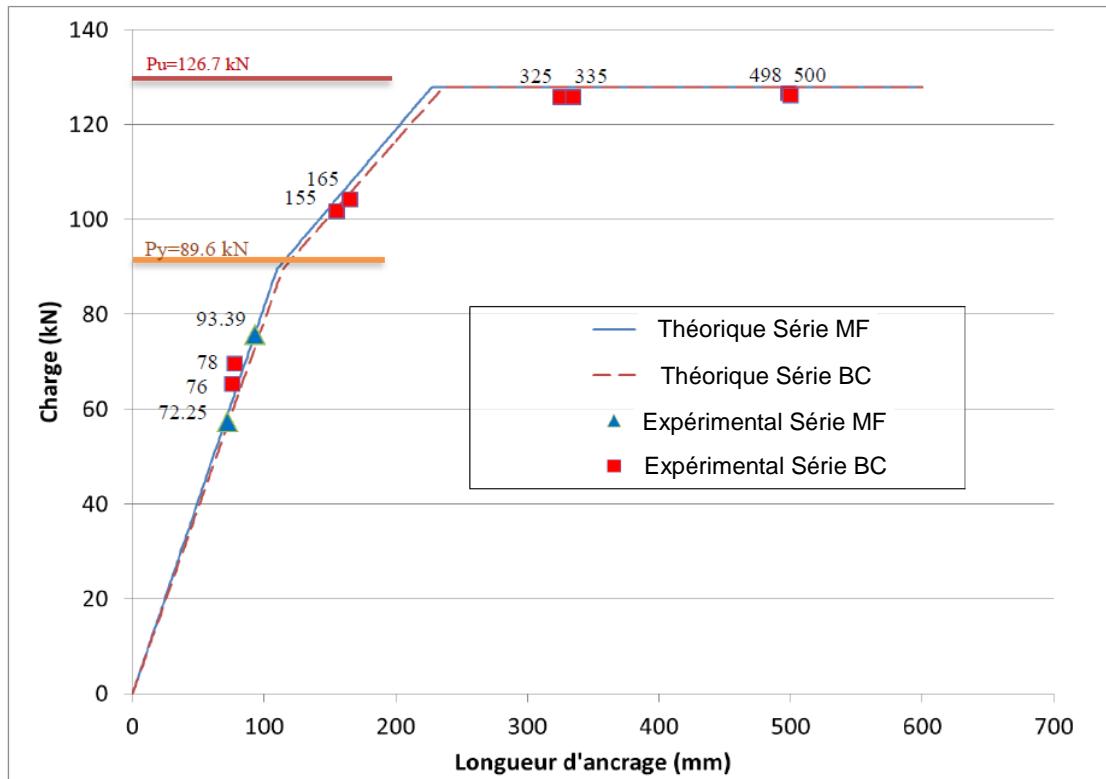


Figure 1: Comparaison de la résistance mesurée en fonction de la longueur d'ancrage (longueur d'ancrage indiquée pour chacun des points) et charge prédictive par CEB-FIP bulletin 58 (2011)

## 5 CONCLUSION

En somme, l'endommagement des matériaux, le développement continu des normes de conception, l'évolution de l'utilisation des ouvrages et les erreurs inhérentes à la conception et à la construction peuvent conduire à des désordres d'importance variable, résultants en des capacités portantes trop faibles et en des risques de défaillances structurales jugées inacceptables.

Il est donc important de pallier à ce problème afin de garantir la sécurité du public. Le choix de la solution doit répondre à plusieurs critères de sécurité, d'efficacité, de durabilité, d'esthétisme, économique, tout en minimisant les impacts sur les utilisateurs. À cet égard, il peut s'avérer intéressant de renforcer une structure, plutôt que de la remplacer complètement. L'effondrement du viaduc de la Concorde dans la zone en porte-à-faux, section constituée d'une dalle épaisse sans armatures de cisaillement, est un exemple de défaillance structurale. L'objet de cette recherche porte donc sur l'effet de l'endommagement du béton sur la résistance au cisaillement des dalles épaisses, et sur les moyens de renforcer en cisaillement ce type de structure. Pour y parvenir, trois axes de recherche analysent : 1) les effets de l'endommagement et de la réaction alcali-silice (RAS) sur la résistance au cisaillement des dalles, 2) les méthodes de postrenforcement applicables sur des structures de type dalles épaisses et 3) l'effet de l'endommagement du béton sur l'ancrage des postrenforcements.

Les travaux concernant l'influence de la RAS sont en cours de réalisation. Néanmoins, il est prévu que quatre niveaux d'expansion et d'endommagement seront testés par l'intermédiaire de 12 tranches de dalle. La littérature montre que le gonflement associé à la RAS peut engendrer une précontrainte chimique, ce qui pourrait permettre, selon certains auteurs, d'augmenter la résistance au cisaillement. Néanmoins, l'endommagement du béton réduit grandement sa résistance en traction et sa rigidité, ainsi que sa capacité d'ancrer les armatures.

À ce jour, quatre méthodes de postrenforcement ont été testées sur des tranches de dalles saines. Les travaux menés jusqu'ici montrent que chaque méthode a pu permettre d'augmenter la résistance au cisaillement des dalles. Leur efficacité varie cependant d'une méthode à l'autre. D'un point de vue pratique, et selon l'augmentation des capacités obtenues en cisaillement, la méthode la plus efficace est l'utilisation d'une colle époxydique pour ancrer des armatures insérées dans des ouvertures forées depuis le haut de la dalle. Avec une bonne conception, les capacités des dalles postrenforcées sont comparables à celles d'une dalle renforcée avant la coulée par des étriers standards, tel que prescrit par la norme CAN-CSA S6-06. Néanmoins, l'utilisation de l'espacement maximal permis par cette norme a montré que celle-ci n'est pas directement applicable pour des structures postrenforcées. Un effort de recherche est donc mené pour établir des limitations d'espacement du renforcement afin de guider le dimensionnement de ce type de postrenforcement. En effet, il appert que la position de la fissure critique de cisaillement limite les longueurs d'ancrage des postrenforcements. Ceux-ci peuvent donc glisser prématurément, avant l'atteinte de la plastification, et conduire à une ruine prématurée de l'ouvrage.

Le troisième axe de recherche étudie donc l'adhérence de ces postrenforcements lorsque présents tant dans un béton sain et dans un béton endommagé. Bien que cette recherche soit toujours en cours, les résultats obtenus à ce jour ont montré l'efficacité de la colle époxy utilisée. Une loi adhésion-glisser ( $\tau_s$ ) est en cours d'implantation dans le logiciel d'analyse par éléments finis VecTor2 afin de simuler le comportement jusqu'à l'ultime de dalles postrenforcées en cisaillement.

## 6 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la contribution de Philippe Provencher (M.Sc.), Benoit Cusson (M.Sc.) et François Pissot, étudiant à la maîtrise. Tous trois ont travaillé aux premières étapes de cette recherche. Également les auteurs tiennent à remercier le CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada), FRQNT (Fond de recherche du Québec - Nature et technologies), MTQ (Ministère des Transports du Québec) et le CRIB (Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton) pour leur support financier.

## 7 RÉFÉRENCES

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (4 ed.). Washington, DC, USA.
- Abe, M., S. Kikuta, et coll. (1989). Experimental Study on Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Members Affected by ASR. *The 8<sup>th</sup> International Conference on AAR*.
- Adhikary, B.B.; Mutsuyoshi, H. (2006) Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Various Techniques, *Construction and Building Materials*, 20: 366-373
- Ahmed, T., E. Burley, et coll. (1998). The State and Fatigue Strength of Reinforced Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction. *ACI Materials Journal* 95(4).
- ASTM E488/E488M-10 (2010): Standard Test Method for Strength of Anchor in Concrete Element, *ASTM International*, 21 pages.
- Barros, J.A.O.; Dias, S.J.E. (2006) Near Surface Mounted CFRP Laminates for Shear Strengthening of Concrete Beams, *Cement & Concrete Composites*, 28: 276-292
- Canadian Standards Association (2006) *Canadian Highway Bridge Design Code*, Canada
- CEB-FIP (2011): Design of Anchorages in Concrete: bulletin 58, 280 pages
- Chana, P. and D. Thompson (1992). Laboratory Testing and Assessment of Structural Members Affected by Alkali Silica Reaction. *The 9<sup>th</sup> International Conference on AAR*. 156-166
- Cusson, B. (2012) *Renforcement des dalles épaisses en cisaillement*, Université Laval, 142p.
- De Lorenzis, L.; Nanni, A (2001) Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with NSM Fiber-Reinforced Polymer Rods, *ACI Structural Journal*, 1: 60-68
- Den Uijl, J. A. and N. Kaptijn (2002). Structural Consequences of ASR: an Example on Shear Capacity. *Heron* 47(2): 125-139.
- Fernández-Ruiz, M.; Muttoni, A.; Kunz, J. (2010) Strengthening of Flat Slabs Against Punching Shear Using Post-Installed Shear Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 4: 434-442
- Fiset, M. (2012). Post-Installed Shear Reinforcement for Concrete Thick Slabs (Proceeding). *The 9<sup>th</sup> International PhD Symposium in Civil Engineering*, Karlsruhe Allemagne, 115-121.
- Fuji, M., T. Kojima, et coll. (1986). The Static and Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Beams with Cracking Due to Alkali-Silica Reaction. *The 7<sup>th</sup> International Conference on AAR*: 126-130.
- Inoue, S., Y. Mikata, et al. (2012). Residual Shear Capacity of ASR Damaged Reinforced Concrete Beams With Ruptured Stirrups. *The 14<sup>th</sup> International Conference on AAR*.
- Johnson, P.-M.; Couture, A.; Nicolet, R. (2007) Commission d'enquête sur l'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde, Rapport. *Gouvernement du Québec*, ISBN 978-2-550-50959-2, 201 pages.
- Khalifa, A.; Gold, W.-J.; Nanni, A.; Azziz, A. (1998) Contribution O Externally Bonded FRP To Shear Capacity of RC Flexural Members, *Journal of Composites for Structures*, 2: 195-202
- Koyanagi, W., K. Rokugo, et coll. (1986). Failure Behavior of Reinforced Concrete Beams Deteriorated by Alkali-Silica Reactions. *The 7<sup>th</sup> International Conference on AAR*: 141-145.
- Multon, S., S. Dubroca, et coll. (2004). Flexural Strength of Beams Affected by ASR. *12th International Conference on AAR*.
- Provencher P (2011) *Renforcement des dalles épaisses en cisaillement*, Université Laval, 119p.
- Rizzo, A.; De Lorenzis, L. (2009) Modeling of Debonding Failure for RC Beams Strengthened in Shear with NSM FRP Reinforcement, *Construction and Building Materials*, 23: 1568-1577.
- Vecchio, F.J.; Collins, M.P. (1986) The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *ACI Journal*, .2: 219-231
- Wong. P.-S.; Vecchio, F.-J. (2002) VecTor2 and FormWorks User's Manual. University of Toronto, 213p.