

RESURFAÇAGE ADHÉRENT DU TABLIER DU PASSAGE INFÉRIEUR GIROUARD À MONTRÉAL

R. Gagné ¹, N. Charest ², F. Pichette ¹, B. Bissonnette ³, F. Lauture ⁴, F. La Fontaine ²

1. CRIB, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, Québec

2. ROCHE ltée, Groupe-conseil, Montréal, Québec

3. CRIB, Université Laval, Département de génie civil, Québec, Québec

4. Ville de Montréal, Ponts et tunnels, Montréal, Québec

Résumé : La réparation à l'aide d'un resurfaçage mince adhérent consiste à enlever le béton détérioré à la surface d'une dalle pour le remplacer par une chape de béton adhérente. Durant l'été 2005, la Ville de Montréal a entrepris des travaux de réfection du passage inférieur Girouard situé à l'intersection de l'avenue Girouard et du boul. de Maisonneuve. Dans le cadre de ces travaux, les deux voies de circulation du tablier en béton armé (24 m x 9 m) ont été réparées avec deux types de resurfaçages adhérents ancrés mécaniquement. Un béton fibré à retrait compensé (avec agent expansif) a été utilisé pour la première voie de circulation et un béton fibré contenant un agent réducteur de retrait a été utilisé pour la seconde. La conception des deux types de resurfaçages a été basée sur les résultats d'une planche d'essais réalisée sur le tablier du pont du Cosmos durant l'automne 2002.

L'article présente une synthèse de l'étude structurale du tablier et l'analyse des contraintes de construction effectuée avant, pendant et après les travaux de resurfaçage. Il présente aussi les caractéristiques des bétons de resurfaçage, les détails de construction et le suivi de la performance en service des resurfaçages. L'analyse de la performance en service démontre que les bétons fibrés contenant un agent expansif ou un agent réducteur de retrait sont très bien adaptés pour les travaux de resurfaçage des tabliers de pont en béton armé.

INTRODUCTION

Les réseaux routiers canadiens et québécois comportent de très nombreuses infrastructures en béton armé présentant des problèmes sévères de durabilité. À chaque année, les propriétaires d'ouvrages doivent procéder à la réfection de nombreux ouvrages, dont notamment les tabliers de pont en béton armé. Habituellement, le béton du tablier est détérioré sur une profondeur assez faible (écaillage, dégradation par les cycles de gel-dégel, corrosion et délaminations au niveau des armatures supérieures). Les dalles des tabliers de pont en béton armé présentent généralement deux types de dégradations qui peuvent être catégorisées en fonction de la profondeur dégradée :

- Dégradation superficielle (profondeur dégradée 0 à 40 mm, armatures peu ou pas corrodées);
- Dégradation profonde (profondeur dégradée 0 à 100 mm, corrosion des armatures).

Une des approches de réparation consiste à n'enlever que le béton détérioré, nettoyer ou remplacer les barres corrodées (dans le cas d'une dégradation profonde) puis remettre en place un béton de réparation. Cette approche permet d'augmenter l'épaisseur, et possiblement la capacité structurale de la dalle réparée, en remplaçant le béton dégradé par une couche plus épaisse de béton de réparation. Pour pouvoir profiter pleinement des avantages de ce type de réparation, il

est essentiel de mieux comprendre l'influence des principaux paramètres de conception de la réparation (formulation du béton, préparation de la surface, méthode de mise en place, épaisseur du resurfaçage) sur la performance à long terme des resurfaçages adhérents. Le principal défi consiste à concevoir une réparation dont le béton de resurfaçage demeure parfaitement adhérent au support pour pouvoir développer une action composite en mesure de maintenir la capacité structurale de la dalle (Ong et al. 1997). Dans les zones de moment négatif, les réparations peuvent subir des sollicitations particulièrement défavorables car le béton de réparation est soumis à des contraintes de traction (fibre supérieure de la dalle) qui peuvent augmenter les risques de fissuration et de décollement (Granju et al. 1998).

Des recherches en laboratoire ont permis d'identifier les paramètres de conception qui influencent la performance d'un resurfaçage mince adhérent (Lemieux et al. 2004, Gagné et al. 2002, Benzerzour et al. 2005). Ces recherches ont permis de mieux comprendre l'influence de la composition du béton de réparation (BHP, latex, fibres), de la géométrie de la réparation (épaisseur, localisation de l'interface) et de la préparation de la surface sur la fissuration et le comportement structural d'éléments en béton armé soumis à des sollicitations cycliques en flexion. Globalement, les résultats ont montré qu'il est possible de réparer une dalle en béton armé à l'aide d'un resurfaçage adhérent tout en conservant la capacité structurale de l'élément réparé. Cependant, pour développer et maintenir une bonne adhérence, il est essentiel de prévoir une très bonne préparation de surface. De plus, la performance peut être très variable en fonction des caractéristiques du resurfaçage (type de béton, épaisseur, localisation de l'interface, fibres).

La planche d'essais du pont du Cosmos et le resurfaçage du passage inférieur Girouard ont été réalisés dans le but de valider certaines conclusions et recommandations dégagées suite aux études en laboratoire (Gagné et Morin 2005). Ces travaux visent à vérifier la performance en service de resurfaçages fabriqués avec différents types de bétons renforcés de fibres. Dans tous les cas, il a été décidé d'évaluer la performance en service de la configuration la plus critique, soit celle où les barres d'armature supérieures ne sont pas dégagées lors de la préparation de la surface.

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

Le passage inférieur Girouard, construit en 1960, est situé dans la ville de Montréal et permet le passage de l'avenue Girouard sous le boulevard de Maisonneuve et sous les voies ferrées du Canadian Pacific Railway. Le passage inférieur Girouard comporte une structure routière en rive nord (boul. de Maisonneuve) et une structure ferroviaire en rive sud (chemin de fer du Canadien Pacific). Ces deux ouvrages sont structurellement indépendants en raison de la présence d'un joint longitudinal entre les deux tabliers. Les travaux de resurfaçage ne concernent que le tablier de la structure routière (boul. De Maisonneuve). La Figure 1 présente une vue d'ensemble du passage inférieur Girouard.

La structure routière est un pont d'étagement de type dalle épaisse incluant un chasse-roues du côté sud et un trottoir de 2,1 m avec glissière du côté nord. Elle est constituée de quatre travées avec un biais gauche de 21° et une largeur hors-tout de 11,5 m incluant une voie de circulation dans chaque direction. Le tablier d'une longueur totale de 24 m est constitué d'une dalle en béton armé d'une épaisseur variant de 500 mm au cours d'eau jusqu'à 630 mm au centre du tablier. La couronne de la surface de roulement a donc été créée en variant l'épaisseur de la dalle. Le tablier

est supporté par deux culées et trois piles en béton armé formées d'un chevêtre et de deux colonnes en « V ». La Figure 2 présente une vue des piles ainsi que la coupe transversale du tablier.

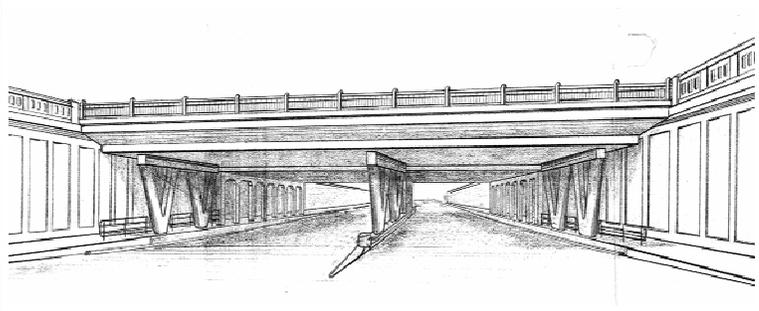


Figure 1 – Le passage inférieur Girouard vu de l'avenue Girouard en direction Sud.

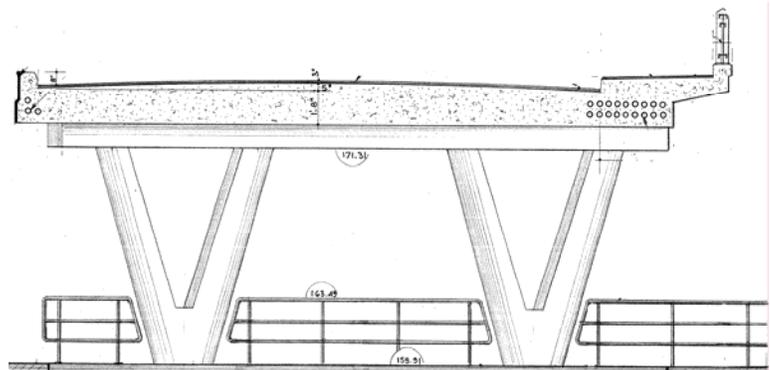


Figure 2 – Coupe transversale du tablier et vue des piles de la structure routière.

Le tablier est appuyé simplement aux culées alors qu'il est relié à la pile centrale à l'aide d'ancrages empêchant ainsi le mouvement horizontal tout en permettant la rotation. Il est également continu de la culée jusqu'à la pile centrale. Les piles latérales sont rotulées à chacune de leurs extrémités. Le modèle structural du pont est illustré à la Figure 3.

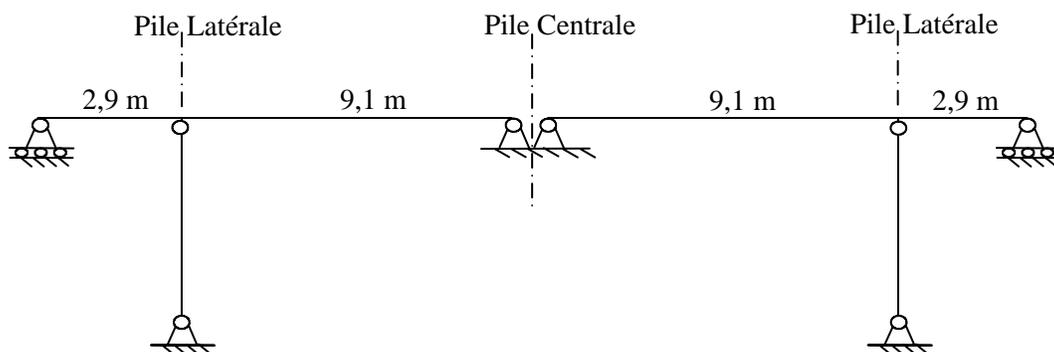


Figure 3 – Modèle structural du pont.

La dalle a fait l'objet d'une investigation détaillée afin de permettre un choix éclairé quant à l'approche de réfection à préconiser. L'investigation a comporté une inspection visuelle, le sondage de surfaces ainsi que le prélèvement de six échantillons. L'investigation a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- L'intrados de la dalle était en bon état ;
- La dalle présentait de la délamination au niveau du rang supérieur des armatures. Quatre des six échantillons ont révélé la présence de délaminations principalement localisées au niveau des aciers d'armature supérieurs ;
- Les premiers 60 mm de béton étaient fortement contaminés par les ions chlore (jusqu'à 440 ppm au niveau des barres d'armature supérieures). La contamination diminue rapidement et présente des valeurs en-deçà de la valeur critique pour des profondeurs supérieures à 60 mm.

STRATÉGIE DE RÉPARATION DU TABLIER ET ÉVALUATION STRUCTURALE

L'analyse de la compatibilité d'un resurfaçage en regard des pathologies observées sur le tablier en béton armé est d'une importance capitale. Dans le cas du passage inférieur Girouard, les pathologies observées correspondent aux pathologies typiques compatibles avec des travaux de réparation à l'aide de resurfaçages minces. En effet, l'intrados de la dalle est en bonne condition. On peut donc compter sur un support de bonne qualité. Les échantillons prélevés indiquent la présence d'un plan de délamination au niveau du rang supérieur des armatures. Ce désordre n'est pas causé par la corrosion puisqu'aucune trace de corrosion n'était présente sur les barres d'armature. Après avoir enlevé le béton en surface, dégradé et fortement contaminé par les ions chlore, le resurfaçage permet donc d'obtenir une surface de bonne qualité et une qualité du béton de support qui permette de développer une bonne adhérence et de bien fixer les ancrages.

Le choix d'intervention pour remettre en état une dalle en béton armé est gouverné par différents aspects autres que les désordres du tablier. L'ingénieur doit évaluer plusieurs paramètres qui vont principalement influencer les coûts des travaux, les coûts d'entretien et les coûts d'exploitation du tablier. Parmi ceux-ci figurent les contraintes inhérentes au projet (circulation, contraintes de réalisation, etc.), le modèle structural du tablier, les conditions d'utilisation projetées de l'ouvrage et l'état des éléments d'appui. Le choix judicieux du type d'intervention qui soit le mieux adapté à l'ensemble de ces paramètres permet au propriétaire du pont de réaliser des économies et de minimiser les coûts d'entretien et d'exploitation de l'ouvrage.

Dans le cas du passage inférieur Girouard, la solution d'un resurfaçage qui permet la réalisation des travaux tout en maintenant la circulation sur l'avenue Girouard s'est avérée la mieux adaptée. Cette solution permettait de respecter la principale contrainte du projet soit le maintien de deux voies de circulation opérationnelles sur l'avenue Girouard durant toute la durée des travaux. Contrairement au scénario de reconstruction du tablier, cette solution s'avère plus économique puisqu'elle ne nécessite pas de phasage particulier des travaux et ne nécessite pas la construction d'ouvrages temporaires afin de respecter la contrainte du maintien de la circulation.

Le bon état des éléments d'appui a également été un critère important dans le choix d'une réparation par resurfaçage du passage inférieur Girouard. En effet, le resurfaçage est une intervention judicieuse dans le cas où la durée de vie résiduelle des éléments d'appui est égale ou supérieure à la durée de vie anticipée du resurfaçage. Dans ce cas, le resurfaçage contribue à une utilisation plus judicieuse des ressources et du fait même s'intègre parfaitement dans le contexte du développement durable.

Analyse structurale du tablier

Plusieurs paramètres ont influencé les critères de conception d'un resurfaçage (choix des matériaux, méthode de mise en place, etc.). Dans le cas du passage inférieur Girouard, les caractéristiques du système structural ont joué une grande influence dans le choix final du type d'intervention. Cette section présente une synthèse des réflexions au niveau structural qui doivent guider le choix de l'approche à préconiser pour remettre en bon état la dalle du tablier.

Une analyse structurale du tablier a été réalisée incluant l'analyse des contraintes pendant et après les travaux de resurfaçage. Cette analyse a porté principalement sur les efforts occasionnés par les charges permanentes et les surcharges de construction (poids de la machinerie, des équipements incluant le finisseur à béton, etc.) conformément aux exigences de la norme CAN/CSA-S6-00 et du Manuel de Conception des Structures du MTQ. Les coefficients de pondération pour les surcharges de construction sont ceux mentionnés à l'article 3.16 du CAN/CSA-S6-00.

À la première étape, pendant les travaux de resurfaçage, le tablier est modélisé à partir de la section de tablier démoli. Sur cette section s'exerce le poids du tablier, le poids du béton frais du resurfaçage ainsi que les surcharges de construction mentionnées précédemment.

À la seconde étape, après les travaux de resurfaçage, le tablier est modélisé à partir de la section de tablier composite avec le resurfaçage. Sur cette section s'exerce le poids du tablier, du resurfaçage et de toutes les charges permanentes présentes. De plus, les surcharges routières et celles occasionnées par l'exploitation de l'ouvrage doivent être considérées conformément au CAN/CSA-S6-00.

L'analyse structurale du tablier a permis de dégager les conclusions suivantes :

- Pendant les travaux de resurfaçage, la démolition du dessus de la dalle en dégageant les barres d'armature supérieures entraîne la rupture de la dalle située au-dessus des piles latérales sous les surcharges de construction. Un tel scénario nécessite donc une réalisation des travaux par bandes alternées ou l'utilisation de soutènement temporaire. En raison des contraintes de circulation et de l'échéancier des travaux, la démolition retenue ne devait pas dégager les armatures supérieures.
- Pendant les travaux de resurfaçage, la démolition sans dégager les barres d'armature supérieures (sur environ 25 mm) présente une section dont la résistance (ELUL) est satisfaisante autant en zones de moment positif que négatif. De plus, ce scénario entraîne des flèches satisfaisantes dues aux charges permanentes additionnelles et aux surcharges de construction (ELUT) de l'ordre de $L/2200$.

- Suite aux travaux de resurfaçage, c'est-à-dire lorsque l'action composite entre le resurfaçage et le béton de support est complète, la résistance de la section est supérieure à celle du tablier avant réparation (en raison de la surépaisseur du resurfaçage). Aux états limites ultimes, le flux de cisaillement maximal à l'interface du resurfaçage et du béton de support est estimé à 0,35 MPa. Si on se base sur les résultats de la planche d'essais du pont du Cosmos, la scarification de la surface combinée à une mise en place et un mûrissement semblable à celui réalisé sur le passage inférieur Girouard (à l'exception de l'absence d'ancrages) a permis d'obtenir des contraintes d'adhérence à l'interface comprises entre 1,1 et 1,6 MPa. Ces valeurs sont supérieures à la valeur minimale de 0,9 MPa spécifiée dans la norme CSA A23.2 6B et permettent d'assurer l'action composite entre la dalle et le resurfaçage.

Ces conclusions ont permis d'arrêter le choix sur un resurfaçage adhérent, pour une épaisseur de démolition minimale de 25 mm au cours d'eau en raison du recouvrement de l'ordre de 30 mm. La reconstruction du resurfaçage a été fixée à une épaisseur variant entre 75 et 125 mm de façon à donner le profil voulu de la surface du tablier.

Ce projet est réalisé sur un ouvrage ayant un niveau de sollicitation plus sévère et un système structural différent de ceux généralement mentionnés dans la littérature (incluant le pont du Cosmos). De plus, le système structural nécessite de développer et de conserver une bonne adhérence entre le resurfaçage et le béton de support, notamment au-dessus des piles latérales, afin de conserver la capacité structurale du tablier. Pour ces raisons, il a été choisi d'utiliser des ancrages entre le resurfaçage et le tablier existant dans le but de maximiser le développement et le maintien de l'action composite du resurfaçage. L'action composite est importante puisqu'elle permet de maximiser la capacité structurale et la rigidité du tablier. Bien que le lien entre le resurfaçage et le béton de support semble suffisant pour assurer l'action composite, les ancrages vont permettre en cas de décollement partiel, d'en prévenir la propagation.

En contrepartie, l'action composite favorise la réflexion des fissures du béton de support dans le béton de resurfaçage. L'utilisation de fibres permet d'améliorer le comportement post-fissuration du béton en limitant l'ouverture des fissures ainsi que leur profondeur.

TRAVAUX DE RESURFAÇAGE

Le resurfaçage du tablier du passage inférieur Girouard a été réalisé dans le cadre d'un contrat de réparation qui incluait les murs de soutènement, les piles, les culées, la bande médiane, la dalle, le trottoir, les glissières et les gardes corps. Le trottoir supérieur (boulevard de Maisonneuve) a été complètement reconstruit, il n'est donc pas inclus dans les travaux de resurfaçage.

La surface supérieure de la dalle a été réparée à l'aide de deux types de bétons de resurfaçage. La moitié nord du tablier a été réparée à l'aide d'un béton à retrait compensé (BRC) renforcé de fibres d'acier. La moitié sud du tablier a été réparée à l'aide d'un béton contenant un agent réducteur de retrait (BRR) et renforcé par des fibres synthétiques. Chaque resurfaçage mesure approximativement 24 m de longueur et 4,5 m de largeur (Figure 4). Les travaux ont permis de remplacer l'enrobé bitumineux et les 25 premiers millimètres de béton à la surface de la dalle par une épaisseur variable de béton de réparation (Figure 5); le béton y constituant désormais la surface de roulement. Les resurfaçages ont une épaisseur minimale de 75 mm au cours d'eau et

une épaisseur maximale de 125 mm au centre du tablier (couronne). Les deux types de resurfaçage ont été ancrés mécaniquement dans la dalle de support à l'aide de tiges métalliques HILTI de 114 mm de longueur. Avant la mise en place du béton de resurfaçage, la surface scarifiée a été imprégnée de trois couches d'inhibiteur de corrosion.

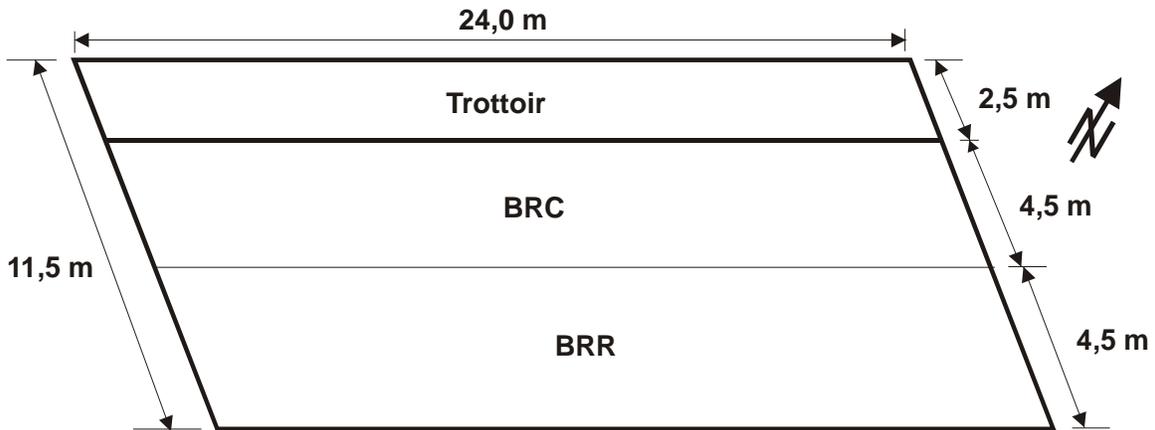


Figure 4 – Localisation et dimensions des resurfaçages.

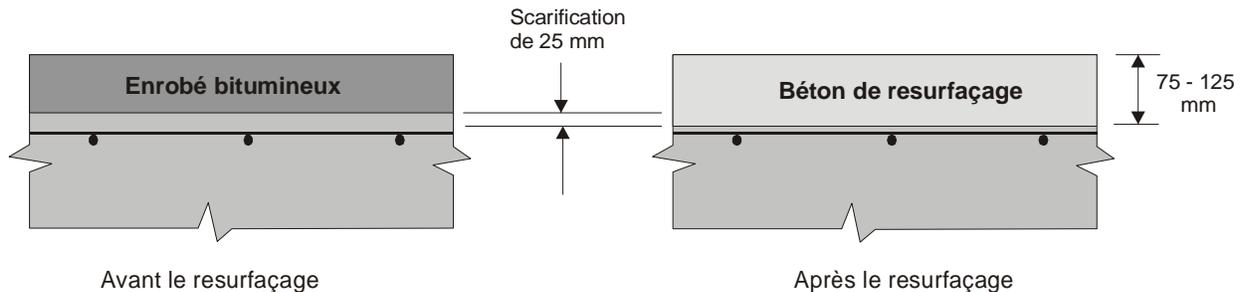


Figure 5 – Schéma du tablier avant et après le resurfaçage.

PROPRIÉTÉS DES BÉTONS

Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques de formulation et certaines propriétés des deux types de bétons utilisés pour le resurfaçage du tablier. Les deux types de bétons ont fait l'objet d'une coulée de convenance effectuée quelques jours avant le début des travaux de resurfaçage.

Le béton à retrait compensé (BRC) est renforcé de $40,0 \text{ kg/m}^3$ de fibres métalliques *Dramix 80/60*. Le béton contient 406 kg/m^3 de ciment Type GU et 24 kg/m^3 d'agent expansif de type *Conex*. Le béton livré au chantier avait un affaissement de 180 mm et une teneur en air au chantier comprise entre 7,8 % et 8 % (11 % au départ de l'usine). Aucun signe de ségrégation n'a été observé lors de la mise en place. La résistance à la compression de 35,3 MPa satisfait l'exigence minimale de 35 MPa à 28 jours. Le module élastique et le module de rupture sont respectivement de 32,4 GPa et de 5,1 MPa. Il s'agit de valeurs typiques pour un béton de

35 MPa. Le béton BRC possède un coefficient de fluage flexionnel de 4,8. Cette valeur relativement élevée indique que ce type de béton possède une bonne capacité de relaxation des contraintes de traction. Le facteur de durabilité de 100 % indique une excellente résistance à la fissuration interne due aux cycles de gel-dégel. La résistance à l'écaillage satisfait l'exigence de la norme NQ 2621-900 car la masse des débris à 56 cycles (367 g/m²) est inférieure à la limite maximale de 500 g/m².

Tableau 1 – Formulation et propriétés des bétons de resurfaçage.

Matériaux	BRC	BRR
Ciment (kg/m ³)	406 ¹	380 ²
Eau (kg/m ³)	164	159
Sable naturel (kg/m ³)	841	856
Pierre 5-14 mm (kg/m ³)	821	841
Pierre 14-20 mm (kg/m ³)	-	-
Fibres (kg/m ³)	40,0 ³	4,6 ⁴
Agent expansif (kg/m ³)	24,0 ⁵	-
Entr. d'air (mL/kg L)	0,5 ⁶	0,3 ⁶
Superplastifiant (L/m ³)	3,1 ⁷	3,5 ⁸
<i>Eclipse Plus</i> (L/m ³)	-	7,6
<hr/>		
E/L (incluant <i>Conex</i>)	0,38	0,42
Teneur en air finale (%)	7,8	9,0
Masse volumique (kg/m ³)	2296	2241
Affaissement (mm)	180	160
<hr/>		
Rés. à la compression		
7 jours (MPa)	31,1	26,9
28 jours (MPa)	35,3	38,7
91 jours (MPa)	38,3	39,7
Module élastique, 28 d (GPa)	32,4	31,2
Coef. de fluage flexionnel	4,8	3,1
Module de rupture, 28 d (MPa)	5,1	4,5
Indices de ténacité, 28 d		
I ₅	5,1	4,1
I ₁₀	9,9	6,1
I ₂₀	19,1	8,7
Facteur d'espacement (µm)	149	142
Facteur de durabilité (%)	100	100
Perte à l'écaillage (g/m ²)	367	66

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| 1 GU | 6 <i>MicroAir</i> |
| 2 GUbSF | 7 Type naphthalène (IAI) |
| 3 Fibres <i>Dramix 80/60</i> | 8 <i>ADVA 140</i> |
| 4 Fibres <i>Grace Strux 90/40</i> | |
| 5 <i>Conex</i> | |

Le béton avec agent réducteur de retrait (BRR) est renforcé de $4,6 \text{ kg/m}^3$ de fibres synthétiques *Strux 90/40*. Le béton a été fabriqué avec 380 kg/m^3 de ciment GUbSF. Le béton livré au chantier avait un affaissement compris entre 150 et 170 mm et un volume d'air variant de 7,4 à 9 %. Aucun signe de ségrégation n'a été observé lors de la mise en place. La résistance à la compression de 38,7 MPa satisfait l'exigence minimale de 35 MPa à 28 jours. Le module élastique et le module de rupture sont respectivement de 31,2 GPa et de 4,5 MPa. Il s'agit de valeurs typiques pour un béton de ce niveau de résistance à la compression. Le béton BRR possède un coefficient de fluage flexionnel de 3,1. Le facteur de durabilité de 100 % indique une excellente résistance à la fissuration interne due aux cycles de gel-dégel. La résistance à l'écaillage est conforme à l'exigence de la norme NQ 2621-900 car la masse des débris à 56 cycles (66 g/m^2) est très inférieure à la limite maximale de 500 g/m^2 .

La Figure 6 présente l'expansion lors du mûrissement et le retrait de séchage des deux types de bétons de resurfaçage. Les courbes indiquent que les deux bétons ont subi une expansion d'environ $100 \text{ }\mu\text{m/m}$ lors des 28 jours de conservation dans l'eau. L'expansion initiale du BRC est normalement beaucoup plus importante que celle qui a été mesurée en laboratoire (Figure 6). L'expansion au mûrissement des bétons avec agent expansif permet normalement de compenser la presque totalité du retrait de séchage. La courbe de la Figure 6 sous-estime l'expansion au mûrissement car les premières mesures d'allongement n'ont été effectuées qu'après 24 heures (12 heures dans les moules et 12 heures en chambre humide). Durant ces premières 24 heures de mûrissement, l'expansion est très rapide et très importante. Elle n'a donc pas pu être prise en compte lors de l'essai.

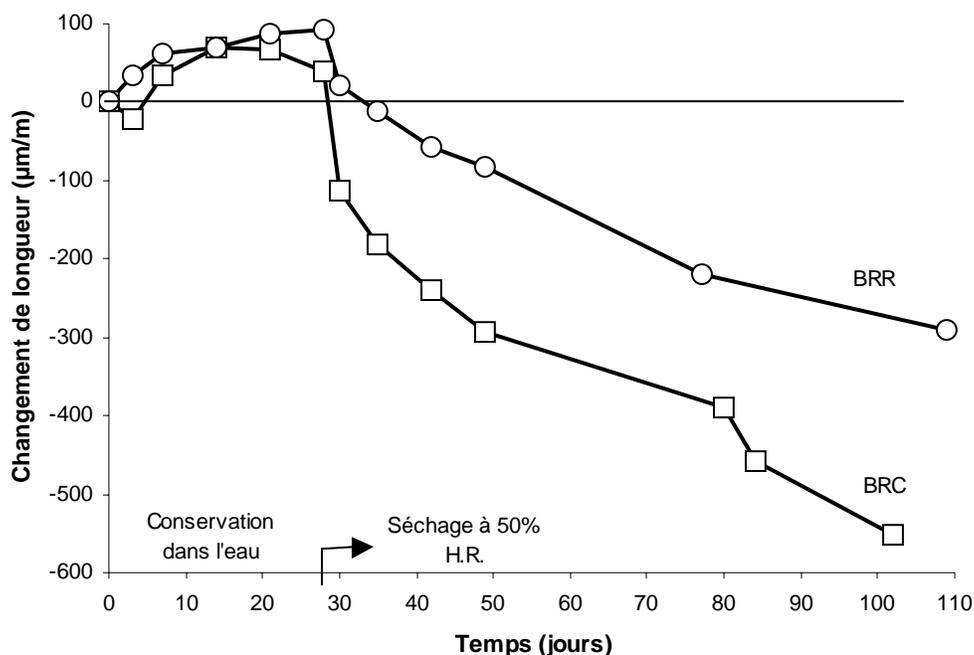


Figure 6 – Expansion au mûrissement et retrait de séchage des bétons de resurfaçage.

Dès la fin du mûrissement, les courbes montrent l'amorce du retrait qui atteint, après 100 jours de séchage, environ 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le béton BRR et environ 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le béton BRC. Ces premiers résultats montrent que l'utilisation d'un agent réducteur de retrait (BRR) permet une réduction du retrait de séchage d'environ 50% par rapport à celui du béton avec agent expansif (BRC).

La Figure 7 présente les courbes force-flèche obtenues à l'aide d'un essai de flexion effectué sur des éprouvettes prismatiques de 100 x 100 x 400 mm testées selon la procédure ASTM C 1018. Le BRC possède une très bonne ténacité en flexion contrôlée. Les indices de ténacité (I_5 , I_{10} , I_{20}) sont très proches des indices de ténacité d'un matériau parfaitement élasto-plastique (Tableau 1). La courbe force-flèche du BRC ne montre pas de chute importante de la charge post-pic après la formation de la première fissure de flexion. Ce type de relation permet de limiter l'ouverture maximale des fissures de traction et est généralement favorable au développement d'un comportement multifissurant.

La charge post-pic du BRR chute très rapidement après la formation de la première fissure de flexion (Figure 7). Ce béton montre une relation force-flèche qui n'est pas favorable au développement d'un comportement multifissurant.

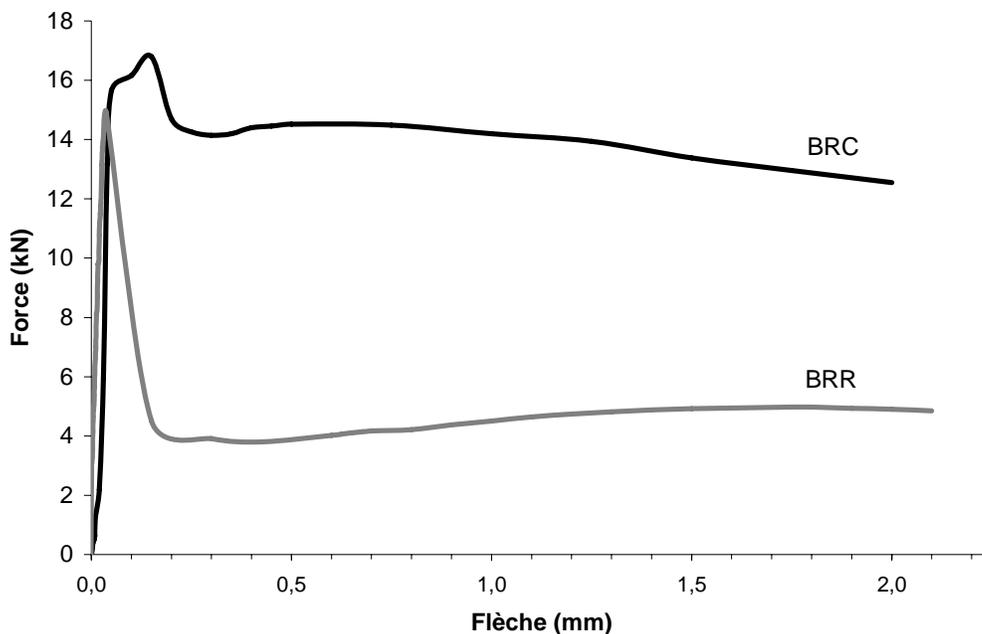


Figure 7 – Courbes force – flèche des éprouvettes soumises aux essais de flexion ASTM C1018.

EXÉCUTION DES TRAVAUX

L'enlèvement du revêtement bitumineux et des premiers 25 mm de béton à la surface de la dalle a été réalisé avec une scarificuse lourde de type *Wirtgen W1000* (Figure 8). La scarification a été effectuée sur une faible profondeur (25 mm) en raison de la présence des barres d'armature supérieures localisées près de la surface. Après la scarification, l'observation visuelle de la surface et l'auscultation au marteau ont permis de localiser quelques zones de délamination et

quelques zones où les barres d'armatures supérieures ont été partiellement dégagées lors de la scarification. Des réparations locales (dégagement des barres d'armature) ont été réalisées avant de procéder à la mise en place du béton de resurfaçage.



Figure 8 – Scarification de la surface du tablier.

Les resurfaçages ont été ancrés mécaniquement sur le substrat à l'aide de tiges métalliques HIT-TZ ancrées chimiquement à l'aide d'une résine HIT HY 150. Les tiges filetées HIT-TZ ont un diamètre de 9,5 mm et une longueur de 114 mm. Elles comportent un écrou vissé à l'extrémité de la partie supérieure filetée. Chaque tige a été encastrée dans un trou de 11 mm de diamètre et de 73 mm de profondeur. La pose des ancrages (nettoyage du trou, injection de la résine) a été effectuée selon les recommandations du fabricant. Les ancrages ont été répartis également sur toute la surface scarifiée selon un pas de 0,4 m x 0,4 m en quinconce d'une rangée par rapport à l'autre (Figure 9). Suite à la pose des ancrages, la surface a été nettoyée au jet d'eau haute pression pour enlever tous les résidus de forage. Toute la surface a ensuite été imprégnée de trois couches d'une solution contenant un inhibiteur de corrosion de type *Posprite* (1 litre par 3 m² par couche). Finalement, des thermocouples et des jauges à corde vibrante ont été installées afin de mesurer les déformations et les températures dans les deux types de béton de resurfaçage.

La mise en place des bétons de resurfaçage a été réalisée les vendredis 2 et 9 septembre 2005. Les températures ambiantes étaient comprises entre 18 et 20 °C et les températures du béton frais étaient comprises entre 21 et 27 °C. La surface a été constamment maintenue humide durant les 24 heures précédant la mise en place des bétons. Juste avant la mise en place, la surface a été nettoyée à l'aide d'un jet d'air comprimé et une balayeuse industrielle.

L'épandage du béton a été réalisé en déversant les bétons directement à partir du camion malaxeur. Une règle vibrante sur rails a été utilisée pour la consolidation des bétons (Figure 10). La finition finale a été effectuée à l'aide d'un aplanisseur à long manche. Une texture antidérapante a été produite à l'aide d'un balai (Figure 10). Globalement, la maniabilité des deux bétons était excellente. Cependant, dans le cas du béton avec agent réducteur de retrait (BRR), le passage du balai a fait apparaître beaucoup de fibres synthétiques à la surface. Ce phénomène n'a que très marginalement affecté la qualité esthétique de la surface de roulement. La qualité de surface du béton avec fibres métalliques (BRC) était excellente (très peu de fibres visibles en surface).



Figure 9 – Préparation de la surface et pose des ancrages.



Figure 10 – Mise en place des bétons.



Figure 11 – Mûrissement des bétons de resurfaçage.

La cure des bétons de resurfaçage a été exécutée conformément au devis 3VM-20 art. 9.2 de la Ville de Montréal – *Cure des surfaces non banchées des éléments plats*. Immédiatement après avoir terminé la finition, l'entrepreneur a débuté l'humidification de la surface à l'aide d'un système de brumisation (Figure 11). Des toiles géotextiles humides ont été placées sur les resurfaçages dès que le béton a été suffisamment rigide pour éviter l'endommagement de la surface. Les resurfaçages ont été conservés humides durant 7 jours suivant la mise en place.

SUIVI DE LA PERFORMANCE EN SERVICE

Le tablier du passage inférieur Girouard (boulevard De Maisonneuve) a été mis en service au milieu du mois de novembre 2005, soit environ 2 mois après la fin de la construction des resurfaçages. Juste avant la mise en service, une inspection visuelle a révélé l'absence de fissures à la surface des deux types de resurfaçages.

Une seconde inspection visuelle a été effectuée au milieu de mois d'avril 2006, soit environ après 7 mois de service. Le resurfaçage de la voie Sud (BRR) comporte cinq fissures dont l'ouverture est de moins d'un millimètre (Figure 12). La fissure la plus importante (#3) est localisée exactement au niveau du joint de construction central (Figure 3). Elle est orientée parallèlement à la poutre chevêtre située juste en dessous. Cette fissure, d'origine mécanique, a probablement été engendrée par la mise en tension du resurfaçage sous l'effet de la rotation des deux appuis centraux (Figure 3). Une fine fissure parallèle (#4) est localisée juste à côté de la fissure centrale (Figure 12). Le resurfaçage BRR comporte trois autres fissures de moins de 1 mm d'ouverture. Ces trois fissures sont localisées aux deux extrémités de la voie Sud et elles sont orientées parallèlement au sens de la circulation (Figure 12). Elles résultent probablement de la mise en tension du resurfaçage sous l'effet du retrait empêché.

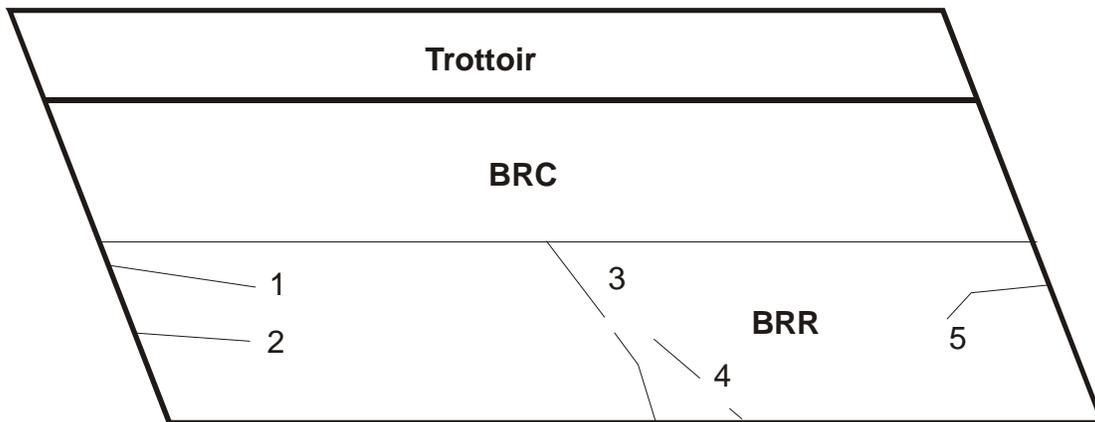


Figure 12 – Relevé de la fissuration après 7 mois de service.

Le resurfaçage de la voie Nord (BRC) ne présente aucune fissure visible à l'œil nu (7 mois après la mise en service). Contrairement au resurfaçage de la voie Sud (BRR), l'ouverture du joint de construction central, sous l'effet de la rotation des deux appuis centraux, n'a pas engendré la fissuration franche du béton de resurfaçage. L'absence de fissure résulte probablement de la très bonne ténacité en tension du béton BRC (Figure 7). Le comportement elasto-plastique presque parfait de ce type de béton a probablement favorisé la formation de microfissures diffuses plutôt que la formation d'une seule fissure franche.

Globalement, l'évolution de la fissuration des resurfaçages du passage inférieur Girouard est similaire à celle mesurée dans les resurfaçages du même type (BRC et BRR) de la planche d'essais du pont du Cosmos (Gagné et Morin 2005). En effet, après la première année de service,

le béton BRC ne comportait aucune fissure alors que le béton BRR ne comportait que quelques très fines fissures.

ASPECT ÉCONOMIQUE

Dans le cas présent, nous estimons que le resurfaçage du tablier représente environ 30% du coût de remplacement complet de la dalle. Cette comparaison ne prend en considération que les coûts directs occasionnés par chacun des deux scénarios. Entre autres, elle ne prend pas en compte les économies du resurfaçage reliées au maintien de la circulation, à la construction d'ouvrages temporaires pour le maintien de la circulation et au coût du phasage des travaux. Le coût de réalisation du resurfaçage a été de 250 \$/m² alors que le coût relié à la reconstruction complète est estimé à 800 \$/m². Basé sur l'expérience de projets semblables, le Tableau 2 présente une ventilation du prix global de resurfaçage.

Tableau 2 – Ventilation du coût du resurfaçage.

Activités	\$/m ² (avant taxes)
Démolition (par scarification)	60 ¹
Nettoyage et préparation des surfaces	25
Ancrages	15
Bétonnage	150

¹ Prix pour une démolition de 25 à 50 mm.

ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE ANTICIPÉE

La durée de vie d'un resurfaçage dépend de très nombreux paramètres reliés à la conception du resurfaçage (choix des matériaux, formulation du béton, méthode de mise en place, etc.), à la qualité du substrat (durabilité, fissuration, rugosité, etc.) et aux caractéristiques du système structural qui accueille le resurfaçage (rigidité, fissuration, vibration). La durée de vie d'un resurfaçage peut donc être très variable en fonction des conditions particulières de construction et d'utilisation. Elle peut être de moins de 10 ans, dans le cas d'un resurfaçage mal conçu mis en place sur un support de mauvaise qualité, alors qu'elle peut être de plus de 30 ans lorsqu'un resurfaçage de bonne qualité est mis en place sur un support sain, intégré à un système structural peu déformable et conçu pour diminuer les risques de fissuration d'origine structurale (Carter et al. 2002).

Une étude albertaine, sous la responsabilité de l'agence Alberta Transportation, a analysé la performance à long terme de plus de 150 resurfaçages adhérents réalisés sur des ponts du réseau routier albertain (Carter et al. 2002). Carter et al. (2002) définissent l'atteinte de la durée de vie d'un resurfaçage lorsque le taux de délamination (décollement) atteint le seuil de 10% de la surface. Selon ces derniers, la durée de vie d'un resurfaçage adhérent est principalement gouvernée par trois catégories de paramètres : la qualité du resurfaçage, la durabilité du support et la qualité du système structural. Tel que présenté au Tableau 3, il existe donc huit scénarios

différents gouvernant la durée de vie d'un resurfaçage et pour lesquels une estimation de la durée de vie envisagée est présentée à titre indicatif.

L'analyse de la performance des resurfaçages du réseau routier albertain indique que le scénario 1 est le plus fréquent, soit environ 80% des observations. Après 15 à 23 ans de service, le taux de délamination varie de nul à marginal. On estime que la durée de vie de ces resurfaçages est comprise entre 25 et 40 ans. Environ 7% des resurfaçages du réseau albertain peuvent être associés au scénario 2. La délamination est principalement due à des problèmes de durabilité (gel-dégel, corrosion dans le substrat). Dans ces conditions, les données indiquent une durée de vie comprise entre 10 et 20 ans. Des réparations mineures peuvent être nécessaires après 10 à 15 années de service. Environ 6% des resurfaçages du réseau albertain peuvent être associés au scénario 3 pour lequel le système structural est constitué de poutres relativement souples composites avec la tablier. Cette configuration engendre des taux de délamination relativement rapides. Dans ces conditions, les données indiquent une durée de vie comprise entre 10 et 13 ans.

Tableau 3 – Scénarios gouvernant la durée de vie d'un resurfaçage (Carter et al. 2002).

Scénario	Qualité du resurfaçage	Durabilité du support	Stabilité/rigidité du système structural	Estimé de la durée de vie (année) ¹
1	Bonne	Durable	Élevée	30 à 40
2	Bonne	Non durable	Élevée	20 à 25
3	Bonne	Durable	Faible	20 à 25
4	Bonne	Non durable	Faible	-
5	Mauvaise	Durable	Faible	-
6	Mauvaise	Durable	Élevée	20 à 25
7	Mauvaise	Non durable	Élevée	10 à 15
8	Mauvaise	Non durable	Faible	-

1 Sur la base du critère de décollement.

Globalement, l'étude de Carter a permis d'estimer la durée de vie d'un resurfaçage, soumis au climat albertain, en fonction des scénarios définis précédemment. Des études de cas assez exhaustives réalisées par la Federal Highway Administration et le Iowa Department of Transportation aux Etats-Unis rejoignent les conclusions de Carter et al. (2002) évoquées précédemment.

Sur la base de l'investigation de l'état du tablier du passage inférieur Girouard, on peut supposer que la durée de vie du resurfaçage devrait se situer entre le scénario pessimiste 2 et le scénario optimiste 1.

Un resurfaçage de très haute qualité, renforcé de fibres, mis en place et mûri selon les règles de l'art permet de qualifier la qualité de resurfaçage comme étant « bonne ».

Il est plus difficile d'évaluer la qualité du support. Le substrat ne présente pas de dégradation significative mais présente une contamination aux ions chlore sous le seuil critique. Par contre, la

mise en place du resurfaçage a été réalisée sans circulation sur le tablier ce qui a permis d'enrayer les vibrations qui peuvent contribuer à diminuer l'adhérence du resurfaçage. Il est raisonnable de croire en un scénario optimiste pour lequel la durabilité et la qualité du support pourraient être qualifiés de « durable » d'autant plus que l'utilisation d'ancrages permet de diminuer la perte d'adhérence et les risques de décollement. À l'inverse, on peut dégager un scénario pessimiste pour lequel la durabilité et la qualité du substrat pourraient être qualifiés de « non durable ».

Le système structural peut probablement être qualifié de « rigide ». En effet, le système est composé d'une dalle épaisse de 500 mm continue sur deux travées et dont la portée maximale est de 9 m (L/h de 18). L'intrados du tablier est très peu fissuré et endommagé ce qui témoigne de la rigidité et de l'intégrité du système.

Le facteur le plus incertain demeure l'effet de la continuité du tablier au-dessus des piles latérales qui induit des zones de tension dans la fibre supérieure du tablier. Ce cas, absent de la littérature, peut potentiellement engendrer des efforts dans le resurfaçage et contribuer à augmenter la fissuration et le risque de perte d'adhérence et de décollement. Cependant, il est raisonnable de croire que la rigidité du tablier permette de limiter l'effet de la continuité du tablier.

Selon les données du tableau 3, le scénario pessimiste (2) possède une durée de vie estimée de 20 à 25 ans alors que le scénario optimiste (1) possède une durée de vie estimée de 30 à 40 ans. Dans les conditions les plus défavorables, la durée de vie estimée serait de 10 à 15 ans. Sur la base de ces données, il est raisonnable d'estimer que la réparation du tablier du passage inférieur Girouard par un resurfaçage adhérent atteindra une durée de vie de 15 à 20 ans.

CONCLUSION

La construction et le suivi de la performance du resurfaçage du tablier du passage inférieur Girouard ont permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- En fonction des résultats de l'analyse structurale, des contraintes inhérentes au projet et des pathologies observées du tablier, l'approche resurfaçage a été préconisée puisqu'elle s'est révélée plus intéressante, tant du point de vue économique que du point de vue environnemental.
- Il est possible de réaliser un resurfaçage mince adhérent à la surface d'un tablier en béton armé à l'aide de techniques de construction simples et relativement rapides. Différents types de bétons contenant environ 40 kg/m^3 de fibres métalliques ou environ 5 kg/m^3 de fibres synthétiques ont pu être mis en place à l'aide d'une simple règle vibrante sur rails.
- Les resurfaçages des passages inférieurs Girouard ont démontré qu'il est tout à fait possible de formuler, de produire, de transporter et de mettre en place des bétons fibrés à air entraîné pouvant contenir un agent expansif ou un agent réducteur de retrait. Ces bétons avaient tous une excellente maniabilité et un réseau de bulles d'air stable.
- Après 7 mois de service le resurfaçage fabriqué avec un béton contenant un agent expansif ne présente aucune fissure. Les résultats suggèrent que l'utilisation de liants à retrait compensé contribue efficacement à diminuer les risques de fissuration due aux retraités empêchés.

- Après 7 mois de service, le resurfaçage fabriqué avec un agent réducteur de retrait n'est que marginalement fissuré (quelques très fines fissures). Les résultats suggèrent que l'utilisation d'un agent réducteur de retrait contribue efficacement à diminuer les risques de fissuration due aux retraits empêchés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les partenaires suivants pour leur support technique ou leur appui financier : Ville de Montréal (Laboratoire, Ponts et tunnels), Roche Ltée, CRIB, Fonds FQRNT, Lafarge Canada, Les Grand Travaux Soter (GTS), W. R. Grace du Canada.

RÉFÉRENCES

- Benzerzour, M., Gagné, R., Boulémia, C., Henry, E., Abriak, N. (2005) Étude du renforcement et de la modélisation des tabliers de ponts en béton armé par des rechargements adhérents ancrés, Sixième édition des Journées scientifiques du (RF)₂B, 4 – 5 juillet, Lyon, France, p. 96-110.
- Carter, P., Gurjar, S. et Wong, J. (2002) Debonding of highway bridge deck overlays, *Concrete International*, 24(7), July, p.51-58.
- CSA Standard A23.1-00, (2000) Béton: constituants et exécution des travaux / Essais concernant le béton, Association Canadienne de Normalisation.
- Gagné, R., Lauture, F., Bissonnette, B., Morency, M. et Morin, R. (2003) Réparation d'un tablier de pont en béton armé à l'aide de resurfaçages minces adhérents : Résultats de la planche d'essais du pont du Cosmos, *INFRA 2003*, 17-19 novembre, Montréal, 17 p.
- Gagné, R., Lemieux, M., Guindon, M.-A., Popic, A. (2002) Analyse du comportement de resurfaçages adhérents utilisés pour réparer des dalles en béton armé, *Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil*, Montréal 5-8 juin, 10 p.
- Gagné, R., Morin, R. (2005) Resurfaçage adhérent de tabliers à la ville de Montréal : Suivi des projets du pont du Cosmos et des passages inférieurs Girouard et Cavendish, *Comptes-rendus du séminaire ACI - Progrès dans le domaine du béton*, 30 novembre-1^{er} décembre, Montréal, 18 p.
- Granju, J.L., Turatsinze, A. et Farhat, H. (1998) Les paradoxes de la durabilité des rechargements minces adhérents, *Troisième colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques*, Québec, p. 65-76.
- Lemieux, M., Gagné, R., Bissonnette, B. et Lachemi, M. (2004) Behaviour of overlaid reinforced concrete slab panels under cyclic loading – effect of interface location and overlay thickness, *ACI Structural Journal*, Vol. 102, no 3, p. 454-461.
- Ong, K.C.G., Paramasivam, P. et Subramaniam, M. (1997) Cyclic behavior of steel-fiber mortar overlaid concrete beams, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 1, p. 21-29.