


UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département du génie civil

 UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE
Département de génie civil

LA RÉPARATION D'UN TABLIER DE PONT PAR UN RESURFAÇAGE ADHÉRENT :
LA PLANCHE D'ESSAIS DU PONT DU COSMOS

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil


Frantz LAUTURE

Sherbrooke (Québec), Canada

Décembre 2005

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 État des connaissances	1
1.1 Les resurfaçages adhérents	1
1.1.1 Définition	2
1.1.2 Comportement mécanique des resurfaçages minces adhérents	3
1.1.2.1 Sans courbure imposée - support rigide	3
1.1.2.2 Avec courbure imposée - support flexible	5
1.1.3 Action composite des resurfaçages adhérents soumis à une courbure imposée	8
1.1.3.1 Resurfaçage comprimé	9
1.1.3.2 Resurfaçage tendu	10
1.1.4 Influence des paramètres de conception	10
1.1.4.1 Propriétés mécaniques et comportement volumétrique	11
1.1.4.2 Épaisseur	13
1.1.4.3 Préparation de surface / agent de liaisonnement	14
1.2 Différents types de béton de réparation	15
1.2.1 Béton courant	15
1.2.2 Béton modifié au latex	15
1.2.3 Béton à haute performance	16
1.2.4 Béton avec fibres	17
1.3 Performance des resurfaçages en condition in situ	18
1.3.1 Dalles sur sol	18
1.3.2 Dalles structurales	19
Chapitre 2 But de la recherche	21
2.1 Introduction	21
2.2 Exposé de la problématique	22
2.3 Le pont du Cosmos	23
2.4 Programme d'essai	23
2.4.1 Essais de caractérisation des bétons sur le chantier	23
2.4.2 Essais de caractérisation mécanique et de durabilité en laboratoire	23
2.4.3 Instrumentation des resurfaçages suivi du comportement à long terme	25

Chapitre 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.1 Les resurfaçages adhérents

Au cours des trente dernières années, l'utilisation de plus en plus fréquente des sels de déglacage pour l'entretien du réseau routier a causé des désordres importants sur les ouvrages d'art qui, à l'origine n'avaient pas été conçus pour ces conditions d'exposition sévères. C'est pour cette raison que les grands propriétaires d'ouvrage doivent consacrer beaucoup d'efforts pour réhabiliter leur réseau d'ouvrages d'art.

Aussi de façon quasi systématique, lorsqu'un ouvrage d'art, tel qu'un viaduc ou un pont est réhabilité, on est aux prises avec des problèmes plus ou moins importants de délamination de la dalle. La corrosion des aciers d'armature produite par l'infiltration des ions chlore va provoquer la fissuration et l'éclatement de la couverture du béton. Tout ceci va engendrer des coûts d'entretien très élevés de la structure.

L'approche envisagée pour la réhabilitation d'un tablier de pont consiste à décaper la surface entière de la dalle de béton en procédant au nettoyage des zones délaminées. Ensuite, on place une chape adhérente sur toute la surface du tablier, et si nécessaire une membrane étanche et un enrobé bitumineux.

Vu le nombre croissant des infrastructures en béton armé qui présentent des problèmes sévères de durabilité, la réhabilitation au moyen d'un resurfaçage adhérent pourrait être considérée comme une solution rentable, à condition qu'elle soit durable.

Cette revue de documentation vise à identifier les principaux paramètres et les mécanismes qui gouvernent la durabilité des resurfaçages minces adhérents dans le contexte climatique québécois et à mieux comprendre le comportement structural des dalles en béton armé réparées avec un resurfaçage mince.

1.1.1 Définition

Un resurfaçage de type béton sur béton se définit comme une réparation effectuée en appliquant une nouvelle couche de béton sur une surface de béton existant appelée support. Ce type de réparation permet de réhabiliter, de renforcer ou d'augmenter la capacité d'un ouvrage sans le reconstruire complètement. Les resurfaçages peuvent être exécutés sur une dalle sur le sol, un tablier de pont, un viaduc, une dalle d'un garage multi étagé, etc. En fonction de l'épaisseur de la dalle endommagée, on peut procéder à des resurfaçages minces ou épais. Le resurfaçage mince est généralement d'une épaisseur inférieure à 100 mm, tandis que le resurfaçage épais est d'une épaisseur supérieure à 100 mm [Granju et coll., 1998; Saucier et coll., 1990; Detwiler et coll., 1997; ACPA, 1990].

Les resurfaçages sont divisés en trois groupes distincts selon le degré d'adhérence avec le support : un resurfaçage avec une interface non adhérente, un resurfaçage avec une interface partiellement adhérente et un resurfaçage avec une interface complètement adhérente [Chanvillard, 1998, Do, 1989].

Les resurfaçages minces adhérents offrent beaucoup d'avantages en ce qui a rapport à l'épaisseur de béton de réparation et les frais encourus. La qualité d'un resurfaçage repose beaucoup sur la qualité de l'adhérence, donc, il est très important que la surface du support soit exempte de toute substance nuisible. Dans les zones délaminées ou réparées, tous les granulats et les fragments de béton doivent être dégagés sans microfissurer la dalle de support. Après avoir dégagé tout le béton détérioré, on devra débarrasser la surface des poussières, des saletés et du béton faiblement adhérent au moyen d'un jet d'eau à haute pression (minimum 28 MPa ou 4000 psi avec une buse rotative).

Le choix du béton de réparation est fonction des conditions d'utilisation de la structure (rapport E/C, volume et type de ciment, ajouts minéraux ou autres, diamètre maximal des granulats, etc.). Le premier objectif d'un resurfaçage adhérent est d'assurer un comportement monolithique

au niveau de l'interface entre le resurfaçage et le substrat dans les conditions d'utilisation de la structure à court et à long termes.

1.1.2 Comportement mécanique des resurfaçages minces adhérents

Pour atteindre le but fondamental d'un resurfaçage mince adhérent, il faut maîtriser la distribution des contraintes normales et tangentielles dans la dalle et plus particulièrement à l'interface des deux matériaux. En effet, pour qu'un resurfaçage mince adhérent puisse remplir pleinement ses fonctions et pour qu'il soit durable, les contraintes induites à l'interface par les chargements internes et externes doivent être inférieures aux contraintes ultimes engendrant la séparation de l'interface. L'analyse du comportement interne de l'élément structural support - resurfaçage et la détermination des contraintes critiques sont essentielles pour assurer un comportement à long terme adéquat du resurfaçage. Dans ce chapitre, deux approches sont considérées lors de l'analyse des contraintes d'interface des resurfaçages adhérents : les systèmes sans courbure imposée et les systèmes avec courbure imposée.

Les systèmes sans courbure imposée englobent les resurfaçages adhérents appliqués sur un support relativement rigide dont la courbure demeure toujours très faible. Les variations volumiques telles que: le retrait, le fluage et les variations thermiques gouvernent les contraintes internes du resurfaçage alors que les contraintes externes engendrées par les changements de courbure demeurent relativement faibles.

Les systèmes avec courbure imposée se composent des resurfaçages adhérents appliqués sur un support relativement souple dont la courbure est importante sous l'effet des chargements internes et externes. Les déformations de flexion imposées au support et au resurfaçage gouvernent les contraintes induites à l'interface.

1.1.2.1 Sans courbure imposée - Support rigide

Dans ce type de systèmes, des contraintes de traction peuvent se développer dans le matériau de resurfaçage et des contraintes de cisaillement peuvent être engendrées au niveau de l'interface. L'évolution des contraintes dans le matériau de resurfaçage dépend des variations volumiques (retrait, fluage et variations thermiques) et aussi de la distribution spatiale des fissures. Le support est considéré stable (variations volumiques faibles) et relativement peu

déformable. La figure 1.1 présente l'évolution des contraintes de traction et de cisaillement dans le matériau de réparation et à l'interface resurfaçage – support.

Il n'y a aucune contrainte induite au niveau de l'interface après la mise en place (I). Une fois que s'amorce l'hydratation et / ou le séchage, les contraintes de traction dans le matériau et par incidence les contraintes de cisaillement à l'interface commencent à se développer. Cependant, les résistances en traction et en cisaillement excèdent les contraintes induites, ce qui empêche les fissures et le décollement (II). Les contraintes de cisaillement sont plus élevées que les contraintes de traction à l'interface. Lorsque les contraintes de traction deviennent supérieures à la résistance ultime à la traction du matériau, il y a formation d'une fissure dans le resurfaçage au centre de l'élément (III). La présence de fissures va modifier la distribution des contraintes. Les contraintes de traction vont relâcher au centre de l'élément pour progresser à deux nouveaux éléments B et C. Pour leur part, les contraintes de cisaillement à l'interface sont plus importantes aux extrémités qu'au centre des éléments B et C. D'autres fissures peuvent être créées dans le matériau à mesure que progressent les variations volumiques causées par l'hydratation ou le séchage. Les contraintes dans les éléments D, E, F et G sont redistribuées selon le même principe (IV).

Ainsi, pour un resurfaçage sans courbure imposée, l'endommagement du système est essentiellement causé par des variations volumiques empêchées. Ces variations restreintes peuvent générer une fissuration transversale du resurfaçage qui correspond au mode de rupture le plus fréquent. Pour des conditions normales d'utilisation, la rupture par cisaillement au niveau de l'interface semble beaucoup moins critique [Emmons, 1992, Granju et coll., 1998].

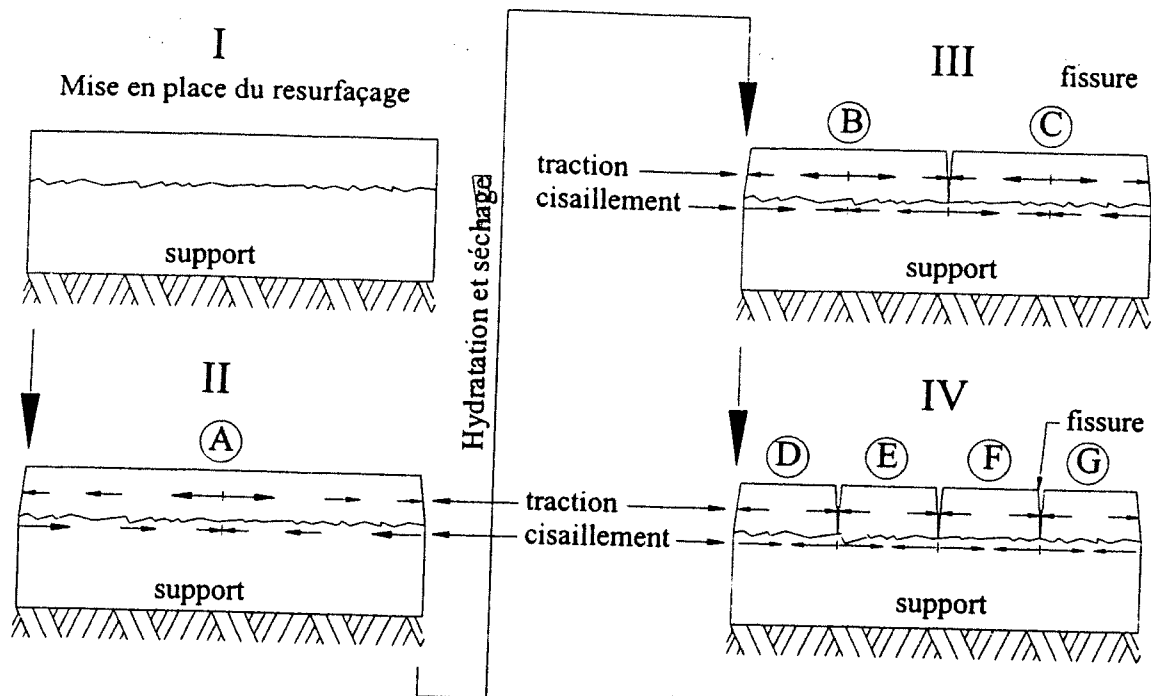


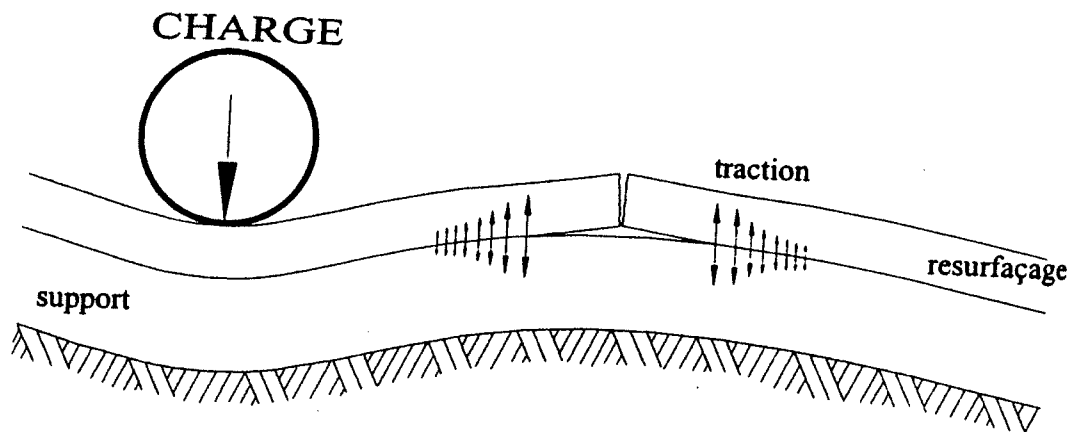
Figure 1.1 – Distribution des contraintes de traction et de cisaillement dans un matériau de réparation et à l'interface resurfaçage - support

1.1.2.2 Avec courbure imposée - Support flexible

Les éléments structuraux soumis à un chargement externe peuvent être considérés comme des éléments structuraux subissant une courbure imposée. Les dalles de chaussée ou les dalles de plancher peuvent être considérées comme des structures avec support flexible. En général ces éléments sont non armés (petit treillis ou fibres). On peut désigner les tabliers de pont supportés par les poutres, des dalles unidirectionnelles ou bidirectionnelles ou des planchers de bâtiment comme des éléments structuraux sur appuis concentrés. En général, ces éléments sont armés (renforcés par des aciers d'armature).

Les systèmes avec courbure imposée regroupent les resurfaçages adhérents appliqués sur un support relativement souple qui subit une courbure plus importante sous l'effet des chargements internes et externes. Les contraintes d'interface sont principalement contrôlées par les déformations imposées par la flexion du support et du resurfaçage [Do et coll., 1992; Granju et coll., 1998; Granju, 1996].

Plusieurs études ont été faites par des chercheurs sur les modes de rupture et la distribution des contraintes dans les resurfaçages soumis à une courbure imposée. La figure 1.2 montre bien que les zones critiques sont situées dans la zone de moment négatif extrême et non pas sous ou très près de la charge. Lorsque le matériau fissure, des contraintes normales de traction augmentent à l'interface.



Fondation élastique

Figure 1.2 – Distribution des contraintes internes d'une structure sur fondation flexible [Granju et coll., 1998]

Les conclusions suivantes ont été tirées à la suite de l'ensemble de ces études [Granju et coll., 1998] :

- Le décollement est possible par la fissuration du resurfaçage;
- Plus le resurfaçage est mince, plus le décollement est difficile à contrôler;
- Le cisaillement n'est pas la sollicitation déterminante pour initier et propager le décollement, mais bien la traction normale à l'interface induite par une courbure imposée;
- La concentration des contraintes de traction au voisinage des fissures devient défavorable à la résistance à la traction du resurfaçage dû au décollement engendré par ces contraintes.

Sous l'effet d'un chargement externe, il y a déformation au niveau des fondations et du support. Normalement, les contraintes à l'interface sont significativement faibles par rapport aux

résistances ultimes du matériau, tandis que les contraintes dans le resurfaçage semblent être responsables de la présence des fissures. Ainsi, plus le resurfaçage est rigide, plus les lèvres de part et d'autre de la fissure tendent à s'opposer à la courbure. Dépendamment de la distribution des efforts dans le support et de la rigidité du resurfaçage, des contraintes de traction supplémentaires importantes peuvent être engendrée à l'interface. Ces contraintes sont généralement responsables du décollement du resurfaçage [Granju et coll., 1998, Granju, 1996].

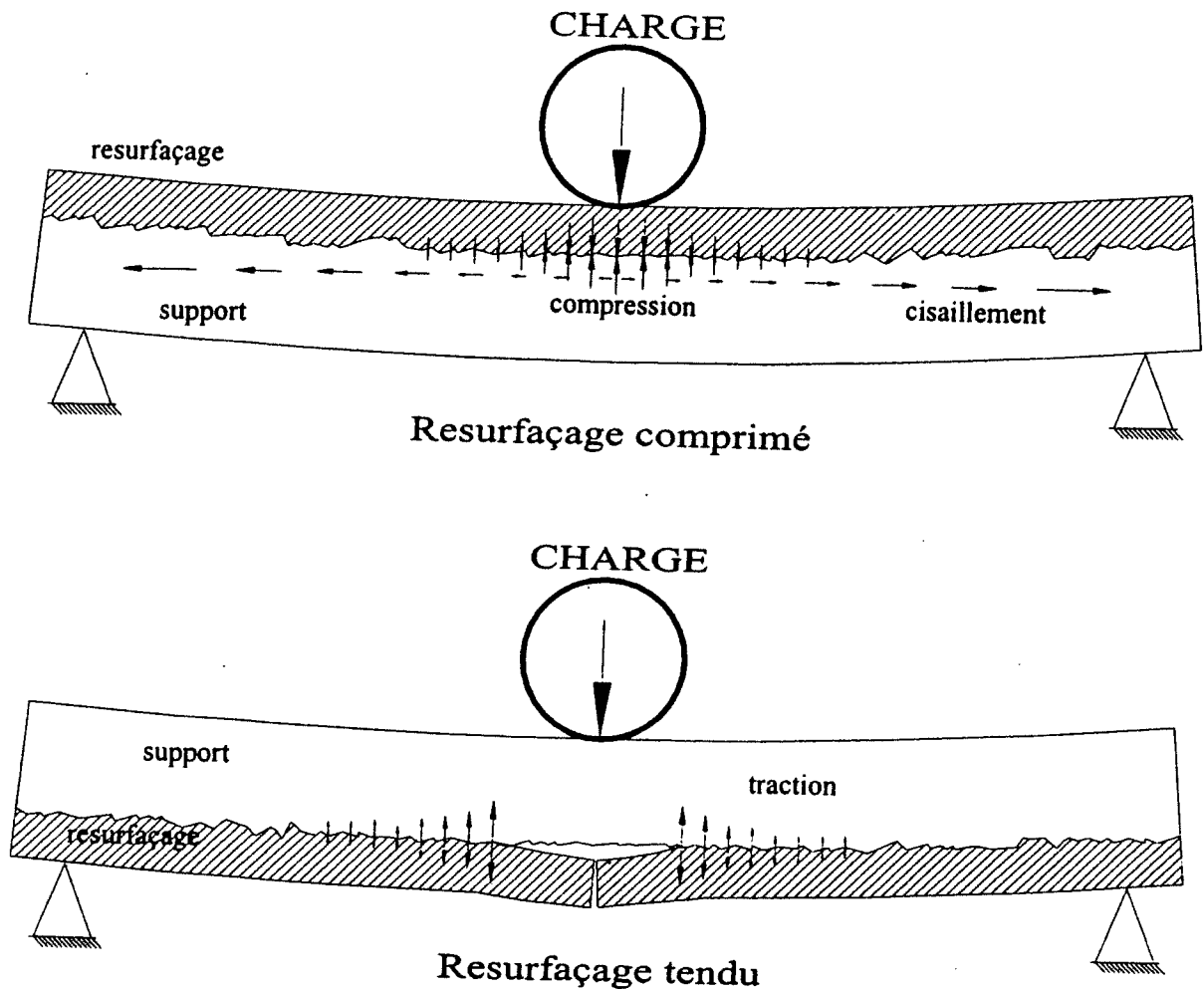


Figure 1. 3 – Distribution des contraintes internes d'une structure sur appuis simples [Farhat et coll., 2001]

La figure 1.3 présente les deux configurations qu'on peut rencontrer dans les cas d'une dalle reposant sur des appuis simples [Paramasivam et coll., 1995; Granju et coll., 1998]. Lorsque le

resurfaçage est en zone comprimée, l'application d'une charge externe augmente le cisaillement à l'interface, ce qui favorise le décollement par glissement. Lorsque le resurfaçage est en zone tendue (moment négatif), on observe que les contraintes de traction à l'interface sont plus élevées et contrôlent le décollement. Généralement, l'épaisseur du resurfaçage est significativement inférieure à celle du support.

Les mécanismes qui contrôlent le décollement des resurfaçages adhérents appliqués sur des supports de béton non armé sont assez bien connus. Cependant, on a beaucoup moins étudié le comportement des resurfaçages adhérents appliqués sur un béton armé. Farhat et coll. sont considérés parmi les premiers à réaliser une étude par éléments finis afin de mieux comprendre les mécanismes de rupture d'un resurfaçage mince adhérent sur une dalle structurale en béton armé soumis à des courbures imposées [Farhat et coll., 2001].

Le comportement à l'interface support-resurfaçage d'une dalle réparée en béton armé ou non démontre les mêmes mécanismes de rupture. Toutefois, le comportement structural global des dalles en béton n'est pas identique, car l'acier dans la dalle vient modifier la reprise des efforts et la distribution des contraintes. Donc, tout ceci vient influencer les mécanismes de rupture.

1.1.3 Action composite des resurfaçages adhérents soumis à une courbure imposée

Il est primordial de bien comprendre ce qui se passe dans les matériaux (support, resurfaçage et interface) en présence d'un chargement statique. Ainsi, il est possible de suivre l'évolution des contraintes sous un chargement donné grâce aux travaux effectués par Farhat [Farhat et coll., 2001].

L'objectif global des travaux de Farhat était de modéliser, sous un chargement monotone, les contraintes ultimes à l'interface support - resurfaçage et le décollement qui pourrait en résulter. Différents paramètres ont été étudiés afin d'en évaluer l'influence directe sur la qualité de la réparation. Les travaux de modélisation ont été réalisés par l'intermédiaire du code de calcul par éléments finis CESAR - LCPC.

Pour la validation du modèle, les résultats de l'analyse numérique ont été comparés avec les résultats expérimentaux d'une dalle saine non réparée et chargée statiquement. Les comportements globaux du modèle et de la dalle témoin #1 s'avèrent identiques, ce qui confirme

la validité du modèle numérique. Le paramètre le plus critique dans une réparation par resurfaçage est l'interface support - resurfaçage. L'interface est caractérisée par la contrainte normale, la résistance à la traction ou à la compression (σ_d), la contrainte tangentielle et la résistance au cisaillement (C). Les paramètres σ_d et C caractérisent la qualité de l'adhérence entre le support et le resurfaçage.

Le modèle simule une dalle de béton armé de 3,3 m x 1,0 m x 0,2 m d'épaisseur reposant sur deux appuis distants de 3,0 m. La résistance à la compression est de 40 MPa. En appliquant une charge au centre (flexion trois points), il est possible de reproduire deux types de chargements : un resurfaçage en zone comprimée et un resurfaçage en zone tendue.

1.1.3.1 Resurfaçage comprimé

Dans un resurfaçage comprimé, les contraintes de cisaillement contrôlent le décollement [Farhat et coll., 2001]. La figure 1.4 montre l'évolution des contraintes de cisaillement sous l'effet de trois niveaux de chargement. Pour cette analyse, on a 40 mm d'épaisseur de resurfaçage, une résistance à la compression ($f'_c = 40$ MPa). L'adhérence est caractérisée par $C = \sigma_d = 0,5$ MPa.

On a remarqué que les contraintes de cisaillement se développent sur presque toute la demi-portée de la dalle à l'exception des points près de la charge. À cette place, on ne trouve que des contraintes normales de compression. Donc, à un niveau de chargement de 140 kN (supérieur à la charge de service de 69 kN), les contraintes demeurent inférieures à l'adhérence ultime de 0,5 MPa. À 160 kN, on observe un glissement sur presque la moitié de la demi-portée. Finalement à 200 kN, les contraintes de cisaillement sont supérieures à 0,5 MPa, ce qui occasionne le décollement du resurfaçage. À la lumière de ces résultats, le modèle a permis de confirmer qu'en zone comprimée, la résistance au cisaillement à l'interface contrôle le décollement.

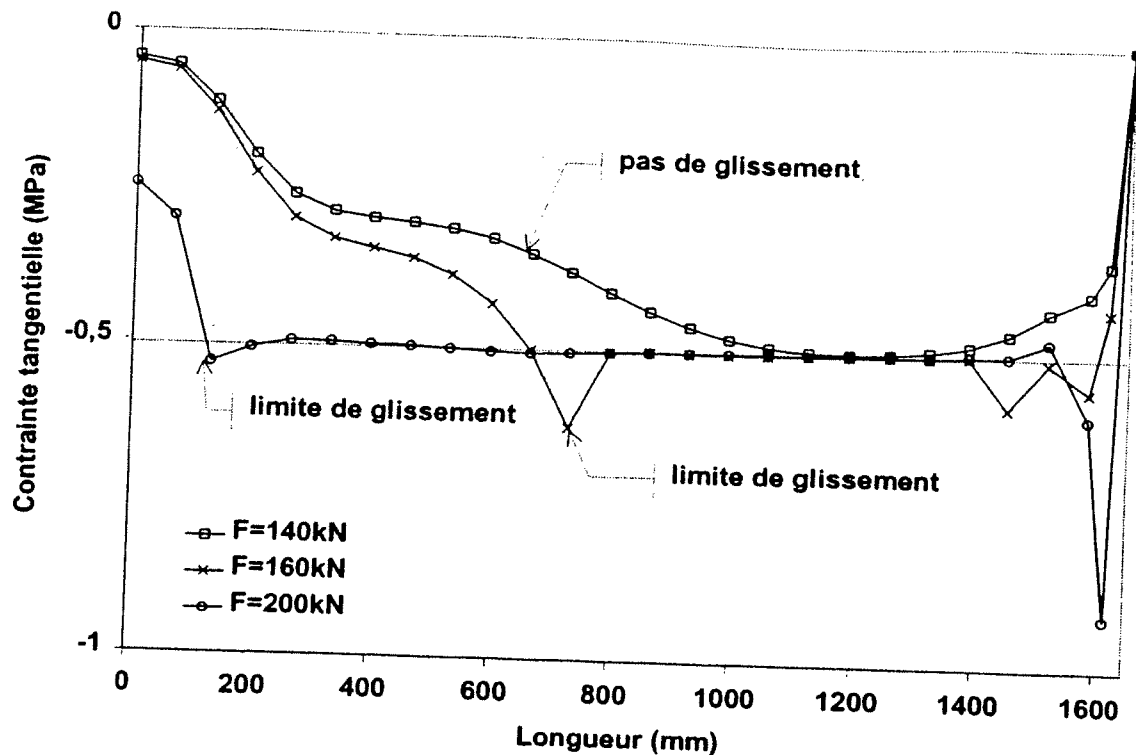


Figure 1.4 – Évolution des contraintes tangentielles à l'interface (C) en fonction du niveau de chargement (resurfaçage en zone comprimée) [Farhat et coll., 2001]

1.1.3.2 Resurfaçage tendu

Les contraintes de traction à la surface sont celles qui contrôlent le décollement dans un resurfaçage tendu. La figure 1.5 présente l'évolution de ces contraintes sous l'effet de trois niveaux de chargement. La simulation par éléments finis est identique à celle employée dans un resurfaçage comprimé (épaisseur de resurfaçage de 40 mm, résistance à la compression de 40 MPa et l'adhérence $C = \sigma_d = 0,5$ MPa). Ainsi, pour un chargement de 40 kN, le resurfaçage demeure solidaire au support, il n'y a aucun signe de décollement. À 60 kN, force qui engendre la fissuration du béton, un décollement de 200 mm de longueur est détecté près du point d'application de la charge. Finalement, à 200 kN, une progression du décollement a été observée sur une longueur de 1000 mm. Ce modèle a permis de confirmer qu'en zone tendue, la résistance à la traction à l'interface est la plus sollicitée et elle contrôle le décollement.

1.1.4 Influence des paramètres de conception

Une bonne compréhension des paramètres gouvernant la qualité d'un bon resurfaçage est exigée dans la réalisation d'une réparation par resurfaçage mince adhérent. Il devient important

de comprendre les effets de chacun d'eux et d'en déterminer les limites. Le mauvais choix d'un ou de plusieurs éléments peut causer des fissures dans le resurfaçage ou à l'interface et ainsi accélérer le processus de décollement.

Les paramètres présentés ci-après sont importants à comprendre et à définir pour réhabiliter un ouvrage à l'aide d'un resurfaçage mince adhérent.

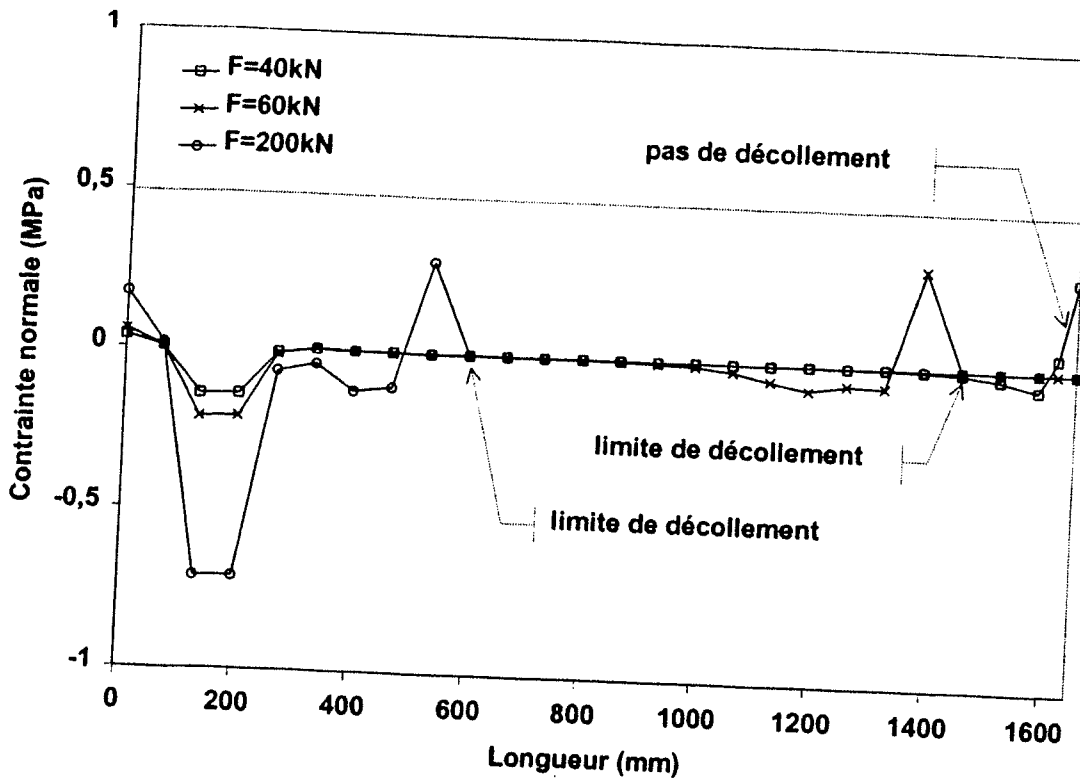


Figure 1.5 – Évolution des contraintes tangentielles (C) en fonction du niveau de chargement (resurfaçage en zone tendue) [Farhat et coll., 2001]

1.1.4.1 Propriétés mécaniques et comportement volumétrique

Les propriétés mécaniques et le comportement volumétrique du matériau de resurfaçage exercent une grande influence sur l'adhérence au support [Cusson et coll., 1996]. Ces paramètres doivent être analysés, étudiés et considérés dans le choix du béton de réparation. Le béton de réparation peut développer des contraintes additionnelles de cisaillement et de traction à l'interface ou se fissurer comme c'est mentionné précédemment. Pour éviter ces désordres, Cusson et coll. affirment que, pour obtenir un bon resurfaçage, il faut que les

propriétés du matériau de resurfaçage (R) et du béton en place (C) soient identifiées, analysées et qu'elles respectent certains critères de compatibilité [Cusson et coll., 1996]. Le tableau 1.1 montre les critères de compatibilité nécessaires entre les deux matériaux pour assurer une bonne durabilité de l'ouvrage réparé.

Tableau 1.1 – Compatibilité entre le matériau de réparation et le support [Cusson et coll., 1996]

Propriétés	Matériau de réparation (R) vs matériau de base (C)
Retrait	R faible
Coefficient de fluage	$R > C$
Coefficient de dilatation thermique	$R = C$
Module d'élasticité	$R = C$
Coefficient de Poisson	$R = C$
Résistance en tension	$R > C$
Résistance à la fatigue	$R > C$
Porosité et résistivité	$R = C$
Réactivité chimique	$R < C$

Généralement, la durabilité du béton de réparation dépend du choix et de l'application des matériaux de réparation [Emmons et coll., 2000]. Les critères de performance doivent être élaborés en corrélant les résultats des essais en laboratoire et la performance en chantier des diverses réparations.

Pour obtenir des réparations durables, Emmons et coll. affirment qu'il est nécessaire de considérer les facteurs touchant la conception et la sélection des réparations comme un ensemble d'un système composite [Emmons et coll., 2002]. La compatibilité (dimensionnelle, chimique, électrochimique et de perméabilité) entre le resurfaçage et le support est un des éléments les plus critiques dans le système de réparation.

Le coefficient de dilatation thermique indique la variation de la longueur d'un matériau due à une variation de température. Dans le but d'obtenir un matériau composite, il est préférable d'avoir un coefficient de dilatation thermique similaire pour les deux matériaux. S'il existe une

différence, et qu'il y ait de grandes variations de température, des contraintes internes vont apparaître. Ces contraintes peuvent créer des fissures dans le matériau le plus faible ou un décollement à l'interface [Cusson et coll., 1996].

Le module d'élasticité du resurfaçage et du support doit être similaire. Dans le cas où il existe une différence, une restriction de mouvement est imposée au matériau le plus déformable et ceci provoque des contraintes pouvant amener la rupture à l'interface ou dans le matériau de resurfaçage lui-même [Farhat, 1999]. Cependant, un module d'élasticité plus faible du resurfaçage peut contribuer à limiter les contraintes de traction à l'interface.

On peut considérer, lors d'une réparation par resurfaçage mince adhérent, que le matériau du support a déjà connu son retrait global et qu'on trouvera donc un retrait empêché du matériau de réparation. Il est important que le matériau de resurfaçage ait un retrait faible pour éviter que des contraintes de contraction se développent et provoquent soit de la fissuration dans le matériau lui-même, soit un décollement à l'interface. Dans le cas d'une réparation mince adhérente, il est avantageux d'avoir un coefficient de fluage élevé [Toma, 1999, Bissonnette, 1996]. La relaxation du béton permet de diminuer les contraintes de traction dues au retrait empêché.

1.1.4.2 Épaisseur

Généralement, l'épaisseur du resurfaçage est choisie en fonction du degré d'endommagement du support et des aspects géométriques de la structure. Pour une réparation par resurfaçage mince adhérent, l'épaisseur varie entre 40 et 100 mm. L'épaisseur a une grande influence sur la performance d'un resurfaçage, car elle joue sur la rigidité de l'élément réparé et sur les contraintes transmises à l'interface. Ce sont ces contraintes qui contrôlent le décollement.

Avec leurs travaux de modélisation, Farhat et coll. ont démontré l'influence de ce paramètre sur la longueur de décollement à l'interface de réparations tendues et comprimées. [Farhat et coll., 2001]. Lors d'un resurfaçage en zone comprimée, les résultats montrent que le glissement débute à un niveau de chargement plus faible lorsque l'épaisseur de resurfaçage passe de 40 mm à 80 mm. Lorsque le resurfaçage est plus épais, il transmet un plus grand effort de flexion. Il y a alors augmentation de la contrainte de cisaillement et abaissement du niveau de chargement critique.

Pour un resurfaçage en zone tendue, en gardant les mêmes paramètres (résistance à la compression = 40 MPa, $C = \sigma_d = 1.0$ MPa) et pour un même niveau de chargement, en augmentant l'épaisseur de réparation, cela peut résulter à un effet négatif sur le décollement. Pour une épaisseur de 40 mm, la longueur de décollement a été de 50 mm. Tandis que pour une épaisseur de 80 mm, on a trouvé une longueur de décollement de 100 mm [Farhat et coll., 2001]. Lorsque le resurfaçage est plus mince, il est moins rigide et il s'oppose moins à la courbure imposée. En effet, en augmentant l'épaisseur de resurfaçage, le matériau de réparation devient plus rigide et cela occasionne une augmentation des contraintes de traction à l'interface. Le resurfaçage s'oppose plus fortement à la courbure imposée et il y a un grand risque de décollement.

1.1.4.3 Préparation de surface / agent de liaisonnement

Avant la mise en place du béton de réparation, une bonne préparation de la surface est recommandée. Le béton endommagé doit être enlevé jusqu'au béton sain. Ensuite, on doit nettoyer la surface, sans béton dégradé et avec un minimum de microfissuration, pour maximiser l'adhérence à l'interface. Il existe diverses techniques pour accomplir cette opération. Les techniques de démolition les plus connues sont l'hydrodémolition, le marteau pneumatique, le jet de sable et la scarification. L'avantage de l'hydrodémolition est qu'il permet de démolir le béton détérioré sur une épaisseur variable, peu importe la superficie, et avec un minimum de microfissuration. [Farhat, 1999, ACPA, 1990].

Un agent de liaisonnement se définit comme un matériau que l'on place à l'interface d'un support et d'un resurfaçage afin d'augmenter la résistance à l'arrachement. On peut utiliser comme agent de liaisonnement un mortier de ciment, un mortier époxydique ou un mortier de ciment modifié au latex [Silfwerbrand et coll., 1998]. Bon nombre de chercheurs ont démontré qu'il est possible de faire des resurfaçages adhérents sans aucune présence d'agent de liaisonnement et ainsi pouvoir obtenir de très bons résultats [Walters, 1991, Saucier et coll., 1990].

D'après Silfwerbrand, avec un agent de liaisonnement, on peut obtenir deux interfaces, soit deux plans de rupture possible au lieu d'un. D'autant plus, le rapport E/C est assez élevé dans le cas de ces mortiers. Avec un rapport E/C élevé, on obtient une faible résistance à la compression et une plus grande décohésion de l'agent de liaisonnement. D'autre part, lorsque la

surface n'est pas assez propre, le mortier peut assimiler les particules fines et ainsi améliorer l'adhérence.

En général, les agents de liaisonnement peuvent s'avérer utiles pour augmenter l'adhérence, mais il est essentiel de respecter parfaitement les exigences d'application et de mise en place du béton. Lorsqu'on fait un mauvais usage d'un agent de liaisonnement (quantité inexacte, délai trop long avant la mise en place du béton, formulation de l'agent), ceci engendre généralement une adhérence inférieure à celle qu'on pourrait obtenir sans application d'agent de liaisonnement [Silfwerbrand et coll., 1998].

1.2 Différents types de béton de réparation

Pour obtenir un resurfaçage durable, il est important de bien choisir le type de béton de réparation. Tous les mélanges de béton utilisés doivent respecter les exigences de durabilité conçues par la norme CAN/CSA A23.1 (rapport E/C minimum, air entraîné, facteur d'espacement etc.) afin de mieux se comporter aux conditions climatiques nord américaines.

1.2.1 Béton comparable

Le béton comparable est le plus similaire du béton de support (module élastique, coefficient de dilatation thermique, retrait, etc.). Cependant, il est important que ce mélange respecte bien les exigences minimales de durabilité. Ces exigences font souvent en sorte qu'il n'est pas toujours possible d'utiliser un béton de resurfaçage dont les propriétés mécaniques (résistance à la compression, module élastique, etc.) sont identiques à celles du béton de support.

1.2.2 Béton modifié au latex

Le béton modifié au latex est souvent utilisé comme béton de réparation. On l'utilise surtout pour les réparations mineures ainsi que sur les resurfaçages des tabliers de ponts et les structures de stationnements étagés. Ce béton possède les principales caractéristiques : [Khulman, 1990].

- Bonne ouvrabilité du mélange;
- Faible retrait plastique;
- Maniable avec un rapport E/C faible;

- Bonne adhérence au support;
- Module élastique relativement faible;
- Durabilité justifiant le coût des travaux.

Tous ces critères sont remplis par le béton au latex modifié au styrène – butadiène. Ce type de béton est très bien connu dans les travaux de réparation de dalle pour sa bonne résistance à la traction, pour son adhérence et pour sa durabilité.

Sous l'application d'une charge externe, l'interface d'un resurfaçage peut être fortement sollicitée par des contraintes normales et de cisaillement. L'ajout de latex dans un mélange de béton permet d'augmenter d'environ 50 % la résistance à l'arrachement à l'interface [Walters, 1991]. Une superficie de 93 000 m² a été réhabilitée sur les routes du New-Jersey, avec le béton modifié au latex, en 1979 –1980. L'épaisseur du resurfaçage était d'environ 40 mm. Après 11 ans de la mise en service, on a observé une bonne adhérence à l'interface support-resurfaçage.

Ce projet permet de mesurer la performance du béton au latex dans les réparations par resurfaçage mince. Ce type de béton permet de diminuer les risques de décollement à l'interface.

1.2.3 Béton à haute performance

Le béton à haute performance offre des avantages intéressants. Il possède une plus grande résistance à la traction à court et à long termes, une faible perméabilité, une surface compacte, une durabilité accrue contre toutes formes d'agressions et un module élastique élevé. Donc ce matériau étant rigide, favorise dans certaines configurations des contraintes supérieures à l'interface [Farhat et coll., 2001].

Il s'avère important que la cure du béton à haute performance soit adéquate et commence dès la fin de la mise en place du béton. Si on ne suit pas les principes adéquatement lors du mûrissement, différentes formes de retrait peuvent causer des problèmes permanents aux matériaux (endogène, thermique et séchage).

Dans le cadre de ses travaux de modélisations numériques, Farhat a étudié l'influence du choix de matériau de réparation [Farhat, 1999]. Il a observé les différences dans l'utilisation de deux bétons de (40 MPa et 70 MPa) dans la fabrication d'un resurfaçage de 40 mm d'épaisseur en zone comprimée. Un niveau de chargement constant de 200 kN et une adhérence à l'interface caractérisée par ($C = \sigma_d = 0,5$ MPa) ont été utilisés pour les deux bétons. À la lumière des résultats obtenus, le glissement à l'interface n'est pas affecté significativement par l'augmentation de la résistance à la compression du béton de réparation. Le glissement du béton de 70 MPa s'est amorcé à un chargement de 140 kN, tandis que celui du béton de 40 MPa s'est amorcé à un chargement de 160 kN.

Les mêmes bétons de (40 MPa et 70 MPa) ont été observés dans la fabrication d'un resurfaçage de 40 mm d'épaisseur en zone tendue. Une adhérence à l'interface de 1 MPa et un chargement constant de 200 kN ont été utilisés pour cette analyse. Les résultats ont prouvé qu'il y ait décollement à l'interface avec l'augmentation de la résistance à la compression du béton. Pour un béton de 70 MPa, la rigidité du composite est plus élevée, à cause du module élastique et la résistance à la traction élevés. Donc, ce béton s'oppose plus à la courbure imposée, ce qui augmente les contraintes à l'interface. À cause de sa rigidité et de sa résistance à la traction élevée, le béton à haute résistance, pour une même courbure imposée, contribue à augmenter les contraintes à l'interface du resurfaçage et du support [Farhat et coll., 2001].

La conclusion des recherches démontre que le BHP se comporte bien dans les ouvrages en béton armé. Cependant, cette étude a permis de confirmer que l'utilisation d'un béton à haute performance, comme resurfaçage, contribue à augmenter les contraintes à l'interface, principalement en raison de sa rigidité et sa résistance à la traction plus élevée.

1.2.4 Béton avec fibres

Il est de plus en plus courant d'utiliser des fibres dans les mélanges de béton de réparation pour des travaux de resurfaçage. Les recherches ont démontré que l'ajout de fibres permettait de mieux contrôler et de ralentir la progression des fissures. [Farhat, 1999; Granju et coll., 1998]. Plusieurs réalisations en chantier ont permis de démontrer que l'ajout de fibres pouvait influencer favorablement la durabilité à long terme des resurfaçages adhérents.

À l'Université de Sherbrooke, une étude a été réalisée par Do sur le comportement d'un resurfaçage mince appliqué sur une dalle de chaussée [Do, 1989]. Cette recherche consistait à resurfacier des poutres en béton non armées avec un béton de réparation renforcé de fibres. Ces poutres de 150 x 500 x 150 mm d'épaisseur ont été analysées sous différents chargements. Certains de ces éléments ont été fabriqués avec un agent de liaisonnement à base de ciment Portland appliqué à l'interface support - resurfaçage. L'analyse du décollement à l'interface a été effectuée sous chargement statique et sous chargement cyclique. Tous les éléments ont été analysés après l'application d'une charge externe produisant un resurfaçage comprimé. Les résultats des essais statiques ont démontré qu'en présence d'une dalle saine, la structure (support - resurfaçage) se comporte comme une dalle monolithique jusqu'à la rupture. Cependant, en présence d'une dalle déjà fissurée, cette dernière ne peut atteindre sa capacité structurale d'origine.

Les résultats des essais cycliques ont démontré qu'il y a eu décollement à l'interface support - resurfaçage, à cause du cisaillement qui dégrade progressivement l'adhérence. La présence d'un agent de liaisonnement a permis tout de même de réduire la surface décollée. À la lumière des résultats, cette étude permet d'avancer que seuls les essais de fatigue peuvent fournir des renseignements fiables sur le comportement de l'interface. Malgré tout, il est encore trop tôt pour tirer des conclusions à partir de ces premiers résultats.

1.3 Performance des resurfaçages en condition in situ

Plusieurs projets de resurfaçages adhérents ont été réalisés au cours des dernières années. Plusieurs études ont démontré qu'il était possible d'assurer une bonne adhérence entre le béton de support et le béton de réparation lorsqu'on dispose d'une bonne préparation de surface et d'une bonne méthode de mise en place [Concrete Repair Manual, 1999]. Dans cette section, un projet de réparation est présenté pour les dalles sur sol et pour les dalles structurales.

1.3.1 Dalles sur sol

En 1986, une expérience a été réalisée sur une section de l'autoroute 40 dans l'ouest de la ville de Montréal où le débit moyen est de 30 000 véhicules [Chanvillard et coll., 1988]. La chaussée montrait des signes de dégradation en surface.

D'abord, la surface a été scarifiée sur 25 mm d'épaisseur et on a utilisé un jet de sable. Sept bétons différents ont été utilisés : un béton comparable et six bétons renforcés de fibres. Les bétons sont fabriqués avec trois sortes de fibres (Eurosteel, Ribtec et Dramix) et sont dosés avec 22 kg/m^3 et 34 kg/m^3 . Trois conditions initiales ont été évaluées (une surface sans système d'ancrage et deux systèmes avec ancrage constitué de clous) pour comparer l'adhérence à l'interface support – resurfaçage.

Après la mise en service de l'autoroute, un réseau de fissures transversales est observé dans les premières semaines. Après huit mois d'observation, la propagation des fissures a évolué, et il y avait nécessité de réparer les resurfaçages fabriqués avec le béton comparable sans fibres. Donc, cela a compromis l'intégrité structurale de la réparation par resurfaçage mince. Par contre, pour les resurfaçages avec un béton renforcé de fibres, les nouvelles fissures sont dues à la réflexion des fissures existantes du support. Cette situation était prévisible vu la minceur du béton de réparation. D'autres fissures ont été produites par des variations volumiques empêchées du béton, mais elles ont été stabilisées par la suite. Aucun décollement n'a été observé à l'interface.

Ce projet permet de mesurer le rôle des fibres dans les réparations par resurfaçage mince. Les fibres ont stabilisé la fissuration et ont assuré un comportement monolithique de la structure après les quelque mois de service. Les réparations sans fibres ont développé des fissures, ce qui a causé la réparation du resurfaçage. Les fibres ont permis d'augmenter la capacité d'absorption d'énergie. Le transfert de charges, entre les fissures par les fibres, permet de limiter les effets de décollement. Donc, les resurfaçages minces en béton renforcé de fibres offrent une meilleure durabilité pour les problèmes de dégradation de surface. Pour les systèmes ancrés ou non ancrés, il est difficile actuellement de se prononcer sur leur comportement de la structure réparée par resurfaçage mince adhérent.

1.3.2 Dalles structurales

Le pont Benicia - Martinez avec une dimension de 6 215 pieds de longueur et 77 pieds de largeur croise la rivière Sacramento en Californie. Des travaux de resurfaçage du tablier ont été réalisés en 1990 avec un béton de polymère à base de polyester. Ce pont est construit en 1950 avec une dalle de béton (surface de roulement).

La problématique, c'est qu'il y a eu présence de fissures généralisées sur toute la surface de la dalle. Pour ralentir la corrosion et améliorer la durabilité, la compagnie Trans - Cal a décidé de remplacer la surface de la dalle endommagée par un resurfaçage en béton de polymère à base de polyester [Smith, 1991]. Une fois les joints d'étanchéité enlevés, le béton détérioré a été scarifié, et toutes les barres d'armature endommagées ont été remplacées par des nouvelles armatures. Ensuite, on a appliqué un agent de liaisonnement à base de méthacrylate sur la surface scarifiée pour augmenter l'adhérence à l'interface support – resurfaçage.

Une paveuse, munie de deux pompes permettant de mélanger granulats, sable, ciment et résine, a été utilisée pour la mise en place du béton. Une couche de béton d'une épaisseur de 20 mm sur toute la largeur a été posée avec une vitesse moyenne de 1,5 m par minute. Après quelques heures, la surface était déjà prête à accueillir la circulation aussitôt le béton durci.

Après la mise en service du pont, les observations ont permis de souligner une performance remarquable du béton de polymère à base de polyester. Aucun décollement et aucun réseau de fissures significatives n'ont été observés. Grâce à une technologie avancée, le polymère est considéré pour sa flexibilité et sa compatibilité chimique avec le béton. Ce qui permet de fabriquer un béton de réparation durable et résistant au retrait de séchage et à la fissuration.

Ce projet met en évidence la bonne performance du béton de polymère à base de polyester. Il est facile de fabriquer ce type de béton en chantier et la mise en place se fait rapidement à l'aide d'une paveuse. Ce béton de réparation est durable (peu de fissures et sans décollement) pour les dalles qui sont endommagées en surface.

RÉFÉRENCES

- ACPA, (1990). *Technical bulletin – Guidelines for bonded concrete overlays*. TB-007 P. Concrete pavement technology, American Concrete Pavement Association, Illinois, 16 p.
- BALENDRAN, R.V., ZHOU, F.P., NADEEM, A. et LEUNG, A.Y.T. (2002). *Influence of steel fibers on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete*. Building and Environment 37 (2002). pp. 1361-1367.
- BISSONNETTE, B. (1996). *Le fluage en traction : un aspect important de la problématique des réparations minces en béton*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Décembre 1996, 290 p.
- CHANVILLARD, G. (1989). *Les bétons renforcés par de faibles dosages de fibres d'acier : propriétés mécaniques, utilisation comme matériaux de resurfaçage*, M. Sc. A., Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Avril 1988, 255 p.
- CHANVILLARD, G., LUPIEN, C. et AÏTCIN, P.-C. (1989). *Resurfaçage en béton renforcé de fibres d'acier, autoroute 40, comté de Kirkland*, Études et recherches en transports, Rapport RTQ-89-02, Ministère des Transports du Québec, Avril 1989, 135 p.
- CONCRETE CONSTRUCTION MAGAZINE (1973). *Concrete repair techniques – methods and materials*. A collection of articles from concrete construction magazine. Updated August 1973, pp. 1-52.
- CONCRETE REPAIR MANUAL (1999). *Technical Bulletin – Guidelines for Bonded Concrete Overlays*, TB-007P, American Concrete Pavement Association, pp. 493-507.
- CUSSON, D. et MAILVAGANAM, N. (1996). *Durability of Repair Materials*. Concrete International, March 1996, Vol. 18, No. 3, pp 34-38.
- DO, M. T. (1989). *Développement d'un essai de délamination par fatigue*, M. SC. A. Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Août 1989, 118 p.

- CHANVILLARD, G., LUPIEN, C. et AÏTCIN, P.-C. (1992). *Étude en laboratoire de l'adhérence béton de resurfaçage - dalle de chaussée*. Revue canadienne de génie civil, Avril 1992, Vol. 19, No. 6, pp. 1041-1048.
- DETWILER, R., KOJUNDIC, T. et FIDJESTOL, P. (1997). *Evaluation of bridge deck overlays*, Concrete International, Août, Vol, 19, No. 8, pp. 43-45.
- EMMONS, P.H. (1992). *Selecting Concrete Repair Materials for Long-Term Durability Based on Available Test Data*. Concrete Repair Bulletin, March - April 1992, Washington D.C., pp 195-198.
- EMMONS, P. H., VAYSBURD, A.M. et MC DONALD J.E. (1993). *A Rational Approach to Durable Concrete Repairs*. Concrete International, September 1993, pp. 40-45.
- EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M. et MC DONALD J.E. (1994). *Concrete Repair In The Future Turn Of The Century – Any Problems?* Concrete International, March 1994, pp. 42-49.
- EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M., MC DONALD J.E. et POSTON, R.W (2000). *Selecting durable repair materials: performance criteria – field studies*. Concrete International, January 2002 pp. 39-45.
- EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M., MC DONALD J.E. et POSTON, R.W (2002). *Selecting durable repair materials: performance criteria – summary*. Concrete International, December 2000 pp. 37-44.
- FARHAT, H. (1999). *Durabilité des réparations en béton de fibres : effet du retrait et de la fatigue*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Décembre 1999, 178 p.
- FARHAT, H., LACHEMI, M. et GAGNÉ, R. (2001). *Étude par éléments finis des mécanismes de rupture des resurfaçages minces adhérents*.
- GAGNÉ, R., LEMIEUX, M., GUINDON, M-A. et POPIC, A (2002) *Analyse du comportement de resurfaçages adhérents utilisés pour réparer des dalles en béton armé*, Congrès annuel des la Société canadienne de génie civil, Montréal 5-8 juin, 10 p.
- GRANJU. J-L. (1996). *Thin Bonded Overlays – About the Role of Fiber Reinforcement on the Limitation of their Debonding*. Advanced Cement Based Material, July 1996, Vol. 4, No. 1, pp. 21-27.
- 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, 11-12 juin, pp. 65-76.
- GUINDON, M-A. (2003) *Étude du comportement des resurfaçages adhérents – mécanismes d'endommagement et influence des paramètres de conception*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, 134 p.

- HEERE, R., MORGAN, D., BANTHIA, N et YOGENDRAN, Y. (1996). *Evaluation of Shotcrete Repaired Dams in British Columbia*. Concrete International, March 1996, pp. 24-33.
- HOLL, C. H. et O'CONNOR S. A. (1997). *Cleaning and Preparing Concrete before Repair*. Concrete International, March 1997, pp. 60-63.
- KHULMANN, L.A. (1990). *Styrene - Butadiene Latex – Modified Concrete : The Ideal Concrete Repair Manuel*. Concrete International, October 1990, Vol. 12, no.10 pp.
- LEMIEUX, M. (2001). *Resurfaçage mince pour dalles structurales en béton armé*. M. Sc. A., Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, 161 p.
- LEMIEUX, M., GAGNÉ, R., BISSONNETTE, B., LACHEMI, M. (2001) *Analyse du comportement de resurfaçages adhérents soumis à des chargements cycliques en flexion*, ACI progrès dans le domaine du béton, Montréal, décembre, 12 p.
- MASSICOTTE, B. et BERNARD, D. (2000). *Construction de dalles de pont à hautes performances avec fibres d'acier*. Innovation Transport, No 7 Février 200, 7 p.
- MORGAN, D.R. et SMITH, G.J.V. (2002). *Resurfacing a Suspension Bridge*. Concrete International, September 2002, pp 50-57.
- MORIN, R., HADDAD, G. et AÏTCIN, P-C. (2002). *Crack-Free, High-Performance Concrete Structures*. Concrete International, September 2002, pp. 43-48.
- NAKANISHI, H., TAKEI, S., MARUYAMA, T. et TANG, B. (2000). *A study on the structural evaluation of a thin cement concrete overlay*. Japan Society of Civil Engineers, Concrete Library International No. 37 June 2001, pp. 49-69.
- PARAMASIVAM, P., ONG, K. C. G., ONG, B. G. et LEE, S. L. (1995). *Performance of Repaired Reinforced Concrete Slabs Under Static and Cycling Loading*. Cement and Concrete Composites, February 1995, Vol. 17, pp 37-45.
- RAPOPORT, J., ALDEA, C-M., SHAH, M., ANKENMAN, B. et KARR, A. *Permeability of Cracked Steel Fiber - Reinforced Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, July/August 2002. pp. 355-358.
- ROGER, P. et NORTHWOOD, P. (1987). *Latex Modified Concrete For Bridge Repairs*. A presentation to the meeting of the Quebec and Eastern Ontario Chapter of A.C.I. in Montreal, November 1987, 4 p.
- SAUCIER, F. BORDELEAU, D. et PIGEON, M. (1990). *Retrait et adhérence du béton modifié au latex*. Matériaux et Constructions, Juillet 1990, Vol. 23, No. 136, pp. 267-276.
- SILFWERBRAND, J. et PAULSSON, J. (1998). *Better Bonding Bridge Decks Overlays*. Concrete International, October 1998, Vol. 20, pp.56-61

- SMITH, A. (1991). *Overlaying concrete bridge decks with polymer concrete*. Concrete Construction, April 1991, pp. 325-331.
- TOMA, G. (1990). *Comportement des bétons au jeune âge*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Décembre 1999, 264 p.
- TOMA, G. (1999). *Comportement des bétons au jeune âge*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Décembre 1999, 264 p.
- WALTERS, D.G (1991). *Styrene-Butadiene Latex-Modified Concrete Bridge-Deck Overlays*. Repairing Concrete Bridges, ACI seminars, SCM-27(93), Second edition, pp. 123-132.
- TOMA, G. (1990). *Comportement des bétons au jeune âge*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Décembre 1999, 264 p.
- WALTERS, D.G. (1991). *Styrene-Butadiene Latex-Modified Concrete Bridge-Deck Overlays*. Repairing Concrete Bridges, ACI seminars, SCM-27(93), Second edition, pp. 123-132.
- YUAN, Y. et WAN, Z. L. (2002). *Prediction of cracking within early- age concrete due to thermal, drying and creep behavior*. Cement and Concrete Research 32 (2002)., pp. 1053-1059.