

SOLUTIONS NOVATRICES DESTINÉES À MINIMISER LES RÉPERCUSSIONS DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION ROUTIÈRE AU CANADA

D.K. Hein, Ing., Ingénieur principal
Applied Research Associates, Inc.
5401, avenue Eglinton Ouest, bureau 204
Toronto (Ontario), Canada M9C 5K6
dhein@ara.com

RÉSUMÉ

La circulation sur les autoroutes et les routes municipales au Canada, surtout dans les grands centres urbains, ne cesse d'augmenter. Dans la région de Toronto, la route 401 constitue le principal axe est-ouest et le flot de circulation quotidien moyen annuel dépasse les 400 000 véhicules. La route express à péage ouverte en 1996 dans le but d'améliorer la circulation sur la route 401 présente également un taux de circulation élevé. Avec l'augmentation du nombre de véhicules lourds sur les routes, l'infrastructure routière se dégrade plus rapidement que prévu, d'où le besoin de procéder à la réfection de celle-ci. Afin de minimiser les effets de tels travaux de construction sur les usagers, les organismes responsables de la voirie/des routes à péage ont décidé de miser sur des solutions novatrices en matière de conception, de construction et de gestion de la circulation, notamment l'utilisation de systèmes d'avertissement avancé et de signalisation de travaux de construction, la mise en service du même nombre de voies de circulation pendant les travaux, la mise en place de mesures incitatives et de pénalités associées à la performance d'exécution des travaux, le recours à la présence policière, le recours à des techniques novatrices en matière de réalisation de revêtements routiers comme l'utilisation de béton à résistance élevée hâtive, l'utilisation de panneaux préfabriqués en béton, la réparation en surface (microsurfaçage et texturation), la pose ou l'ajout de goudrons, la stabilisation des dalles de béton par injection de mousse et la réparation des fissures par agrafage (*stitching*). Le présent document donne un aperçu de ces différentes techniques destinées à minimiser les répercussions des travaux de construction routière sur les usagers et sur le milieu résidentiel et commercial environnant.

Mots clés : entretien des routes, innovation, solutions novatrices, réduction des répercussions des travaux de construction.

1. INTRODUCTION

La route 401 (autoroute Macdonald-Cartier) se prolonge sur un peu plus de 800 kilomètres au sud de l'Ontario. Elle est considérée comme la route la plus achalandée, le taux de circulation quotidien moyen annuel étant estimé à plus de 450 000 véhicules dans le cas du tronçon traversant la ville de Toronto [1]. Cette route est fortement utilisée par les plus de six millions de personnes qui vivent et travaillent dans la région de Toronto, et appuie en outre le système d'inventaire juste-à-temps de l'industrie automobile des régions de l'Ontario, du Michigan et de l'Ohio. C'est également sur la route 401 que se trouve le pont de Hogg's Hollow, le pont à structures multiples le plus achalandé de Toronto. Jusqu'en 1998, la route 401 était la seule autoroute importante qui traversait la ville reine d'est en ouest. En 1996, on a commencé à construire la route à péage 407 qui devait permettre d'améliorer quelque peu la circulation sur la route 401 et constituer une voie de rechange pour traverser la ville.

À l'origine, la route 401 était une route à revêtement superficiel en béton. Le tronçon traversant la ville de Toronto a été ouvert à la circulation en 1938, alors que la route entière ne l'a été que neuf ans plus tard, soit en 1947. Depuis cette époque, des travaux majeurs d'élargissement et de réfection ont été réalisés, et la majorité des tronçons ont été revêtus de béton bitumineux. Le ministère des Transports de l'Ontario (MTO) en est aux étapes finales d'un programme de réfection et d'entretien qui a duré 10 ans et nécessité des investissements de plus de 100 millions de dollars en travaux de revêtement.

Étant donné le taux de circulation très élevé sur cette route, le MTO est parfaitement conscient des répercussions de travaux de construction sur les usagers et sur le milieu résidentiel et commercial environnant. Il est pratiquement impossible d'envisager de fermer la route pendant une période plus ou moins prolongée. Il n'est pas question non plus de réaliser les travaux de jour. Il faut donc que ceux-ci soient effectués de nuit, où l'on pourra alors fermer la route ou y restreindre l'accès pendant une courte période, soit environ six (6) heures. De plus, afin de minimiser les répercussions de ces travaux, le ministère des Transports encourage fortement le recours à des solutions novatrices. L'organisme responsable de l'exploitation de la route à péage est à terminer des travaux de réfection et d'entretien du revêtement de celle-ci afin de réduire le plus possible les retards dans l'écoulement du trafic, qui résulteraient pour lui en une diminution de revenus.

2. ÉVALUATION DES RÉPERCUSSIONS DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION ROUTIÈRE SUR LA CIRCULATION

En 1997, le MTO a mis sur pied un programme d'incitatifs/de pénalités destiné à réduire les coûts associés à la perturbation de la circulation routière occasionnée par les travaux de construction. Selon ce programme, l'entrepreneur est récompensé s'il achève les travaux rapidement, et il est pénalisé s'il accuse un retard. Le montant de l'incitatif ou de la pénalité est basé sur les coûts estimés que devraient assumer les usagers advenant un retard, au moyen d'une formule prenant en compte les conditions particulières de l'emplacement.

2.1 Ouverture de la route retardée en raison des travaux de construction

La stipulation particulière numéro 100F08 du contrat de réfection de route préparé par le ministère des Transports définit les restrictions relatives aux travaux de construction et les pénalités imputées à l'entrepreneur en cas de retard dans l'ouverture des voies de circulation. Ainsi, chaque fois que l'entrepreneur ne respecte pas l'heure prévue d'ouverture des voies de circulation, il se voit imputer une pénalité initiale de 5000 \$, puis une pénalité supplémentaire de 2500 \$ si les voies ne sont pas ouvertes dans les 15 minutes suivantes, puis de 100 \$ par minute de retard supplémentaire.

2.2 Location de voies de circulation

De telles mesures sont mises en application dans le cas de projets de grande envergure qui doivent être achevés à une date prédéterminée, par exemple lorsque les travaux doivent être terminés pour un long week-end particulier ou encore lorsqu'ils sont effectués de nuit. Le montant des incitatifs ou des pénalités est établi à la lumière du jugement professionnel des gestionnaires régionaux, et non selon un processus de calcul des coûts pour les usagers.

Le MTO veille au paiement des incitatifs ou à la perception des pénalités, selon les dispositions particulières numéros 100F09 et 100F10, lesquelles contiennent des articles exigeant que les entrepreneurs terminent l'ensemble des travaux de réfection à une date déterminée sous peine de devoir payer les dommages-intérêts convenus au contrat pour chaque jour civil de retard dans l'exécution des travaux par rapport au nombre de jours ouvrables prévus. Rien n'est toutefois envisagé pour récompenser un entrepreneur qui termine les travaux avant la date annoncée. Le montant des dommages-intérêts convenus est déterminé selon un jugement professionnel.

2.3 Évaluation des répercussions des travaux de construction routière - Étape de conception

En 2004, le MTO a mis au point un outil d'analyse économique des priorités (PEAT, pour *Priority Economic Analysis Tool*) [2] destiné à faciliter, au moyen d'une méthode normalisée, l'analyse coûts-avantages des investissements consentis pour la réfection des infrastructures routières. Cet outil comprend des modèles de coûts associés à la perturbation de la circulation routière occasionnée par les travaux de construction, de même que les valeurs par défaut recommandées. Il permet de calculer les coûts pour les usagers de la route, notamment les coûts associés au temps de transport, aux retards attribuables aux travaux, ainsi que les coûts d'exploitation des véhicules qui comprennent, entre autres, la dépréciation, les assurances, l'essence et l'usure des pneus. Plus récemment, le PEAT a été utilisé pour faire des recommandations concernant le remplacement de la chaussée souple (enduit superficiel) par une chaussée rigide en béton bitumineux dans le cas d'un réseau routier de 350 km dans la région de Sault Ste. Marie [3]. En général, le PEAT est utilisé pour estimer le rapport avantages-coûts aux étapes de la conception et de la planification de travaux d'infrastructure routière et calculer les coûts pour les usagers pour l'ensemble du cycle de vie du revêtement.

2.4 Prise en compte des coûts pour les usagers

Les coûts pour les usagers sont particulièrement importants dans le cas de routes à fort débit, comme la route 401, où la possibilité de retards dans l'exécution des travaux est grande et où les entrepreneurs sont astreints à des exigences particulières afin de respecter les délais, notamment exécuter les travaux de nuit seulement ou aménager des voies de déviation (chaussées revêtues ou accotements élargis) afin de maintenir ouvertes un certain nombre de voies de circulation. Le coût associé au respect de ces exigences est inclus dans le prix contractuel, et donc, dans les coûts de construction. Par conséquent, une partie des coûts accessoires pour l'utilisateur sont transformés en coûts de délégation.

2.5 Coûts pour les usagers

Les coûts pour les usagers de la route appartiennent à la catégorie des coûts indirects qui peuvent être pris en compte au moment de comparer les facteurs et les conséquences associés au choix d'un type de revêtement de chaussée et à l'investissement consenti. Ces coûts indirects comprennent ce qui suit :

- coûts de retard (perte de temps pendant les périodes de congestion attribuables aux travaux de construction);
- coûts d'exploitation des véhicules;
- coûts liés aux accidents;
- coûts environnementaux.

2.5.1 Coûts de retard

Les coûts de retard sont les coûts associés au temps perdu par les automobilistes et autres conducteurs qui doivent circuler dans des zones de construction ou emprunter des voies de déviation en raison de l'exécution de travaux d'entretien ou de réfection des routes. La nature, la durée et la fréquence de tels travaux diffèrent selon le type de revêtement de chaussée. Même si le MTO ne mentionne pas explicitement les coûts de retard lorsqu'il sollicite des offres pour des travaux de construction, il inclut toutefois dans le contrat des dispositions destinées à minimiser les coûts pour les utilisateurs, notamment l'obligation de garder ouvertes un certain nombre de voies de circulation à différentes périodes au cours de l'exécution des travaux ainsi que l'obligation de terminer les travaux aux dates prévues. Par conséquent, les coûts de retard sont généralement inclus dans le coût des travaux d'entretien et de réfection de routes importantes.

2.5.2 Coûts d'exploitation des véhicules

Les coûts d'exploitation des véhicules (CEV) comprennent les coûts associés à la possession, au fonctionnement et à l'entretien de ces derniers. Le PEAT [2] prévoit des calculs distincts pour les coûts de l'essence, de l'huile, des pneus, de l'entretien/de la réparation et de la dépréciation des véhicules. Ces coûts dépendent de la densité et du débit de circulation, mais surtout de l'uniformité du revêtement de chaussée et sont donc généralement pris en compte lors de l'analyse des répercussions du choix du revêtement ainsi que des activités d'entretien et de réfection connexes. Pour le moment, le MTO ne tient pas systématiquement compte des CEV.

2.5.2 Coûts liés aux accidents

Les taux d'accidents de la route (accidents mortels, accidents causant des blessures corporelles, accidents causant des dommages matériels seulement) peuvent différer selon le type de revêtement de chaussée, chacun présentant des caractéristiques propres susceptibles d'avoir une incidence quelconque, bien que marginale, sur le taux d'accidents. Parmi ces caractéristiques, mentionnons l'adhérence de la chaussée au cours de la période d'analyse et sous différentes conditions (chaussée sèche, chaussée mouillée, chaussée glacée), la visibilité des lignes de circulation, la visibilité des caractéristiques géométriques de la route dans des conditions météorologiques défavorables, le niveau d'éclairage la nuit, et d'autres caractéristiques comme la possibilité de formation de glace sur la surface de roulement. Pour le moment, le MTO ne tient pas systématiquement compte de ces coûts.

2.5.3 Coûts environnementaux

Les coûts environnementaux sont les coûts liés au bruit ainsi qu'à la pollution de l'air et à la pollution de l'eau.

Pollution de l'air – Il existe différents coûts liés à la pollution de l'air, notamment ceux qui s'appliquent à l'émission de gaz à effet de serre. Selon une étude menée par le Conseil national de recherches du Canada, certains indicateurs permettent de conclure que le taux de consommation des camions peut être moindre si ces derniers circulent sur une chaussée en béton de ciment Portland plutôt que sur une chaussée en béton bitumineux [4]. Ceci n'a cependant pas été appuyé par d'autres études. Les taux de

consommation d'énergie liés à l'uniformité de la chaussée font généralement partie des CEV.

Bruit – Le bruit généré par des travaux de construction routière n'est habituellement pas plus important que le bruit généré par la circulation des véhicules en périodes d'utilisation normale de la route. Il existe une masse de renseignements sur le bruit associé à l'interaction entre les pneus d'un véhicule et la texture de la chaussée sur laquelle il circule. La plupart des études de mesure du bruit comparent l'aptitude des différentes surfaces de chaussée à générer un bruit de roulement en diverses situations. Par exemple, certaines études portent sur la mesure du bruit tout près de l'interface pneumatique/chaussée, ou sur la mesure du bruit émis par un véhicule passant à une distance de 7,5 m du microphone. Le bruit généré par des travaux de construction comprend le bruit produit par le fonctionnement de l'équipement lourd, par les avertisseurs de recul des véhicules de construction et par la manœuvre des bennes basculantes. Si tous ces bruits ne sont habituellement pas contrôlés et gérés pendant des activités de construction, on s'y est intéressé de façon particulière dans le cas de la route 401, à Toronto, où la majorité des travaux sont exécutés pendant la nuit. On s'attend à ce que les restrictions concernant le bruit généré par des travaux de construction exécutés la nuit soient incluses dans les devis de construction de l'Ontario d'ici peu.

Pollution de l'eau – Les répercussions des travaux de construction sur la pollution de l'eau sont régies par les lois et règlements du Canada sur l'environnement, lesquels règlementent de façon stricte l'écoulement des eaux de ruissellement en provenance de chantiers de construction ainsi que les répercussions des travaux sur les cours d'eau locaux.

3. MÉTHODES DE RÉDUCTION DES RÉPERCUSSIONS DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION

Afin d'atténuer les répercussions des travaux de construction sur les usagers de la route et sur le milieu environnant, le gouvernement de l'Ontario a adopté une stratégie novatrice de conception et de construction visant soit à réduire le délai d'exécution des travaux, soit à augmenter l'intervalle entre les activités d'entretien et de réfection. Voici quelques-unes des technologies qui ont fait leurs preuves :

- réparation en profondeur au moyen de panneaux préfabriqués en béton précontraint;
- rétablissement du transfert de charge;
- réparation des chaussées au moyen de béton à résistance élevée hâtive;
- stabilisation des dalles;
- microsurfaçage.

Chacune de ces méthodes d'entretien et de réfection des chaussées et leurs répercussions sur les usagers de la route sont examinées aux articles ci-après.

3.1 Réparation en profondeur au moyen de panneaux préfabriqués en béton précontraint

La réparation en profondeur de chaussées est une méthode de réfection qui consiste à enlever les dalles ou une portion substantielle (sur toute leur épaisseur) des dalles endommagées, à installer des dispositifs de transfert de charge et à mettre en place de

nouvelles dalles. L'utilisation de panneaux préfabriqués en béton précontraint est une technologie éprouvée mais relativement récente de réparation en profondeur des chaussées en béton de ciment Portland. Elle offre la possibilité d'exécuter les travaux en ne procédant à la fermeture des voies que pendant de courtes périodes la nuit et en permettant leur réouverture pour l'heure de pointe suivante. Cette technique a été utilisée pour la réparation rapide de certains désordres localisés de même que pour la construction/le remplacement de plus longs tronçons de route.

3.1.1 But et critères de sélection

La réparation en profondeur a pour but de remplacer les dalles en béton de ciment Portland qui présentent des fissures profondes et qui ne peuvent être réparées par emplois partiels (réparation en surface). Il s'agit habituellement de dalles dont le béton est dégradé (surtout près des joints), de dalles fissurées en leur centre, de dalles endommagées par le gel ou en raison d'un tassement de l'assise sous-jacente ou encore de dalles dont les goujons sont dénudés. Cette technique vise à restaurer l'uniformité et l'intégrité structurale du revêtement et à empêcher qu'il se dégrade davantage.

Dans le cadre d'un projet de réfection d'une chaussée, la réparation en profondeur est souvent réalisée conjointement avec d'autres types de techniques d'entretien, comme la réparation en surface, la stabilisation des dalles, ainsi que le calfeutrage des fissures et des joints.

3.1.2 Matériaux et mise en oeuvre

En matière de réfection des chaussées, les panneaux préfabriqués en béton présentent un certain nombre d'avantages sur le béton coulé en place. Ces éléments sont fabriqués dans des conditions contrôlées pour ce qui est du gâchage, de la cure, du dimensionnement, de la température et du degré d'humidité par exemple, contrairement au béton coulé en place qui peut être soumis à des conditions très variables.

La réparation des chaussées par utilisation de panneaux préfabriqués peut être une bonne solution de rechange à la réparation au moyen de béton coulé en place lorsque la durée des travaux doit être minimisée. Ces éléments sont mis en place d'une seule pièce là où le revêtement doit être réparé, avant ou après l'installation de goujons destinés à rétablir le transfert de charge.

La méthode d'installation la plus courante consiste à percer des trous dans la paroi verticale, aux deux extrémités de l'évidement réalisé, d'y insérer des goujons en laissant apparente une partie de ceux-ci, cette partie venant s'insérer dans des fentes pratiquées dans l'élément préfabriqué lorsque celui-ci est déposé en place (figure 1). Une fois l'installation terminée, un coulis de ciment est injecté sous pression pour bien combler les fentes et tout autre vide sous la dalle.



Figure 1 – Installation d'un panneau préfabriqué

3.1.3 Performance

Selon une étude réalisée au Texas [5], l'utilisation de panneaux préfabriqués constitue une méthode pratique de réalisation en accéléré de chaussées en béton de ciment Portland. Le temps de cure obligatoire avant l'ouverture des voies à la circulation est de ce fait éliminé. La précontrainte des panneaux permet l'utilisation d'éléments plus minces. Un tronçon mis à l'essai par le ministère des Transports du Texas ne montre pratiquement aucun signe de détérioration après 15 années de vie utile.

Le ministère des Transports du Colorado [6] a expérimenté différentes méthodes d'installation de panneaux préfabriqués en béton, soit avec injection de mousse de polyuréthane sous les panneaux aux fins de stabilisation de ces derniers et mise en place de tirants en fibres de verre. Le taux de défaillance des panneaux minces (160 mm ou moins) était assez élevé, 24 p. 100 de ceux-ci montrant des signes de détérioration importante après quelques années de vie utile. Celui des panneaux plus épais (au moins 185 mm) était beaucoup plus raisonnable, soit de 1,5 p. 100. L'expérience menée au Colorado a démontré que les travaux préparatoires à l'installation de panneaux préfabriqués sont très importants et que l'utilisation de tels éléments pour la réparation des chaussées en béton permet de réduire les répercussions sur la circulation de même que les coûts pour les usagers.

3.1.4 Durée et coût de vie utile

En Ontario, un essai de réparation de chaussée au moyen de panneaux préfabriqués en béton a été réalisé sur la route 427. À ce jour, on peut conclure que la performance à court terme a été bonne; toutefois, on a noté une fissuration de la surface contiguë en béton à l'endroit de l'insertion des goujons. Aucun projet dans la province n'a permis d'évaluer la performance à long terme.

Selon l'étude menée au Texas, les réparations réalisées avec des panneaux préfabriqués en béton peuvent durer 15 ans ou plus, et le coût typique d'une réparation en profondeur est de l'ordre de 10 000 \$US par panneau. Selon l'étude menée au Colorado, il est de l'ordre de 9 000 \$US par panneau. Cette dernière étude a également démontré que les économies quant aux coûts de retard pour les usagers réalisées avec cette méthode pouvaient s'élever jusqu'à 100 000 \$US par journée de travail, comparativement à la

méthode de réparation traditionnelle au moyen de béton coulé en place, qui nécessite un temps de cure du béton avant la réouverture des voies à la circulation.

3.1.5 Résumé

Les panneaux préfabriqués sont utilisés avec succès au Texas depuis plus de 15 ans pour la réparation rapide de parties localisées de chaussées en béton de ciment Portland dégradées, de même que pour la construction ou le remplacement de plus longs tronçons de route. Forts de ces résultats, d'autres provinces canadiennes et des États américains en ont fait l'essai sur leurs routes, notamment l'Ontario, le Michigan et l'État de New York. Cette méthode offre la possibilité d'exécuter les travaux en ne procédant à la fermeture des voies que pendant de courtes périodes la nuit et en permettant leur réouverture pour l'heure de pointe suivante. Son coût est légèrement supérieur à celui de la méthode traditionnelle de réparation en profondeur, toutefois, le temps d'exécution des travaux, beaucoup moins long, permet d'arriver à un coût de cycle de vie très concurrentiel par rapport à celui de cette dernière.

3.2 Rétablissement du transfert de charge

Le transfert de charge est la distribution de la charge des roues d'un véhicule de part et d'autre d'un joint transversal d'une chaussée en béton de ciment Portland à dalles jointoyées. Cette distribution de la charge de part et d'autre d'un joint (ou d'une fissure) peut être assurée de deux façons, c'est-à-dire par emboîtement des granulats ou par utilisation de dispositifs mécaniques à cet effet. Un transfert de charge inefficace peut entraîner de nombreuses défaillances de la chaussée, notamment le phénomène de pompage, le décalage des dalles et la fissuration du coin de ces dernières. De telles défaillances ont une incidence sur la durée de vie du revêtement.

Le rétablissement du transfert de charge est une technique utilisée pour restaurer l'efficacité de celui-ci aux joints/fissures, ce qui permet d'améliorer la tenue de la chaussée et la qualité de roulement.

3.2.1 But et critères de sélection

Le rétablissement du transfert de charge consiste à insérer ou à ajouter des goujons aux joints transversaux d'un revêtement de chaussée à dalles jointoyées. L'objectif recherché est d'augmenter l'efficacité de transfert de charge et ainsi ralentir ou empêcher la progression des phénomènes de décalage (élévation ou dépression d'une dalle par rapport à une dalle adjacente), de pompage (éjection brutale des matériaux de sous-couches soit en rive de chaussée, soit dans les joints en raison d'une déflexion du sol sous-jacent) et de fissuration des dalles.

Le rétablissement du transfert de charge est indiqué pour les revêtements dont l'indice de transfert de charge est de 60 p. 100 ou moins par temps froid, qui présentent des signes précoces de défaut aux joints (dénivellations de plus de 2 mm mais de moins de 3 mm), ou de pompage, et qui ont une épaisseur appropriée. Pour bien choisir les joints transversaux qui bénéficieraient d'une intervention aux fins de rétablissement du transfert de charge, il est recommandé d'évaluer l'efficacité de ce dernier au moyen d'essais au défectomètre à masse tombante. On procède généralement au rétablissement du transfert de charge au moment de l'exécution d'autres travaux de réfection comme le recalfutrage des joints et la réparation en profondeur, et avant toute opération de rechargement.

L'agrafage est une technique de réparation des fissures longitudinales ou de renforcement des joints longitudinaux par insertion de tirants, dans le but de prévenir l'élargissement de ceux-ci (déplacement longitudinal des dalles/*slab migration*). Plus les fissures et les joints sont étroits, plus il sont faciles à calfeutrer, meilleur est le maintien de l'emboîtement granulaire et moins grandes sont les possibilités de décalage des dalles. On procède généralement à l'agrafage dans le cas des revêtements qui sont en bon état général mais dont les fissures et les joints longitudinaux commencent à s'élargir. Toutefois, si un simple recalfeutrage des fissures et des joints suffit à rétablir la performance de la chaussée, alors l'agrafage n'est pas indiqué.

3.2.2 Matériaux et mise en oeuvre

Les principales étapes de conception et de construction en matière de rétablissement du transfert de charge sont définies ci-après.

La détermination des joints et fissures à réparer doit être fondée sur des essais au déflectomètre à masse tombante. Il se peut que certains joints ne nécessitent aucune réfection et que d'autres nécessitent une réparation en profondeur plutôt qu'une simple intervention destinée à rétablir l'efficacité du transfert de charge.

Une scie à diamant est l'outil le plus couramment utilisé pour pratiquer des rainures, même si des fraiseuses modifiées ont également été employées à cette fin. Les rainures doivent être pratiquées perpendiculairement aux joints transversaux et être suffisamment grandes pour permettre la mise en place des goujons à mi-épaisseur de la dalle et le parfait enrobage de ceux-ci par le matériau de remplissage. Il importe de bien nettoyer les rainures par projection d'un abrasif puis par projection d'air comprimé.

En général, on utilise comme dispositifs de transfert de charge des goujons lisses à revêtement époxy. Certaines entreprises se servent maintenant de goujons en acier inoxydable. Les goujons ont habituellement un diamètre de 30 à 40 mm et une longueur de 350 à 460 mm (Figure 2). Une moitié des goujons est recouverte d'un agent anti-adhérence (à base de graisse) et est munie d'une douille d'expansion. Un dispositif d'écartement est inséré au milieu de la rainure afin de la maintenir ouverte (Figure 3).

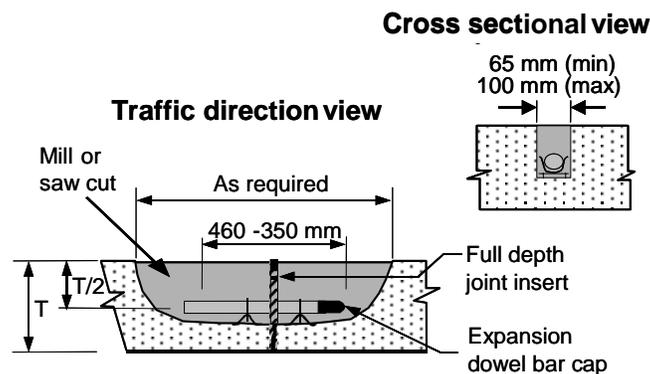


Figure 2 – Mise en place d'un goujon aux fins de rétablissement du transfert de charge

Cross sectional view = Vue en coupe

65 mm (min) = 65 mm (min.)/100 mm (max) = 100 mm (max.)

Traffic direction view = Vue dans le sens de la circulation

Mill or saw cut = Rainure taillée à la scie ou à la fraiseuse

As required = Selon les besoins
Full depth joint insert = Fond de joint pleine épaisseur
Expansion dowel bar cap = Douille d'expansion



Figure 3 – Mise ne place d'un dispositif d'écartement dans la rainure.

Le matériau de remplissage mis en œuvre doit atteindre rapidement la résistance appropriée afin de permettre l'ouverture des voies de circulation dans les plus brefs délais, et être du type à retrait minime ou nul. Les bétons de résine et les bétons à résistance élevée hâtive sont les produits habituellement utilisés dans le cas de la plupart des revêtements de chaussée.

3.2.3 Résumé

Les techniques de rétablissement du transfert de charge s'exécutent très rapidement, perturbent peu la circulation et peuvent représenter un moyen économique de prolonger la durée de vie d'un revêtement en béton.

3.3 Agrafage des fissures et des joints

Il existe deux techniques d'agrafage des fissures et des joints, soit l'agrafage « à rainure » et l'agrafage à « croisement ».

L'agrafage à rainure (*slot stitching*) s'apparente beaucoup à la technique employée pour rétablir le transfert de charge, si ce n'est que :

- l'agrafage sert à réparer des fissures et des joints longitudinaux (par opposition à des fissures et des joints transversaux);
- plutôt que des goujons lisses, il utilise des tirants à haute adhérence (à diamètre plus faible, et posés avec un plus grand espacement que dans le cas des goujons);
- les tirants ne sont pas revêtus d'un agent anti-adhérence.

L'agrafage « à croisement » (*cross stitching*) comprend les étapes suivantes :

- perçage de trous à un angle de 35 à 45°, de façon qu'ils croisent la fissure ou le joint longitudinal à la mi-épaisseur de la dalle (Figure 4);
- nettoyage des trous par projection d'air comprimé;
- injection de résine époxy dans les trous (en quantité suffisante pour que tout l'espace soit rempli après l'insertion d'un tirant);

- insertion des tirants, de façon que l'extrémité de ceux-ci soit à environ 25 mm en creux par rapport à la surface du revêtement (Figure 5);
- enlèvement de l'excédent de résine époxy et finition de celle-ci à fleur du revêtement.



Figure 4 – Perçage de trous pour un agrafage à croisement.

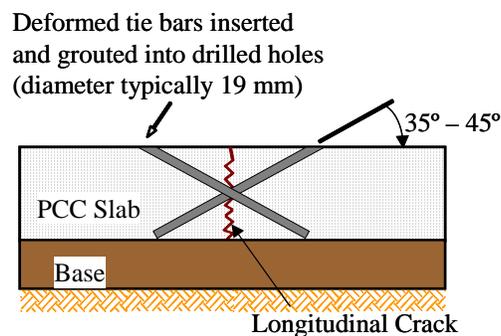


Figure 5 – Fissure longitudinale agrafée.

Deformed tie bars (...) = Tirants à haute adhérence insérés dans des trous injectés de résine époxy (diamètre type de 19 mm)

Longitudinal Crack = Fissure longitudinale

PCC Slab = Dalle en BCP

Base = Couche de base

3.3.1 Aperçu de la performance

Le département des Transports de l'État de Washington (WSDOT) a procédé à la remise en état de plus de 350 kilomètres de voie par la pose de goujons [8]. Le WSDOT a alors conclu à la pertinence de cette technique pour la remise en état de revêtements en béton dégradés. Cette technique convient à des revêtements dont moins de 10 p. 100 des dalles devraient être remplacées et qui présentent un décalage entre dalles moyen de 3 à 13 mm.

Harvey et Bian ont réalisé une étude [9] fondée sur des essais accélérés de revêtements à l'aide du simulateur de poids lourd (HVS, *Heavy Vehicle Simulator*). Leur but était d'évaluer la performance de joints et fissures réparés à l'aide de goujons, telle que mesurée par la flexion de la chaussée et l'efficacité du transfert de charge (ETC). L'étude

a révélé que la pose de goujons améliorerait significativement l'efficacité du transfert de charge et atténuait tout aussi significativement les flexions dues tant aux charges qu'aux facteurs environnementaux, par rapport à un revêtement non goujonné. Un rapport de trois goujons par piste de roue affichait une ETC significativement moindre qu'un rapport de quatre goujons par piste de roue.

3.3.2 Durée et coût de vie utile

En Ontario, le rétablissement du transfert de charge a été effectué avec succès aux joints des routes 407 et 417 qui avaient été jugés inadéquats à cet égard. À ce jour, la pose des goujons a donné les résultats attendus à court terme. L'application de cette technique étant récente dans la province, il n'est pas possible de juger de la performance à long terme de celle-ci.

La durée de vie estimative de la pose de goujons aux fins du rétablissement du transfert de charge est de 7 à 15 ans; elle est de 10 ans et plus quand le but est de réparer des fissures. Le coût type de ces interventions est de l'ordre de 50 \$US par goujon. Le coût estimatif de la remise en état d'un joint complet, soit la mise en œuvre de quatre goujons dans chaque piste de roue, s'élève à 400 \$US.

3.3.4 Résumé

La pose de goujons s'avère une technique valable pour rétablir l'efficacité du transfert de charge aux joints ou aux fissures. Cette technique améliore à son tour la durée de vie du revêtement et la douceur de roulement. Son efficacité dépend de la qualité de sa mise en œuvre et de la qualité du béton existant.

Si l'intervention a lieu avant que le joint soit trop dégradé, elle peut arrêter la progression du décalage entre dalles, le pompage (flexions répétées aux joints transversaux pouvant entraîner l'érosion de la couche de base sous la dalle), et la fissuration de la dalle causée par un transfert de charge inadéquat.

Le rétablissement du transfert de charge est un moyen économique de prolonger la durée de vie d'un revêtement en béton tout en réduisant au minimum la perturbation de la circulation.

3.4 Réparation de revêtements à l'aide de béton à résistance élevée hâive

La réparation en profondeur de revêtements en béton de ciment Portland (BCP) (Figure 6) est une technique de remise en état qui comprend l'enlèvement de toute la dalle, ou d'une partie importante de celle-ci (sur toute son épaisseur), l'installation de dispositifs de transfert de charge et la mise en place de nouveau BCP.



Figure 6 – Zone de réparation de 2 m prête pour la mise en place du béton.

3.4.1 But et critères de sélection

Une réparation en profondeur a pour objet la réparation de dalles qui ne se prêtent pas à une réparation en surface. Celles-ci comprennent des dalles cassées, fissurées à mi-épaisseur, endommagées par le soulèvement dû au gel et le tassement de la couche de fondation, ainsi que des dalles qui présentent un transfert de charge inadéquat et des dalles qui laissent paraître les goujons. L'objectif de la réparation est de rétablir l'uni et l'intégrité structurale du revêtement, et d'en arrêter la dégradation.

Les réparations en profondeur sont souvent effectuées en même temps que d'autres travaux d'entretien, comme des réparations en surface, la stabilisation des dalles et le calfeutrage des fissures et des joints, entrepris dans le cadre d'un projet de réhabilitation du revêtement. Les réparations en profondeur à l'aide de BCP sont aussi une étape préalable au renouvellement de la couche de surface.

3.4.2 Matériaux et mise en œuvre

Selon que la zone à réparer doit demeurer ou non ouverte à la circulation, on peut avoir recours à un BCP contenant soit du ciment Portland normal, soit du ciment Portland à résistance élevée hâtive. On peut aussi avoir recours à des ciments modifiés par l'ajout d'accélérateurs de prise, de polymères ou des produits brevetés spéciaux.

Voici les étapes habituelles d'une réparation en profondeur par coulage en place d'un revêtement en béton de ciment Portland à joints goujonnés :

Délimitation des surfaces à réparer – Une examen approfondi est nécessaire pour déterminer les surfaces qui ont besoin d'être réparées. Une inspection visuelle n'est pas suffisante (Figure 7). Une réparation en profondeur doit être exécutée sur toute la largeur de la voie, et pas moins de 2,0 m de largeur. Les dimensions maximales d'une réparation doivent être telles que la dalle existante puisse être préservée sur au moins 2,0 m de largeur. S'il reste moins de 2,0 m de largeur de la dalle existante, toute la dalle doit être remplacée (Figure 8). Lorsque les surfaces à réparer sont rapprochées, on doit les traiter comme si elles constituaient une seule et même surface.

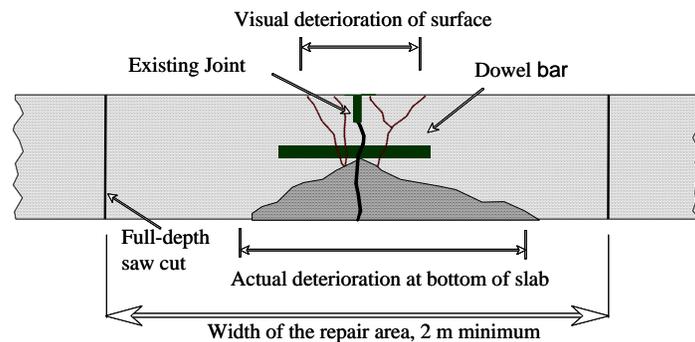


Figure 7 – Coupe d'un joint transversal dégradé.

Visual deterioration of surface = Dégradation visible de la surface

Existing Joint = Joint existant

Dowel bar = Goujon

Full-depth saw cut = Trait de scie pleine épaisseur

Actual deterioration at bottom of slab = Dégradation réelle dans la partie inférieure de la dalle

Width of the repair area, 2 m minimum = Largeur de la réparation, au moins 2 m

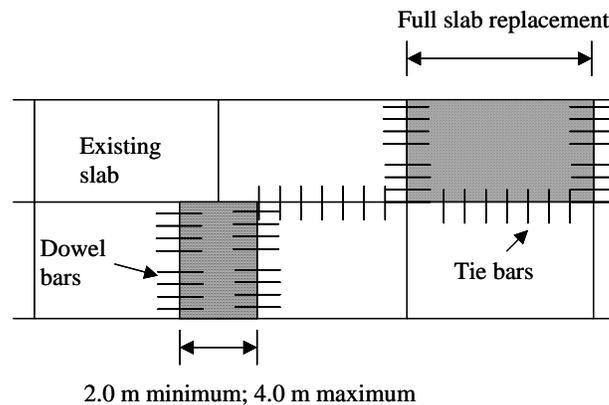


Figure 8 - Exemple de délimitation des surfaces à réparer en profondeur sur une route à deux voies.

Full slab replacement = Remplacement de la dalle entière

Existing slab = Dalle existante

Dowel bars = Goujons

Tie bars = Tirants

2.0 m minimum ; 4.0 m maximum = Minimum 2,0 m; maximum 4,0 m

Préparation de la couche de fondation et de la couche de base – Après que le béton détérioré a été enlevé, la couche de base, la couche de fondation et les drains souterrains doivent être remis en état. Tous les matériaux remués doivent être compactés de nouveau.

Mise en place des goujons et des tirants – Le transfert de charge doit être rétabli aux joints transversaux entre la surface existante et la surface réparée. La manière habituelle de procéder est d'insérer des goujons revêtus de résine époxy à mi-épaisseur de la dalle existante. Il faut pour cela percer des trous dans la face apparente des dalles, injecter dans les trous un produit d'ancrage à base de résine époxy ou de ciment, et insérer les goujons. Une procédure semblable est mise en œuvre pour l'installation des tirants. Les tirants sont utilisés pour les joints longitudinaux et ils ont un diamètre inférieur à celui des goujons.

Bétonnage – Avant de couler le béton, on doit revêtir les goujons et tirants apparents d'un produit anti-adhérence, afin de les empêcher d'adhérer au béton. Le bétonnage doit être effectué conformément aux procédures standard.

Finition et texturation – À moins qu'il soit prévu de meuler toute la section du revêtement, la surface réparée doit être texturée de façon que son fini ressemble à celui du reste du revêtement.

Cure – La cure doit commencer le plus tôt possible après la texturation. Un produit de cure contenant un pigment blanc est habituellement utilisé.

Recalfeutrage des joints – Tous les joints longitudinaux et transversaux doivent être recalfeutrés. Le recalfeutrage comprend les étapes suivantes : découpage à la scie le plus tôt possible après la cure, nettoyage en profondeur du joint, et calfeutrage du joint à l'aide d'un composé caoutchouté coulé à chaud.

3.4.3 Aperçu de la performance

Yu et coll. [10] ont constaté, au terme d'un examen des sites d'essai C206 du Programme stratégique d'infrastructures routières (PSIR), que le BCP à résistance élevée hâtive peut afficher une bonne performance à long terme, bien que des conditions météorologiques défavorables au moment des travaux puissent entraîner une dégradation prématurée du béton. En effet, si, pendant la cure, la température moyenne du BCP s'écarte de façon importante des faibles températures enregistrées la nuit, des fissures longitudinales risquent d'apparaître, en raison des goujons qui s'opposent à la contraction thermique transversale. L'étude a révélé que, du point de vue des dommages par fatigue ou du décalage entre dalles, il était possible d'ouvrir à la circulation les surfaces réparées même si elles affichaient une résistance beaucoup plus faible que les valeurs habituellement recommandées. Il n'est toutefois pas conseillé de rouvrir les routes avant que le revêtement ait atteint les valeurs de résistance recommandées, en raison du risque de défaillances soudaines causées par le passage d'une charge lourde, lors d'une mise en service hâtive.

Le projet 18-04B du NCHRP, dont le rapport s'intitule *Early Opening-to-Traffic Portland Cement Concrete for Pavement Rehabilitation* [11], a évalué quatorze mélanges contenant du ciment Portland à résistance élevée hâtive pour réparations en profondeur, conçus pour des fenêtres d'ouverture à la circulation de 6 à 8 heures. L'étude a révélé qu'il est possible de produire des mélanges à résistance élevée hâtive donnant un revêtement d'une résistance adéquate, mais que les interactions entre les divers composants pourraient altérer la durabilité de certains mélanges. Les auteurs ont donc recommandé de soumettre les mélanges à des essais de durabilité, pour obtenir une assurance quant à la durée de vie de la réparation.

Lee et Choi [12] ont présenté une étude de cas menée en Californie, qui portait sur une nouvelle méthode de réfection routière en régime accéléré. Un tronçon de 4,5 km d'une route fréquentée par des camions, et dont le revêtement en béton était très endommagé, a été reconstruit en deux périodes de 215 heures (environ 9 jours). La route était fermée dans un seul sens (les véhicules étaient autorisés à circuler à contresens) et les travaux se déroulaient sans interruption, soit 24 heures sur 24, sept jours par semaine. Du béton à prise rapide a été utilisé. Les mêmes travaux se seraient échelonnés sur 10 mois si on avait eu recours aux fermetures de nuit classiques. On a également mis en place un système automatisé d'information sur les travaux en cours et organisé une campagne

d'information du public. La réfection des routes en régime accéléré a comme avantages une perturbation minimale de la circulation pour les usagers de la route, une espérance de vie prolongée (30 ans et plus) du revêtement, une plus grande sécurité pour les automobilistes et les travailleurs, et des coûts moindres pour l'administration routière, comparativement à l'approche traditionnelle des fermetures de nuit répétées.

3.4.4 Durée et coût de vie utile

Les réparations en profondeur peuvent durer 20 ans ou plus. Le coût type d'une réparation en profondeur à l'aide de béton classique est de l'ordre de 200 \$US/m². L'utilisation de béton à résistance élevée hâtive fait monter ce coût à environ 500 \$US/m².

3.4.5 Résumé

Depuis plus de 10 ans, on utilise, en Ontario, du béton à résistance élevée hâtive pour réparer promptement des dommages localisés dans des dalles de BCP. Pour autant que des contrôles adéquats pendant le bétonnage et la cure fassent en sorte que les gradients de température demeurent dans des limites acceptables, la performance du béton à résistance élevée hâtive devrait être aussi bonne que celle du béton classique. Des travaux en régime accéléré ont été réalisés à l'aide de ce type de béton au cours de fermetures de nuit classiques, d'une durée de 5 à 6 heures, des routes de la région de Toronto.

3.5 Microsurfaçage

Le microsurfaçage consiste à appliquer à froid, sur la surface du revêtement, un mélange constitué d'une émulsion bitumineuse modifiée aux polymères, de granulats emboîtants haute qualité, d'une charge minérale, d'eau et d'autres additifs, à l'état de boue.

Le squelette de granulats utilisé pour le microsurfaçage est constitué de particules de granulats haute qualité emboîtants concassés. Il est donc possible de mettre en œuvre le mélange de microsurfaçage en couches plus épaisses que la dimension du granulat le plus gros, ou d'appliquer plusieurs couches sans courir le risque d'une déformation permanente.

3.5.1 But et critères de sélection

Le microsurfaçage est habituellement utilisé soit pour revêtir une couche bitumineuse, comme une couche de béton bitumineux mélangé à chaud, soit à titre de traitement de surface. Dans le premier cas, il vise à corriger des désordres de la surface, comme une légère fissuration en bloc, l'arrachement et la ségrégation, le ressuage, et la perte d'adhérence de la chaussée. Comme le mélange de microsurfaçage contient des granulats haute qualité concassés, il est aussi utilisé pour remplir des ornières et des déformations de surface de 40 mm de profondeur ou moins. Effectué à titre de traitement d'entretien préventif, le microsurfaçage scelle la surface du revêtement en béton bitumineux, ce qui empêche l'infiltration d'eau et ralentit de façon importante l'oxydation de la surface bitumineuse existante, phénomène précurseur de problèmes d'arrachement et de fissuration. Le microsurfaçage peut aussi être utilisé pour prolonger la durée de vie du revêtement, en attendant des travaux de remise en état plus durable.

3.5.2 Durée et coût de vie utile

Lorsqu'il est effectué à titre d'entretien préventif pour protéger le revêtement de béton bitumineux, le microsurfaçage peut allonger de 4 à 6 ans la vie du revêtement. Lorsqu'on souhaite plutôt améliorer la surface du revêtement, soit, par exemple, lui donner une meilleure adhérence ou combler des ornières, les effets du microsurfaçage peuvent durer de 5 à 8 ans. Le coût du microsurfaçage est d'environ 3 à 5 \$US le mètre carré.

3.5.3 Matériaux et mise en œuvre

Le microsurfaçage s'effectue à l'aide d'une mélangeuse automotrice à alimentation continue. Le mélange de microsurfaçage, qui est conçu par un entrepreneur ou un fournisseur d'émulsion, est constitué des trois principaux ingrédients décrits ci-après.

Une *émulsion bitumineuse modifiée aux polymères*, constituée dans une proportion de 60 à 65 p. 100 de ciment bitumineux. Les polymères, habituellement à base de latex, représentent environ 3 à 5 p. 100 du poids du ciment bitumineux. En tout, le mélange de microsurfaçage comprend de 8 à 9 p. 100, environ, de liant routier résiduel. L'ajout de polymère améliore les propriétés liantes du ciment bitumineux et réduit sa vulnérabilité à la température.

Les *granulats* utilisés pour le microsurfaçage sont produits à partir de pierre concassée haute qualité. Il s'agit habituellement de granulats à haute densité. L'utilisation de granulats ouverts (à fort pourcentage de vides) est peu courante en Amérique du Nord. Le cas échéant, de la cellulose ou des fibres minérales sont ajoutées au mélange de microsurfaçage pour en augmenter la consistance et prévenir un trop fort débit d'écoulement de l'émulsion.

L'International Slurry Surfacing Association recommande deux types de granulométrie, le type II et le type III. La granulométrie de type II est relativement fine, de 90 à 100 p. 100 des matériaux passant au travers d'un tamis de 4,75 mm; c'est généralement cette granulométrie qui est utilisée pour les rues en zone résidentielle. La surface présente la texture « rocheuse » typique du microsurfaçage. La granulométrie de type III est plus grossière, 70 à 90 p. 100 des matériaux passant au travers d'un tamis de 4,75 mm, et elle est généralement utilisée sur des structures où la circulation est intense. Lorsqu'une granulométrie de type III est utilisée, le mélange de microsurfaçage doit être appliqué en une épaisseur minimale de 10 mm, dans le cas où une seule couche est prévue.

La *charge minérale*, normalement constituée de ciment Portland ou de chaux hydratée, sert à déterminer le temps de cure du mélange. La charge minérale représente généralement moins de 1 p. 100 du poids du mélange sec.

Sur les structures où la circulation est intense, et/ou lorsque la surface du revêtement présente des déformations mineures et/ou des ornières de plus de 6 mm de profondeur, environ, il est recommandé d'effectuer le microsurfaçage en deux passes. La première passe (de nivellement) sert à améliorer le profil du revêtement et la deuxième, à appliquer la couche de roulement. Les ornières de plus de 13 mm de profondeur doivent être remplies de mélange de microsurfaçage à l'aide d'un cadre tracté.

Certaines administrations creusent et calfeutrent les fissures actives (p. ex., les fissures transversales) peu avant le microsurfaçage. Il peut s'ensuivre une mauvaise adhérence

du mélange de microsurfaçage sur le produit de calfeutrage neuf, et le détachement de matériaux.

Le MTO prescrit l'application d'une couche d'accrochage avant le microsurfaçage, afin que le mélange de microsurfaçage adhère bien au revêtement existant. Le MTO a eu recours au microsurfaçage pour allonger à peu de frais la durée de vie du revêtement de nombreux axes routiers importants (Figure 9).



Figure 9 – Pré-traitement d'un faïençage modéré de la ligne médiane.

Le pré-traitement consiste à appliquer du mélange de microsurfaçage à des endroits précis avant de traiter l'ensemble de la surface. Après le microsurfaçage, la route peut être rouverte à la circulation au bout de 45 à 120 minutes, selon le temps de prise de l'émulsion bitumineuse, la météo et les conditions de circulation. Le microsurfaçage doit être effectué seulement au cours des mois de l'année où le temps est chaud et sec. Le froid et l'humidité peuvent allonger le temps de cure au-delà des périodes normalement prévues, et le revêtement risque alors d'être endommagé par le passage des véhicules.

3.5.4 Utilisation et progrès récents

D'après un sondage effectué en 2001-2002 auprès des régies provinciales des transports [13], 60 p. 100 de celles-ci ont eu recours au microsurfaçage sur des revêtements en béton bitumineux et se sont déclarées satisfaites ou très satisfaites des résultats.

3.5.5 Résumé

Le microsurfaçage, tant pour l'entretien préventif que pour la réparation des revêtements, connaît un essor soutenu en Ontario. Une opération de microsurfaçage effectuée selon les règles de l'art cause des dérangements minimales au public voyageur et prolonge à peu de frais la durée de vie du revêtement.

4. RÉFÉRENCES

1. Wikipédia, [http://fr.wikipedia.org/wiki/Autoroute_401_\(Ontario\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Autoroute_401_(Ontario)), 2007
2. Cambridge Systematics, Inc., Peat User Manual – Priority Economic Analysis Tool, Cambridge, Massachusetts, November 2004.
3. Applied Research Associates, Inc, Surface Type For Low Volume Roads, Phase II, Report prepared for the Ministry of Transportation, Ontario, Northeastern Region, Geotechnical Section, December 2006.
4. Taylor, G.W. and Patten, J.D., 2006. Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III. Report prepared for the Cement Association of Canada.

5. Merritt, D., McCullough, F.B., Burns, N.H., 2001. Feasibility of Using Pre-cast Concrete Panels to Expedite Construction of Portland Cement Concrete Pavements. 2001 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
6. De Witt, G.L., 2006. Precast Concrete Paving Panels: The Colorado Department of Transportation Region 4 Experience, 2000 to 2006. Colorado Department of Transportation Research Branch, Denver, Colorado, 2006.
7. Lane, B. and Kazmireowski, T., An Evaluation of Three Methods of Pre-Cast Concrete Slab Repairs For Concrete Pavement, th International Conference on Concrete Pavements, which will be held in Colorado Springs, CO, USA on August 14-18, 2005.
8. Pierce, L.M., Uhlmeier, J., Weston, J., Lovejoy, J., Mahoney, J.P., 2003. Ten-Year Performance of Dowel Bar Retrofit – Application, Performance, and Lessons Learned. 2003 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
9. Harvey, J.T., Bian, Y., 2006. Evaluation of Dowel Bar Retrofit Alternatives using Accelerated Pavement Testing. 2006 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
10. Yu, H.T., Mallela, J., Darter, M.I., 2002. Long-Term Performance of Fast-Track Full-Depth Repairs. 2002 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
11. Bush, N., Van Dam, T.J., Peterson, K., Sutter, L., 2006. Evaluation of High Early Strength PCC Mixtures used in Full Depth Repairs. 2006 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
12. Lee, E.B., Choi, K., 2006. California Experience with Fast-track Construction for Concrete Pavement Rehabilitation on an Urban Highway Network. 2006 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
13. Guide national pour des infrastructures municipales durables, Entretien préventif en temps opportun des routes municipales : guide d'introduction - Meilleures pratiques, 2002, <http://www.collectivitesviables.fcm.ca/fr/Infraguide/>.