

**Performance des techniques de retraitement en place et  
de recyclage à froid au Québec**

Présenté par : Guy Bergeron, ing. M. Sc.  
Ministère des Transports du Québec  
Service des chaussées

**Séance : Analyse du cycle de vie à très long terme des chaussées –  
Détermination de la valeur réelle des investissements**

**Congrès annuel de 2005 de  
l'Association des transports du Canada  
à Calgary (Alberta)**

## Résumé

L'utilisation des techniques de retraitement en place des chaussées (*full depth reclamation*) et le recyclage à froid des enrobés (*cold in place recycling*) constituent une pratique courante au ministère des Transports du Québec (MTQ) depuis le début des années 90. En 15 ans, près de 1500 km de chaussée ont fait l'objet de travaux nécessitant l'utilisation de ces techniques sur le réseau routier sous la responsabilité du MTQ.

Le suivi du comportement de plus de 90 projets réalisés au cours des 12 dernières années et totalisant environ 425 km a été considéré aux fins de l'étude. La performance des chaussées a été évaluée selon l'évolution annuelle de la qualité de roulement (IRI) et de la profondeur des ornières.

L'évolution de ces deux indicateurs de performance a été établie pour chaque projet et un regroupement a été effectué selon la classe fonctionnelle de la route et les sollicitations par le trafic, permettant ainsi la détermination de la durée de vie des interventions. Ces résultats ont servi à la réalisation d'une analyse coût-avantage sur la base des coûts unitaires moyens de ces interventions et des coûts liés aux travaux d'entretien. Les rapports coût-avantage des interventions ont été comparés à ceux de divers projets ayant fait l'objet uniquement d'un recouvrement en enrobé bitumineux (*hot mix asphalt overlay*), méthode qui constitue la pratique d'entretien la plus répandue au MTQ.

## Remerciements

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce à la contribution de Diane Leroux, Gilles Brillant, Steeve Gagnon et Mario Royer, tous du Service des chaussées du MTQ.

## Introduction

L'utilisation des techniques de « recyclage » telles que le retraitement en place des chaussées (RP) (*full depth reclamation*) avec et sans stabilisation et le recyclage à froid des enrobés (RFE) (*cold in place recycling*) constitue une pratique courante au ministère des Transports du Québec (MTQ) depuis le début des années 90. En 15 ans, environ 1500 km de chaussée ont fait l'objet de travaux nécessitant l'utilisation de ces techniques sur le réseau routier sous la responsabilité du MTQ.

Des projets pilotes et des recherches en laboratoire ont permis de caractériser et de classer les matériaux recyclés et de déterminer les cas plus favorables à l'utilisation de ces techniques. Ces travaux ont contribué à l'élaboration d'un guide technique (1) et de deux devis (2, 3) visant à encadrer l'usage de ces méthodes. Une première synthèse issue du programme de suivi de performance (4), présentée en 2000 (5), a mis en évidence le fort potentiel d'utilisation de la technique de RP. Des comportements similaires à ceux observés sur des chaussées reconstruites ou nouvellement construites selon une approche traditionnelle ont été notés lorsque les travaux étaient réalisés de façon adéquate et qu'une conception adaptée au contexte était complétée au préalable.

Les principaux critères de sélection et les domaines d'emploi de ces techniques ont été établis sur la base des types de dégradation affectant le comportement d'une chaussée (1). Les chaussées affichant des dégradations liées au comportement de leur partie supérieure et peu actives sous les effets du gel constituent les cas favorables à l'utilisation du RP et du RFE. Les chaussées déficientes affichant un taux de fissuration élevé, généralement supérieur à 0,45 m/m<sup>2</sup>, de sévérité faible à élevée, lié à la fatigue du revêtement et au retrait thermique des enrobés constituent également des cas favorables. Des observations, issues de suivis couvrant une période de 10 ans (5), indiquent que le RP s'avère une solution « définitive » en présence de carrelage, de fissures transversales, de flaches, de nids-de-poule et de pelade.

Malgré la mise au point de critères permettant d'utiliser le RP et le RFE aux bons endroits sur le réseau, on note jusqu'à présent que l'utilisation des techniques dites de recyclage est plutôt sporadique et étroitement liée à la disponibilité des budgets, à la connaissance de ces techniques et, dans une moindre mesure, à la perception des gestionnaires quant à la faisabilité des travaux. On comprend que l'intégration de ces méthodes aux stratégies d'intervention à l'échelle réseau requiert une évaluation juste de l'évolution de la performance de ces interventions dans diverses situations et une estimation des coûts pour en optimiser l'usage dans un contexte budgétaire limité.

L'ensemble des données recueillies dans le cadre du programme de suivi de performance couplées aux données relevées à l'échelle réseau (6) constitue une base de données fiable permettant d'élaborer une première approche; celle-ci servira à évaluer la performance des interventions dites de recyclage. En couplant les résultats de cette approche à une analyse des coûts globaux LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*), le rendement de divers scénarios d'entretien nécessitant l'utilisation du RP et du RFE peut être établi sur la base d'une analyse coût-

avantage; on dispose ainsi des paramètres plus représentatifs pouvant être intégrés au système de gestion des chaussées du MTQ (7).

## **Techniques de recyclage**

Dans la présente étude, les techniques de réfection dites de recyclage incluent le retraitement en place des chaussées (RP) avec et sans stabilisation ainsi que le recyclage à froid des enrobés (RFE). Depuis 1991, le MTQ effectue annuellement, en moyenne, 80 km de RP (1 km = 7000m<sup>2</sup>), dont environ 17 % des projets incluent la stabilisation des matériaux recyclés à l'aide d'un liant hydrocarboné (émulsion ou bitume moussé) ou d'un liant mixte (ajout de <1,5 % de ciment ou de chaux hydratée). Le premier contrat de RFE remonte à 1992. Au total plus de 400 km de chaussée, majoritairement sur des routes nationales et régionales, ont été retraités à l'aide de cette technique.

### *Recyclage à froid des enrobés (RFE)*

Le recyclage s'effectue généralement en place. Une partie du revêtement bitumineux (figure 1a) est alors enlevée par planage à froid sur une profondeur comprise entre 90 mm et 100 mm. Le résidu bitumineux est ensuite tamisé ( $D_{\max} = 28\text{mm}$ ) avant l'ajout d'un liant hydrocarboné, généralement une émulsion de bitume (1,0 % de bitume ajouté). Ces étapes, de même que le malaxage et la pose, sont effectuées en une seule opération et en continu. L'enrobé ainsi fabriqué est recouvert par un enrobé à chaud conventionnel après une période de cure variant de une à deux semaines. Les caractéristiques de la couche de roulement (mélange et épaisseur) sont déterminées au préalable lors du dimensionnement structural.

Les performances observées sur des sections d'essai dans le contexte québécois indiquent clairement que cette approche permet de ralentir le phénomène de remontée des fissures et ainsi de prolonger la durée de vie de l'intervention de 2 à 5 ans par rapport à un simple recouvrement (8). On note également que les caractéristiques du site (taux de fissuration, trafic) et les conditions de mise en œuvre sont des facteurs déterminants pour expliquer la performance de l'intervention.

### *Retraitement en place (RP)*

Cette technique consiste à fragmenter le revêtement bitumineux sur toute son épaisseur en y incorporant une partie de la fondation granulaire sous-jacente (figure 1b). Une fois homogénéisé sur une profondeur généralement de 300 mm, le matériau est nivelé et densifié pour former une nouvelle fondation. Avant d'être recouvert, le matériau « décohesionné » peut être stabilisé à froid sur une épaisseur de 100 à 150 mm à l'aide d'un liant hydrocarboné (émulsion, bitume moussé) ou d'un liant mixte avec ajout d'un liant hydraulique.

Avec l'utilisation de cette méthode, les fissures présentes dans la partie supérieure de la chaussée sont complètement éliminées lors du « décohesionnement », ce qui explique en bonne partie les performances observées sur plusieurs sites (5). Cette particularité revêt une importance majeure dans un contexte nordique où le phénomène de remontée des fissures,

couramment observé après un simple recouvrement bitumineux (RB), joue un rôle prépondérant dans l'évolution de la performance des interventions d'entretien; par conséquent, elle conditionne leur durée de vie.



**Figure 1-a : Recyclage à froid des enrobés (RFE)**



**Figure 1b : Retraitement en place (RP)**

## **Méthodologie**

La méthode du ratio avantages-coûts (RAC), couramment employée en matière de chaussées (9), permet d'intégrer l'ensemble des données caractérisant la performance des chaussées et les coûts de plusieurs interventions prévues dans des scénarios d'entretien et de les comparer entre eux selon leur efficacité ou leur rendement. En d'autres termes, le RAC exprime le gain de performance d'un scénario d'entretien par rapport à un scénario de référence en considérant les investissements supplémentaires nécessaires pour atteindre ce niveau de service.

Pour chaque classe de route et chaque intervention (RP, RFE et RB), la performance a été évaluée à l'aide de l'indice IRI décrivant l'évolution du confort au roulement mesurée sur l'ensemble des sections. Pour chaque cas, la performance a été définie par l'aire sous la courbe ( $P_i$ ), telle qu'elle est illustrée à la figure 2.

La durée de vie des interventions est définie par le nombre d'années avant que la qualité moyenne du roulement (IRI) d'un segment de chaussée, en l'occurrence sur un « contrat » dans le contexte de la présente étude, n'ait atteint les seuils de déficience mineure utilisés par le MTQ, lesquels sont modulés selon la classification de la route (tableau 1). Lorsqu'une chaussée a atteint le seuil de déficience majeure, le taux de fissuration est élevé et une intervention comme le RP ou le RFE est souhaitable et recommandée. Sur la base des informations disponibles au système de gestion des chaussées du MTQ, on estime que parmi les chaussées faisant l'objet d'une intervention, environ 25 % ont atteint le seuil de déficience majeure. Il est important de préciser que l'application d'une stratégie d'intervention à l'échelle réseau peut justifier la réalisation d'un RB sur une chaussée en particulier, même si elle est très dégradée, (déficience majeure) notamment dans le but de retarder des investissements plus importants liés à des travaux majeurs de reconstruction et d'optimiser les budgets disponibles.

Classe de route	Seuil de déficience (IRI) (m/km)	
	Mineure	Majeure
Autoroute	2,2	3,5
Nationale	2,5	4,0
Régionale et collectrice	3,0	5,0

Tableau 1 : Seuil de déficience des chaussées MTQ

L'aspect des coûts a été traité en deux volets, soit les coûts directs payés par le MTQ et les coûts des délais imposés aux usagers pendant les travaux (CDU).

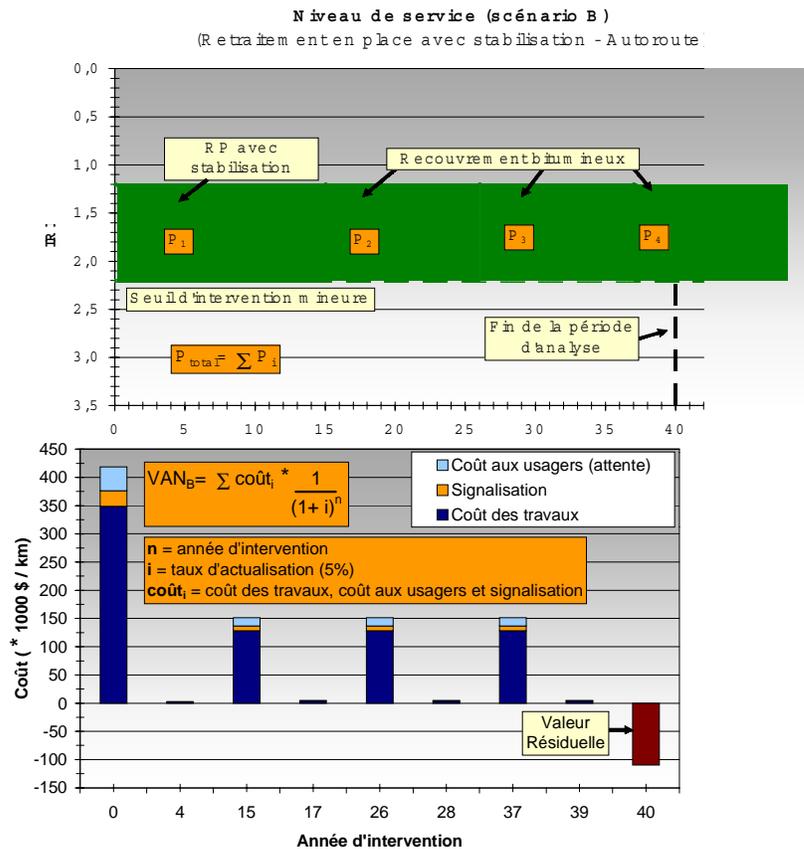


Figure 2 : Scénario d'entretien (B) : niveau de service et valeur actualisée nette (VAN)

Les coûts directs sont ceux liés à la réalisation des travaux, incluant ceux de la signalisation sur le chantier. Les coûts de chaque intervention d'entretien ont été comptabilisés en considérant l'année à laquelle l'intervention est prévue pour chaque scénario d'entretien afin de déterminer la valeur actualisée nette (VAN) sur une période d'analyse de 40 ans. L'approche suivie considère la valeur résiduelle, définie comme étant la proportion non « consommée » de la dernière intervention à la fin du cycle d'analyse. Un exemple d'un scénario d'entretien (scénario B) est présenté à la figure 2.

L'évaluation des CDU s'est limitée à une estimation des coûts liés aux délais occasionnés par la réalisation des travaux selon l'approche de Winfrey (10). Pour compléter cette évaluation, trois projets types ont été considérés selon la classe de la route. Les caractéristiques de ces sites (trafic, véhicules lourds, géométrie des voies, etc.) reflètent les conditions observées sur les sites des projets considérés dans le contexte de l'étude et qui ont fait l'objet de travaux de RP et de RFE (tableau 2).

	Autoroute	Nationale	Régionale
DJMA	20000	12000	5000
% véhicules lourds	16	14	11
% camions 1 unité	30	50	55
% camions (semi-remorques)	70	50	45
Largeur des voies (m)	7,4	7,0	6,0 à 6,6
<b>Coût des travaux (\$/km)</b>			
RP sans stabilisation	-	300 000	190 000
RP avec stabilisation	440 000	315 000	192 000
RFE	300 000	211 000	117 000
RB	120 000	100 000	81 000
Scellement de fissures (\$/km)	2500 à 4000		
Coût délais aux usagers (CDU) (\$/j/km)	7 116	6 874	2 709

*Tableau 2 : Caractéristiques des chaussées et coûts des travaux*

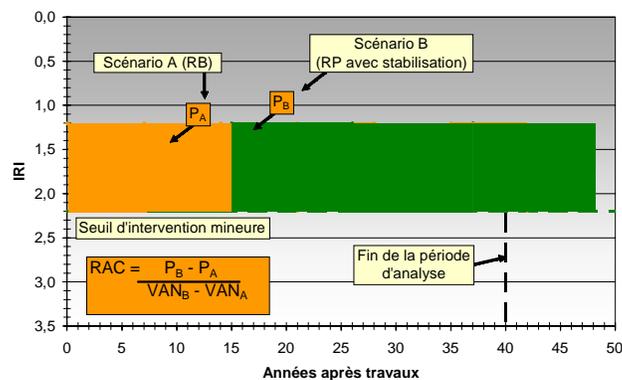
Le recouvrement bitumineux (RB), avec correction du profil par la pose d'une couche de correction ou par planage, constitue l'approche d'entretien la plus courante au MTQ; elle représente environ 70 % des chaussées qui font l'objet de travaux. Dans le contexte québécois, on observe que la durée de vie de ces interventions (RB) est étroitement liée à l'état de la chaussée avant les travaux et au phénomène de remontée des fissures qui se produit rapidement. Typiquement, on observe que toutes les fissures présentes dans l'ancien revêtement remontent à la surface trois ans après la mise en service (11). Les sollicitations par le trafic et les caractéristiques de l'enrobé ont un impact significatif sur l'évolution des dégradations et, par conséquent, sur l'uni de la chaussée. Dans le contexte de cette étude, l'application successive de RB après chaque cycle d'entretien constitue le scénario de référence aux fins de comparaison.

Les scénarios d'entretien de même que les coûts retenus aux fins de cette étude reflètent les pratiques d'entretien couramment appliquées au MTQ concernant de tels travaux. À titre d'exemple, les travaux de scellement de fissures sont effectués en moyenne 2 ans après les travaux de RB, à un taux de 2000 m de fissures/km. Après un RP ou un RFE, les mêmes travaux sont effectués à la quatrième année de mise en service, selon un taux de 1250 m de fissures/km. L'ensemble des interventions pour chaque scénario est résumé au tableau 3. L'ordonnancement des interventions est dicté par la durée de vie des interventions évaluée pour chaque classe de chaussée.

Scénario	Interventions
A (référence)	RB+RB+RB+RB+RB+RB
B	RP STAB+RB+RB+RB
C	RFE+RB+RB
D	RP+RB+RB
E	RP+RFE+RB

**Tableau 3 : Scénarios d'entretien**

La détermination du ratio avantages-coûts (RAC) pour chaque scénario comporte, dans un premier temps, l'évaluation de la performance totale ( $P_{total}$ ) du scénario définie comme étant la somme des performances ( $P_i$ ) associées à chaque intervention d'entretien. Par la suite, la comparaison avec le scénario de référence (A) s'effectue comme elle est illustrée à la figure 3.



$P_i$  : performance totale du scénario i  
 $P_a$  : performance totale du scénario A (référence)  
 $VAN_i$  : valeur actualisée nette du scénario i  
 $VAN_a$  : valeur actualisée nette du scénario A (référence)

**Figure 3 : Ratio avantages-coûts (RAC)**

## Évaluation de la performance

Le programme de suivi de performance des chaussées du MTQ (14), entrepris au début des années 90 (4), se subdivise en trois niveaux qui réfèrent à des objectifs différents et à des activités de collecte de données et d'analyse spécifiques. Le suivi de niveau 1 vise l'évaluation de techniques ou produits et commande la réalisation de nombreuses mesures et essais sur des sections témoins. À titre d'exemple, le suivi de niveau 1 s'apparente à celui effectué dans le contexte des programmes SHRP (LTPP) et C-SHRP. Les suivis de niveau 2 concernent l'évaluation d'interventions d'entretien à l'échelle projet, alors que ceux de niveau 3 portent plutôt sur le bilan fonctionnel d'un ensemble d'interventions ou d'une stratégie d'entretien à l'échelle réseau.

Dans le contexte de la présente étude, les résultats issus de projets représentatifs (niveau 2), dont plusieurs comportent des sections témoins (niveau 1), ont été considérés. Pour les sections assujetties à un suivi de niveau 1, l'évolution de la performance prévoit la mesure des

dégradations de surface, de l'adhérence, des ornières et de l'indice de confort au roulement. Dans cette étude, seules les données relatives au confort de roulement (IRI) et à l'orniérage mesurées sur 199 projets réalisés entre 1992 et 2000 (tableau 4) ont été considérées pour l'évaluation de la performance. Ces projets totalisant près de 450 km de chaussée sont répartis dans trois régions du Québec où une plus grande proportion de travaux de recyclage est réalisée et ils sont regroupés selon les trois classes fonctionnelles des chaussées : autoroute, nationale, régionale et collectrice. La longueur des sites sous étude varie de 0,8 km à 14,3 km, la moyenne étant de 4,6 km.

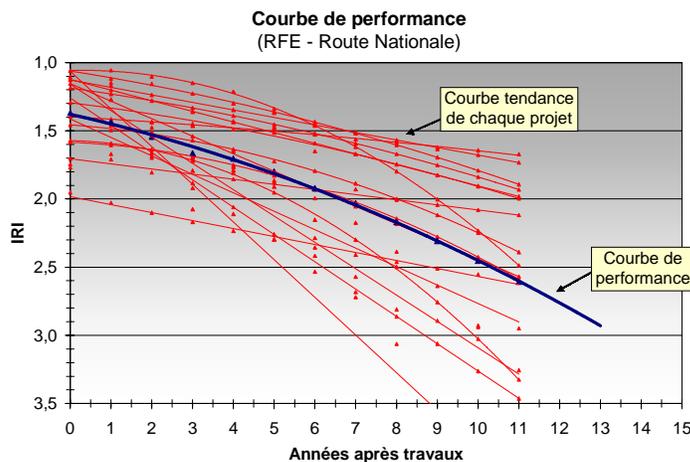
	Autoroute	Nationale	Régionale et collectrice
RP AVEC stabilisation	5 sites (39 km)	7 sites (22 km)	16 sites (72 km)
RP SANS stabilisation	- -	14 sites (68 km)	12 sites (51 km)
RFE	5 sites (28,6 km)	17 sites (97,9 km)	10 sites (44,4 km)
Recouvrement bitumineux (RB)	25 sites (102,4 km)	38 sites (128,2 km)	28 sites (107 km)
Recouvrement bitumineux (RB) en défiance majeure avant travaux	6 sites (20,9 km)	4 sites (20 km)	8 sites (47,8 km)

**Tableau 4 : Sites d'essai pour les trois classes de route**

Les relevés d'uni ont été effectués en condition estivale à l'aide du véhicule multifonction du MTQ (6) muni d'un profilomètre inertiel (GMR) de niveau 1 répondant aux spécifications de la norme ASTM E-950. L'indice IRI moyen est calculé pour chaque segment de 100 m.

### Évolution de l'indice IRI

Pour établir les courbes de performance « IRI vs année » pour chacune des techniques, l'évolution de l'indice IRI de tous les projets a été considérée pour chaque classe de route. Pour un contrat ou un site donné, les valeurs moyennes annuelles caractérisant le confort au roulement ont été intégrées afin d'établir une courbe de tendance par une approche de régression polynomiale. Cette approche a permis de déterminer les valeurs moyennes de l'indice IRI pour l'ensemble des sites sous étude et pour différentes années après la réalisation des travaux (figure 4).



**Figure 4 : Courbe de performance, exemple : RFE, route nationale**

Les courbes de performance ainsi établies sont présentées à la figure 5 et les durées de vie respectives retenues aux fins d'analyse de chacune des interventions selon la classe de route sont résumées au tableau 5.

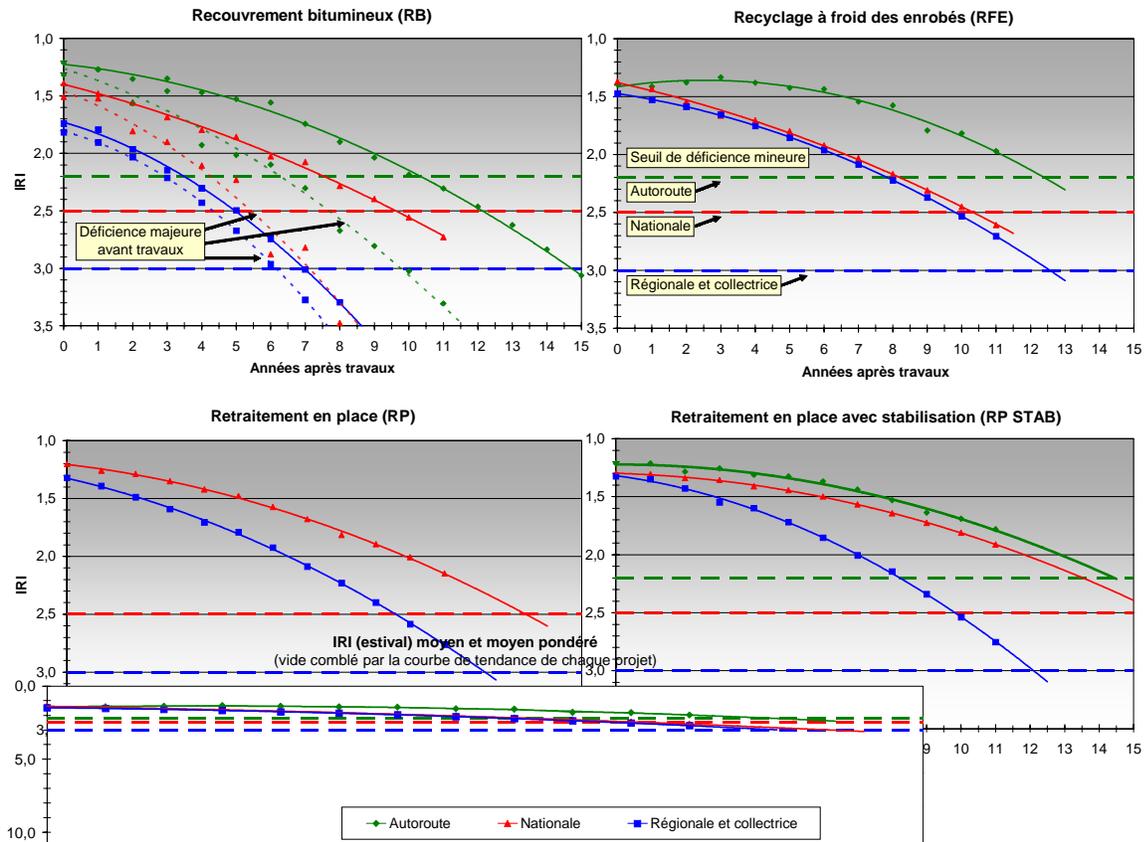


Figure 5 : Courbes de performance

	Durée de vie (années)					
	Seuil déficience MINEURE			Seuil déficience MAJEURE		
	A	N	R	A	N	R
RP STABILISATION	15	15	12	20		
RP SANS stabilisation	-	12		-	20	
RFE	12	11	11	18		
RB	11	9	8	17	15	14
RB (déficience majeure avant travaux)	7			11		

Note : A : Autoroute, N : Nationale, R : Régionale et collectivité

Tableau 5 : Durée de vie des interventions (années)

Une distinction a été apportée concernant l'évolution de la performance des RB selon l'état de la chaussée avant travaux. Lorsque la chaussée affiche une déficience majeure et est généralement très fissurée, la réalisation d'un RB se traduit par une évolution rapide des

dégradations ayant un impact sur l'IRI. Dans un tel contexte, on observe une diminution de la durée de vie de 1 à 6 ans en moyenne.

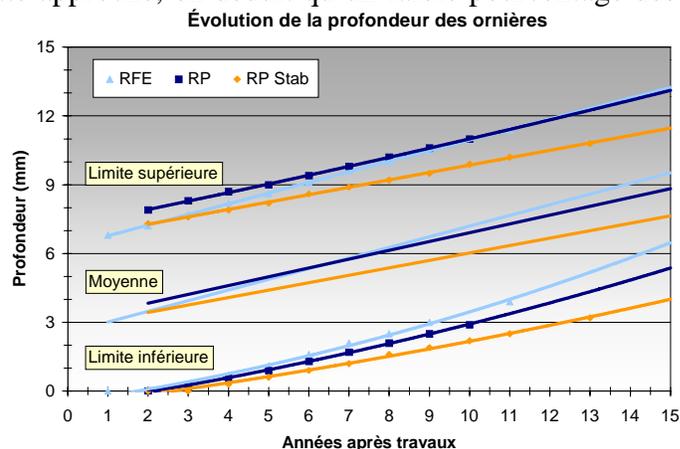
## Évolution de l'orniérage

La mesure de la profondeur des ornières fait partie des relevés obligatoires dans le contexte des suivis de performance des niveaux 1 et 2. La mesure de cet indicateur de même que son évolution revêt un intérêt marqué lorsqu'il s'agit d'apprécier le comportement de la chaussée, mais aussi pour évaluer l'aspect de la sécurité lié au fait que le risque d'aquaplanage augmente avec la profondeur des ornières.

Les matériaux élaborés à l'aide des techniques de recyclage se trouvent au niveau de la fondation dans le cas d'un RP ou de la couche de base du revêtement dans le cas du RFE. Dans les deux cas, ces matériaux sont situés directement sous la couche de roulement et sont soumis aux efforts répétés transmis lors du passage des véhicules; par conséquent, ils sont susceptibles de contribuer à l'apparition d'ornières en surface. Cet aspect du comportement des chaussées est traité à l'étape de la conception en s'assurant que les contraintes transmises dans les matériaux recyclés seront compatibles avec leurs propriétés mécaniques afin de prévenir l'apparition et une évolution rapide des ornières.

Sur l'ensemble des sites (tableau 4), seules les valeurs mesurées à partir de 2000 à l'aide du véhicule multifonction ont été retenues aux fins de l'analyse.

La figure 6 résume l'ensemble des résultats pour les techniques de recyclage. On note en premier lieu que le taux de progression de la profondeur des ornières est plutôt faible et varie de 0,30 mm/an et 0,47 mm/an, et qu'il est similaire pour les techniques de RP, RP Stab et RFE. Les limites supérieure et inférieure du fuseau (figure 6), qui incluent 80 % des résultats observés (niveau de confiance), permettent d'apprécier que la dispersion du comportement des chaussées en ce qui a trait à l'évolution de l'orniérage est semblable pour les trois techniques. Sur la base de cette approche, on déduit qu'un faible pourcentage des chaussées, de l'ordre de 10 %, affiche



**Figure 6 : Évolution des ornières**

un taux moyen d'orniérage supérieur à 1,1 mm/an sur une période de 10 ans. Également, on constate (*figure 6*) qu'un orniérage de faible profondeur (2 à 3 mm) est présent dès la mise en service, c'est-à-dire à l'année 0. En fait, ces résultats traduisent plutôt l'amorce rapide d'un orniérage de faible sévérité peu de temps après les travaux, ce qui est possiblement attribuable à un phénomène de postcompactage des matériaux traités. On note que ce phénomène tend à se stabiliser après la première année; par la suite, l'orniérage augmente selon un taux (mm/an) similaire, voire inférieur à ceux observés sur des chaussées ayant fait l'objet d'une intervention dite conventionnelle. Hormis cette particularité qui met en évidence que certaines améliorations pourraient être apportées aux méthodes de mise en œuvre (compactage), l'ensemble des résultats indique que l'utilisation des techniques de recyclage ne représente pas de risque supplémentaire en regard de la problématique de l'orniérage lorsqu'un dimensionnement structural adéquat a été effectué au préalable.

### Analyse coût-avantage

L'ensemble des données indique clairement que les travaux de recyclage ont une durée de vie supérieure à celle d'un recouvrement bitumineux conventionnel (RB) sur la base de l'évolution de l'indice IRI (tableau 6). Intégré à un scénario d'entretien, l'usage des techniques de recyclage se traduit par une amélioration du niveau de service à long terme. Sur la période d'analyse, fixée à 40 ans, les scénarios d'entretien comportant au moins une intervention de recyclage affichent une performance totale (Pt) plus élevée par rapport au scénario de référence A (tableau 6). Sur les autoroutes et routes nationales, les scénarios B et E comportant le RP avec stabilisation et le RFE résultent en des gains de performance importants atteignant 47,9 %, tandis que sur les routes régionales les gains en matière de performance sont moins significatifs, sauf pour le scénario B où on note un gain de performance de 26,3 %.

Scénario	Gain de performance : $100 * (P_{ti} - P_a) / P_a$ (%)		
	Autoroute	Nationale	Régionale
B (RP STAB)	38,8	47,9	26,3
C (RFE)	24,5	34,6	9,9
D (RP)	-	38,4	10,4
E (RP + RFE)	42,5	44,7	15,9

**Tableau 6 : Gains de performance (%) par rapport au scénario A (référence)**

Ces premiers résultats mettent en évidence le fait que l'élimination du patron de fissuration lors de travaux de RP a des effets bénéfiques sur le comportement de la chaussée, ce qui se traduit par le maintien d'un niveau de service plus élevé par rapport à un scénario comportant uniquement des RB successifs.

Autre constat tiré de l'ensemble des observations : on note que les durées de vie des interventions concordent avec celles escomptées par la méthode de dimensionnement du MTQ basée sur une adaptation de l'AASHTO 1993 (12). La pratique courante de dimensionnement prévoit des durées de vie de 15 à 20 ans selon la classe de route lorsque l'on effectue le RFE ou le RP d'une chaussée. L'indice de confort au roulement atteint à la fin de la vie utile,

correspondant aux seuils de déficience majeure (tableau 1), s'apparente au niveau de serviabilité ( $PSI_{finale}$ ) prévu (13). Ce constat indique que l'ensemble des intrants – modules de déformation, ECAS, etc.– recommandés aux fins de conception (12) permet d'anticiper un niveau de service représentatif de ceux observés sur les diverses sections considérées dans cette étude.

Le rendement des scénarios d'entretien selon l'approche du RAC est résumé au tableau 7.

En premier lieu, on note que tous les scénarios comportant une technique de recyclage affichent un RAC supérieur à 1, ce qui indique un meilleur rendement par rapport au scénario de référence (A). Pour les autoroutes, on note des valeurs de RAC similaires pour les trois scénarios B, C et E, ce qui traduit le fait que les coûts supplémentaires rattachés à la réalisation de ces travaux augmentent le niveau de service aux usagers dans des proportions similaires. Concernant les routes nationales, on note une tendance plus claire selon laquelle le scénario C (RFE) affiche un meilleur rendement malgré le fait que les scénarios B et E assurent un gain de performance très important, de l'ordre de 45 % par rapport au scénario de référence (A). Lorsque la différence des coûts ( $\Delta VAN$ ) entre un scénario et le scénario de référence (A) est faible, inférieure à 4 %, la valeur du RAC tend à augmenter de façon importante. Ce cas de figure constitue une limite de cette approche et, dans un tel cas, la valeur du RAC doit être interprétée avec discernement. C'est le cas pour le scénario C où l'on observe une faible différence de coût qui se traduit par un RAC très élevé (>20). En fait, le scénario C représente un gain de performance appréciable (10 %), notamment sur les routes régionales, alors que la VAN, évaluée pour une période de 40 ans, ne diffère pas de façon significative par rapport au scénario de référence (A).

Scénario	Coût supplémentaire ( $\Delta VAN$ %) = $100 * (VAN_i - VAN_a) / VAN_a$ et rapport coût-avantage (RAC)					
	Autoroute		Nationale		Régionale	
	$\Delta VAN$ %	RAC	$\Delta VAN$ %	RAC	$\Delta VAN$ %	RAC
B (RP STAB)	45	4	33	7	23	11
C (RFE)	13	8	12	14	<4	>20
D (RP)	-		26	7	18	5
E (RP + RFE)	34	5	41	5	18	8

**Tableau 7 : Pourcentage supplémentaire de la  $\Delta VAN$  par rapport au scénario A (référence) et rapport coût-avantage (RAC) des scénarios d'entretien par rapport au scénario A (référence)**

Il est important de rappeler que les coûts des travaux sont fonction d'une foule de facteurs liés à la conception de la chaussée, au contexte géographique (site des travaux) et à des particularités économiques tributaires du fonctionnement (marchés) des industries concernées (prix du bitume, concurrence). Dans le contexte de la présente étude, les coûts utilisés reflètent ceux couramment observés dans la pratique pour chaque classe de route. Il est clair qu'une analyse plus fine permettant d'intégrer les coûts de divers types de scénarios d'entretien pour plusieurs gammes de trafic, en y associant leurs courbes de performance respectives, permettrait de préciser les constats de cette étude.

Pour tous les scénarios d'entretien (tableau 3), les impacts économiques liés aux délais imposés aux usagers (CDU) sur les chaussées types considérées (tableau 2) représentent environ de 10 % à 13 % de la VAN pour les autoroutes et routes nationales; ils sont de l'ordre de 7 % pour les routes régionales. On note, par contre, pour une classe de route donnée, que les CDU sont similaires d'un scénario à un autre sur une longue période d'analyse. Cependant, lorsque l'on considère les impacts des divers travaux d'entretien rattachés à chaque scénario selon le nombre de jours où il y aura entrave à la circulation, les différences estimées entre chaque scénario peuvent s'avérer significatives selon le contexte. À titre d'exemple, le scénario de référence (A), qui implique la réalisation plus fréquente de travaux de courte durée, résultera en une entrave de 16j/km sur une période de 40 ans. Pour les autres scénarios, on estime le temps d'entrave entre 12 j/km à 14 j/km, ce qui représente une réduction des impacts tant pour les usagers et riverains que pour d'autres secteurs d'activité affectés par la réalisation des travaux, par exemple la perte d'activité économique des commerces adjacents au chantier.

Autre point à considérer : la présente analyse, basée uniquement sur l'évolution de l'indice de confort au roulement (IRI) estival, ne permet pas d'apprécier de façon représentative les effets de la fissuration sur le comportement de la chaussée durant toute une année. Ainsi, la remontée rapide des fissures consécutive à un RB augmente les risques d'infiltration; en présence de cycles de gel et dégel, cela favorise le soulèvement des fissures, ce qui a des impacts significatifs sur le niveau de service de la chaussée en période hivernale. La propension à l'apparition d'un tel phénomène après un RP est beaucoup plus faible considérant le fait que ce type d'intervention se traduit par le maintien d'un faible taux de fissuration.

L'approche empirique suivie dans le contexte de la présente étude pour caractériser la performance des chaussées recyclées permet tout au plus d'apprécier de façon générale le rendement de ces techniques, sans pouvoir préciser ou expliquer les causes de la dispersion des données observées. Il est clair qu'une plus grande attention apportée à l'application des critères de sélection de ces techniques, à la préparation des projets, au dimensionnement structural (trafic) et à la réalisation des travaux permettrait d'améliorer la performance de ces interventions. Cependant, la démarche suivie ne permet pas de quantifier dans quelle mesure l'attention apportée à ces activités de préparation contribuerait à améliorer la performance. Néanmoins, l'ensemble des résultats, qui reflète l'état de la pratique en cette matière, dénote que l'utilisation de techniques de recyclage sur des chaussées dégradées (défiance majeure) s'avère une approche à la fois performante et rentable dans une optique à long terme.

## **Conclusion**

Plusieurs sections de chaussée, totalisant plus de 400 km, ont fait l'objet de travaux de retraitement en place (RP) avec ou sans stabilisation et de recyclage à froid des enrobés (RFE) au cours des 12 dernières années et plus. Ces travaux ont été évalués selon l'évolution du confort au roulement (IRI) et de l'orniérage. Les résultats ont permis de quantifier la performance et de compléter l'analyse coût-avantage de quatre scénarios d'entretien impliquant la réalisation de RP et de RFE en comparaison avec une approche d'entretien conventionnelle utilisant uniquement des recouvrements bitumineux (RB).

L'ensemble des résultats indique que, sur une période d'analyse de 40 ans, l'application de tous les scénarios impliquant l'utilisation d'une technique de recyclage se traduit par un gain de performance variant de 10 % à 48 % par rapport au scénario de référence (RB). Également, en dépit du fait que les scénarios incluant des travaux de recyclage soient plus coûteux sur la base de leur valeur actualisée nette (VAN), tous ces scénarios affichent un meilleur rendement (rapport coût-avantage).

L'intégration des principaux résultats de cette étude au système de gestion des chaussées du MTQ, notamment par le raffinement des courbes de performance utilisées pour évaluer le comportement des chaussées recyclées, est actuellement en cours. Ainsi, l'usage de ces techniques pourra être considéré sur une base plus courante dans un contexte d'optimisation des interventions à l'échelle réseau.

Cette étude constitue la première phase d'une analyse plus détaillée qui devrait prévoir l'usage de ces techniques dans divers contextes afin de préciser davantage leur rentabilité et ainsi de statuer sur leur utilisation.

## Références

1. BERGERON, G. *Retraitement en place des chaussées*, Guides et manuels techniques, Direction du laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec, 1996.
2. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. *Devis type; Retraitement en place de la chaussée avec un liant hydrocarboné*, [En ligne], [<http://www.intranet-dsei/>].
3. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. *Devis type; Recyclage à froid du revêtement de chaussée en enrobé*, [En ligne], 2003. [<http://www.intranet-dsei/>].
4. DIRECTION DU LABORATOIRE DES CHAUSSÉES (DLC). « Suivi de performance », *Bulletin technique*, vol. 3, n° 5, mai 1998.
5. BERGERON, G. « Retraitement en place à Transports Québec : résultats des suivis de performance de 1991 à 1999 », compte rendu du Colloque AQTR-AIMQ, Saint-Hyacinthe, 11 mai 2000, 18 pages.
6. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. « Véhicule multifonction », *Bulletin technique*, Direction du laboratoire des chaussées (DLC), vol. 9, n° 11, 2003.
7. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. « Système de gestion des chaussées », *Bulletin technique*, Direction du laboratoire des chaussées (DLC), vol. 8, n° 5, mai 2003.
8. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. « Recyclage à froid des enrobés », *Bulletin technique*, Direction du laboratoire des chaussées (DLC), vol. 6, n° 4, avril 2001.
9. HAAS, R., R.W. Hudson *et al.* *Modern pavement management*, Ed Krieger, ISBN 0-89464-588-9, 1994.
10. *NCHRP Report 1-33*. « Procedures for estimating highway user costs, air pollution and noise effects ». Voir WINFREY, R. *Economic Analysis for Highways*, International textbook Co., Scranton, PA, 1969.
11. « Réparation des fissures avant recouvrement bitumineux », vol. 6, n° 11, novembre 2001.
12. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. « Logiciel de dimensionnement des chaussées souples », *Bulletin technique*, Direction du laboratoire des chaussées (DLC), vol. 6, n° 1, janvier 2001.
13. GULEN, S. *et al.* « Correlation of present serviceability ratings with international roughness index », *Transportation Research Board*, n° 1435, 1994.
14. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. « Suivi de performance des chaussées », *Bulletin technique*, Direction du laboratoire des chaussées (DLC), vol. 3, n° 5, mai 1998.