

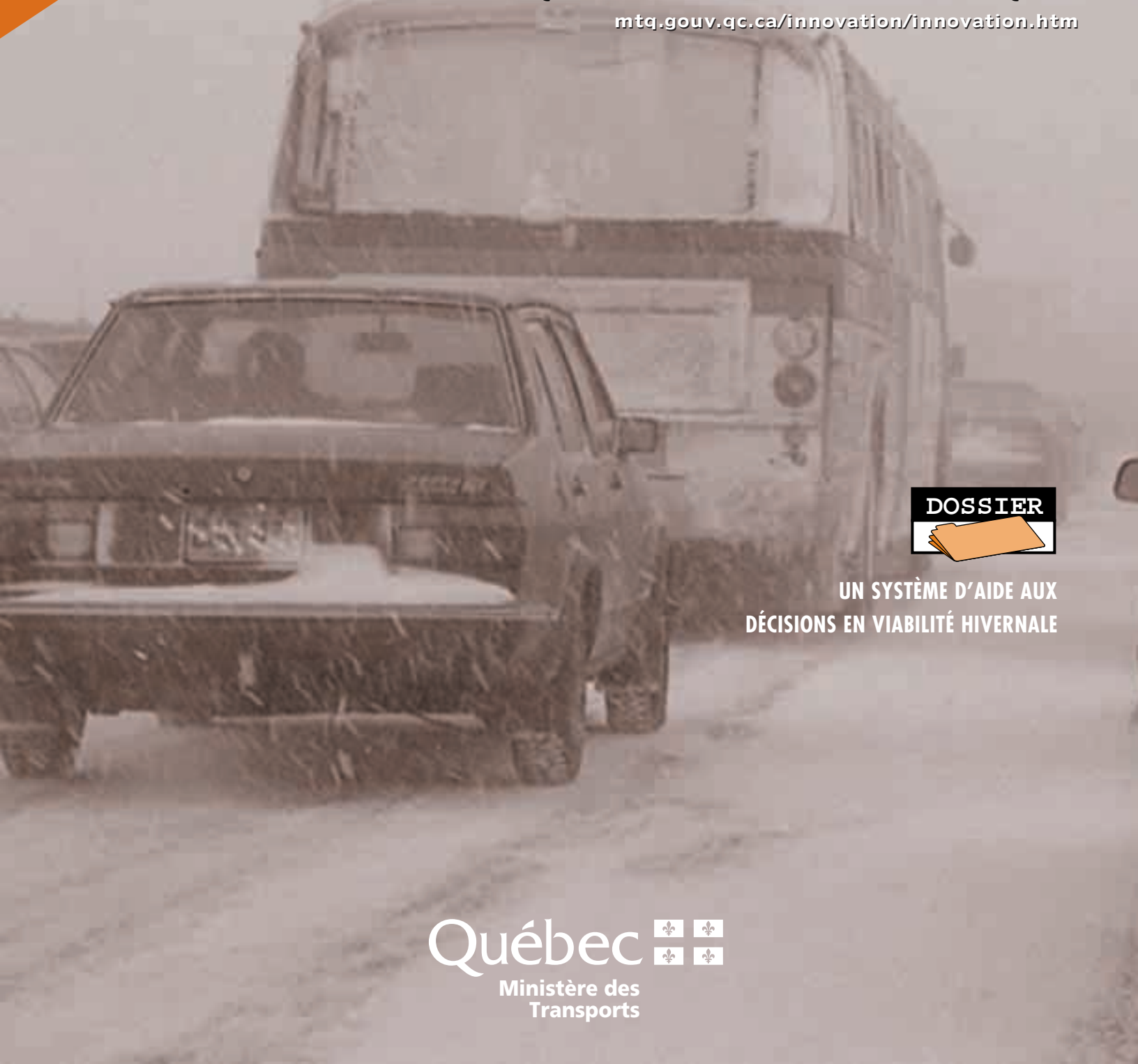
INNOVATION

NUMÉRO 9 OCTOBRE 2000

TRANSPORT

BULLETIN SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

mtq.gouv.qc.ca/innovation/innovation.htm



DOSSIER

UN SYSTÈME D'AIDE AUX
DÉCISIONS EN VIABILITÉ HIVERNALE

PROJET DE RECHERCHE LE RENFORCEMENT DU PONT DE SAINTE-ÉMÉLIE-DE-L'ÉNERGIE AVEC DES MATÉRIAUX COMPOSITES	3
DOSSIER UN SYSTÈME D'AIDE AUX DÉCISIONS EN VIABILITÉ HIVERNALE	5
SÉCURITÉ DE L'INFORMATION LES RISQUES INFORMATIQUES	12
ROUTES ET STRUCTURES RETRAITEMENT EN PLACE À TRANSPORTS QUÉBEC : RÉSULTATS DES SUIVIS DE PERFORMANCE DE 1991 À 2000	15
PARUTIONS RÉCENTES	26
CONGRÈS ET CONFÉRENCES	27

INNOVATION TRANSPORT est réalisé par le Centre québécois de transfert de technologie routière et édité par la Direction des communications du ministère des Transports du Québec. Il est maintenant diffusé sur Internet à l'adresse suivante : <http://www.mtq.gouv.qc.ca/innovation/innovation.htm>

Rédaction : *Dominique Duchesne*
Révision linguistique : *Direction des communications*
Supervision graphique : *Jean-Pierre Tremblay*
Conception : *Tandem Conception et Infographie inc.*
Impression : *Imprimerie le Laurentien*
Photogravure : *Composition Orléans*
Pour obtenir de l'information supplémentaire, il suffit de s'adresser à :
Ministère des Transports du Québec
Observatoire en transport
700, boul. René-Lévesque Est, 21^e étage
Québec (Québec), G1R 5H1
Téléphone : (418) 643-6039
Télécopieur : (418) 646-2343
Courrier électronique : doduchesne@mtq.gouv.qc.ca

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
ISSN - 1480-610X
Tirage : 1800 exemplaires

UN SYSTÈME D'AIDE AUX DÉCISIONS EN VIABILITÉ HIVERNALE

Au Québec, l'hiver représente un défi de taille pour les automobilistes et les services routiers. L'entretien hivernal est essentiel tant pour la sécurité routière que pour l'économie. Si beaucoup croient que le travail se résume à enlever la neige et épandre du sel, la réalité est tout autre. La viabilité hivernale, qui conjugue l'entretien et l'exploitation de la route, dans la mesure où elle constitue un service aux usagers, est au cœur de la mission du Ministère.

Les données à prendre en compte dans les prises de décisions en la matière sont nombreuses et peuvent varier considérablement dans l'espace et le temps. Avec peu de moyens, le personnel concerné a su concevoir des stratégies d'analyse des situations souvent très efficaces. Par conséquent, nous ne doutons pas qu'il saura mettre à profit le système d'aide aux décisions en viabilité hivernale (SADVH) dont le Ministère s'apprête à doter le Québec.

Toutefois, il faut être conscient que la multiplicité des technologies et l'étendue du territoire constituent un véritable défi pour ceux qui travaillent à la définition technique et organisationnelle de ce système.

Un projet-pilote a été mis sur pied dans deux directions territoriales (la Montérégie-Est et la Mauricie—Centre-du-Québec) afin de définir et dimensionner le futur SADVH. Des entrepreneurs en déneigement participent à la démarche du Ministère. Cet important projet fait l'objet du dossier du présent numéro. Nous espérons susciter votre intérêt et vous faire connaître le travail que nous accomplissons en vue de faciliter la mise en place du système.

Anne-Marie Leclerc
Sous-ministre adjointe
Direction générale des infrastructures et des technologies



PROJET DE RECHERCHE

LE RENFORCEMENT DU PONT DE SAINTE-ÉMÉLIE-DE-L'ÉNERGIE AVEC DES MATÉRIAUX COMPOSITES

par **Gérard Desgagné, ing. MSc.,** ministère des Transports du Québec
Sandra Martel, ing., agent de transfert technologique, ISIS Canada
Pierre Rochette, ing., candidat au Ph.D., Université de Sherbrooke

En 1997, le ministère des Transports du Québec a amorcé, en collaboration avec l'Université de Sherbrooke, un projet de recherche sur le renforcement de ponts en béton armé à l'aide de matériaux composites, afin de mettre au point un schéma de renforcement accompagné d'une étude analytique visant la réhabilitation d'un pont l'année suivante.

Le type de structure sélectionné, soit un pont constitué de poutres en «T» simplement appuyées, est représentatif d'une grande partie des ponts du Québec. Il s'agissait donc de mettre au point une méthode de renforcement qui puisse s'appliquer à plusieurs ouvrages de même type présentant une déficience structurale.

À l'étape de la recherche expérimentale du projet, 16 poutres en béton armé ont été fabriquées et testées en laboratoire. Celles-ci comprenaient 12 poutres rectangulaires (section 105 mm X 350 mm, 3 300 mm de longueur) et 4 poutres en «T» proportionnées à échelle 1 : 3 par rapport à l'ouvrage de référence. Les poutres en «T» testées en laboratoire mesuraient 6,73 m de long et avaient une profondeur de 500 mm.



Les poutres rectangulaires ont servi à la mise au point de divers schémas de renforcement en flexion et en cisaillement, et ont permis la vérification des modèles analytiques proposés pour ce genre de renforcement. Les poutres en «T» ont été renforcées dans le but de répondre aux exigences particulières de renforcement de l'ouvrage type proposé par le Ministère. Une attention spéciale a été apportée au dimensionnement afin d'établir des corrélations acceptables quant au facteur d'échelle.

La durabilité des renforcements en matériaux composites a également été prise en considération. Différents types d'échantillons ont été fabriqués afin d'évaluer l'influence des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage sur un renforcement en matériaux composites collés à une surface de béton. Les essais préliminaires obtenus dans le cadre du projet confirment que ces cycles ont un effet négligeable, tant sur la résistance du renforcement que sur son adhésion. Des essais de durabilité à très long terme sont toujours en cours de réalisation.





À la suite de cette phase expérimentale, des travaux de renforcement furent entrepris à l'automne 1998 sur le pont de la Route 131, au-dessus de la rivière Noire à Sainte-Émélie-de-l'Énergie, une localité située au nord-est de Montréal. Ce pont est constitué de quatre poutres en béton armé de 21 m de portée. Les travaux préparatifs, incluant la cure du béton de réparation, ont duré trois semaines et les travaux de pose des composites se sont échelonnés sur deux semaines, dont cinq jours pour la pose.



Une augmentation de la capacité de 35 % en flexion et de 20 % en cisaillement a été nécessaire pour ce cas particulier. Ces valeurs ont été établies à partir des exigences de la plus récente norme sur le calcul des ponts routes CAN/CSA-S6-88 avec la surcharge routière QS-660. Le renforcement en flexion comprend six bandes longitudinales de CarboDur (fibres de carbone) de 50 mm de largeur sur la face intérieure de chaque poutre. Des étriers extérieurs en forme de « U » de type Sika Wrap (fibres de verre) ont, pour leur part, servi à augmenter la résistance à l'effort tranchant des poutres et à ancrer les bandes longitudinales.

Une instrumentation a été installée sur le pont afin d'en suivre le comportement dans le temps. Les 66 appareils installés comprennent

28 jauges résistives, 10 thermocouples, 20 capteurs à fibres optiques de type Bragg et 8 de type Fabry-Perot. Les appareils sont installés de façon à fournir des lectures complémentaires entre les différents types d'appareillage, et en particulier pour valider les lectures obtenues par fibres optiques. Cette phase des travaux fut effectuée conjointement entre l'Université de Sherbrooke et le ministère des Transports, ce dernier ayant supervisé et réalisé des essais de chargement avant et après les travaux de renforcement.

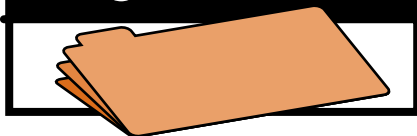
La mise à l'essai en chantier de cette technique de renforcement a été couronnée de succès. Les travaux ont été menés dans un délai respectant l'échéancier initial et les coûts de construction ont été conformes aux prévisions budgétaires.

De plus, les essais de chargement statique ont permis de vérifier la validité du modèle de même que le bon comportement du pont renforcé sous les charges de service. Enfin, des mesures additionnelles seront prises à intervalles réguliers dans le futur afin d'évaluer le comportement de l'ouvrage à plus long terme et de valider la technologie des fibres optiques pour ce genre d'application.

Note :

Le présent article a été publié dans la Revue générale des routes, n° 788, octobre 2000.





UN SYSTÈME D'AIDE AUX DÉCISIONS EN VIABILITÉ HIVERNALE (SADVH)

Par Jean Tanguay et Jean-Jacques Roussel, Service des technologies d'exploitation

INTRODUCTION

Depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, les industriels ont cherché à concevoir des outils de mesure *in situ* pour améliorer l'entretien hivernal des routes. L'Europe possède une grande expérience de ces outils depuis une trentaine d'années. Appelés d'abord « détecteurs de verglas », ils se sont transformés en « avertisseurs de verglas », en intégrant une « logique » de prévision du risque. Avec des capteurs chaussée plus sophistiqués et des capteurs atmosphériques de plus en plus nombreux, ils sont devenus de véritables stations météorologiques. D'abord instruments autonomes, ils ont petit à petit été intégrés dans des réseaux, avec d'autres stations et des informations météo plus ou moins interprétées. Il existe donc aujourd'hui de véritables systèmes météorologiques.

Le Québec et le Canada se sont intéressés tardivement à ces technologies, malgré la rigueur de leur hiver. Aujourd'hui, l'importance croissante du programme ITS au Canada place les systèmes d'information météorologique SMR (RWIS, Road Weather Information System, en anglais) au premier rang parmi les équipements que les gestion-

naires de routes souhaitent acquérir. Mais le choix est vaste parmi ces systèmes, alors que les besoins ne sont pas clairement définis et que le personnel n'est pas encore préparé à utiliser les données fournies par ces technologies.

Une série de questions se posent donc :

- Quelles technologies et quelles marques choisir ?
- Quelles sortes de capteurs installer ?
- De combien de stations météorologiques avons-nous besoin ?
- Existe-t-il des technologies de substitution ?
- Quels apports complémentaires sont nécessaires ?
- Comment se préparer à cet afflux d'informations nouvelles ?
- Comment mettre en place et assurer la maintenance d'outils aussi sophistiqués ?

Mais il faut avant tout répondre à deux questions plus fondamentales :

- Quels sont nos véritables besoins ?
- Quelle est notre véritable capacité de tirer profit de ces nouvelles technologies dans des contextes décisionnels difficiles ?

Remontant au début du projet, nous en décrivons l'évolution jusqu'à aujourd'hui. Nous expliquerons également certains concepts scientifiques souvent mal connus, puis nous décrivons la démarche adoptée par le Ministère pour définir et évaluer le système dont les décideurs chargés des opérations ont besoin.

Le SADVH : un enjeu majeur pour le Québec

Il est inutile de rappeler l'impact de l'hiver sur les routes du Québec. Ces quelques chiffres permettront toutefois de s'en faire une idée précise :

- 31 000 km de routes relevant du gouvernement provincial, dont 20 900 km entretenus par des entrepreneurs (95 M \$ de contrats), 4100 km par des municipalités (16 M \$ de contrats) et 6000 km en régie ; un budget global d'hiver de 175 M \$ pour le Ministère ;
- épandage de 700 000 tonnes de sel sur les routes gérées par le Ministère et de près de 1 300 000 tonnes sur l'ensemble du réseau.

De bonnes informations, pour pouvoir prendre la bonne décision au bon moment, cela peut permettre de limiter les coûts tout en facilitant l'atteinte des objectifs. À titre d'exemple, 10 p. 100 d'économie de fondants à l'échelle du Québec représentent 120 000 tonnes de sel, soit près de 7 M \$ chaque hiver !

LES HOMMES DU PROJET

Le programme franco-québécois d'échanges de fonctionnaires a permis à Jean-Jacques Roussel, expert français en viabilité hivernale, de travailler au Ministère de juin 1999 à juin 2000. À la suite du départ en avril 1999 de Monique Plamondon, qui était chargée du projet, le dossier a été confié à M. Roussel, en raison de sa longue expérience en matière de météo routière et de formation en viabilité hivernale. Notre collègue français a joué un rôle majeur dans la définition de la démarche que nous avons adoptée.



Deux ingénieurs sont venus compléter l'équipe du Service des technologies d'exploitation qui pilote le projet : Claude Lapointe, informaticien venant de la Direction des technologies de l'information et spécialiste en mesure optique, qui assure le suivi technologique, et Jean Tanguay, ingénieur issu du secteur privé et recruté au début de 2000, qui prend progressivement la relève de Jean-Jacques Roussel dans le pilotage du projet.

HISTORIQUE

À la suite des congrès internationaux sur la viabilité hivernale de Tromsø (1990) et surtout de Seefeld (1994), le ministère des Transports a décidé de mettre sur pied un projet visant à équiper en stations météorologiques tout le territoire.



Son premier objectif était de vérifier la faisabilité de telles technologies au Québec. Monique Plamondon, alors chargée du projet, a piloté l'installation de stations, d'abord avec la société finlandaise Vaisala, puis après son retrait du projet, avec le ministère de l'Environnement et de la Faune.

Quatre stations expérimentales ont été installées autour de Québec et sont utilisées par les centres de services de Québec et de Charny depuis 1997 ou 1998.

Parallèlement, le réseau autoroutier du Grand Montréal a été doté de cinq stations SERMO (France) et le Centre de services de Hull expérimente une station LUFT (Allemagne).

Depuis 1998, il y a donc dix stations météorologiques sur le territoire du Québec.

Une analyse a montré :

- que le niveau de maîtrise et d'utilisation est faible ;
- que la formation doit être améliorée ;
- que l'impact sur les modes de décision et de traitement est très variable ;
- que ces outils suscitent un intérêt et ont une valeur pédagogique indéniable.

Qu'est-ce qu'une station météorologique ?

Une station météorologique est d'abord un ensemble de capteurs atmosphériques montés sur un mât plus ou moins haut, couplé à un ou plusieurs capteurs installés dans la chaussée. Les capteurs atmosphériques peuvent mesurer la température de l'air, son humidité, la pression atmosphérique, le rayonnement solaire direct ou global et le rayonnement réfléchi, la force et la direction du vent, l'intensité voire la nature des précipitations, la visibilité et la couverture nuageuse. Les capteurs chaussée peuvent mesurer ou évaluer la température à la surface de la chaussée ou en profondeur, l'état de la surface en ce qui a trait à l'eau (sec, humide, mouillé,

glacé, givré, enneigé, l'épaisseur du film d'eau à la surface), l'état de la surface quant à la salinité (état sec salé, humide salé, température de congélation si humide...) et, bien sûr, une telle station peut être couplée à une station de mesure du trafic routier.

La source d'alimentation en énergie est généralement le secteur, mais certaines technologies peuvent aussi fonctionner à l'énergie solaire.

Cet ensemble de capteurs est relié à un boîtier électronique qui gère l'entrée des données et leur transmission, dont le mode peut varier (téléphone filaire ou sans fil, radio, câble de transmission).

Les données sont ensuite collectées, stockées et affichées dans un poste de visualisation, généralement spécialisé, qui sera exploité par un agent de communication ou par les responsables opérationnels.

Un poste de visualisation peut être couplé à plusieurs stations météorologiques

Les stations du Ministère

Les stations du Ministère ne sont pas dotées de capteurs chaussée sophistiqués : seules la température de surface et la température à 40 cm dans le corps de chaussée sont relevées. Mais ces deux informations sont traitées par Environnement Canada, qui fournit des prévisions sur la température de surface sur 24 heures.

Les paramètres atmosphériques mesurés : température de l'air, humidité relative de l'air, précipitations (intensité), direction et vitesse du vent, permettent une description continue des conditions atmosphériques locales.

Qu'est-ce qu'un système d'information météorologique ?

Un système d'information météorologique (SIMR) diffère d'une station météorologique

(SMR) par le fait qu'il offre plus de possibilités et permet de collecter plus d'informations.

On peut citer par exemple :

- l'affichage de données météorologiques générales sur l'écran (données des stations météorologiques, images radar des précipitations, images satellitaires ...);
- l'affichage de prévisions météorologiques sur les écrans (généralement sous forme de cartes analysées du temps prévu);
- l'affichage d'un réseau étendu de stations météorologiques (possible à l'échelle de tout un pays);
- le repérage des véhicules patrouilleurs ou d'intervention;
- un système de gestion des équipes d'intervention, voire un système de gestion globale pour l'hiver;
- un programme d'enregistrement des événements et des situations (main courante informatique);
- un système de gestion intégrée des informations sur l'état des routes;

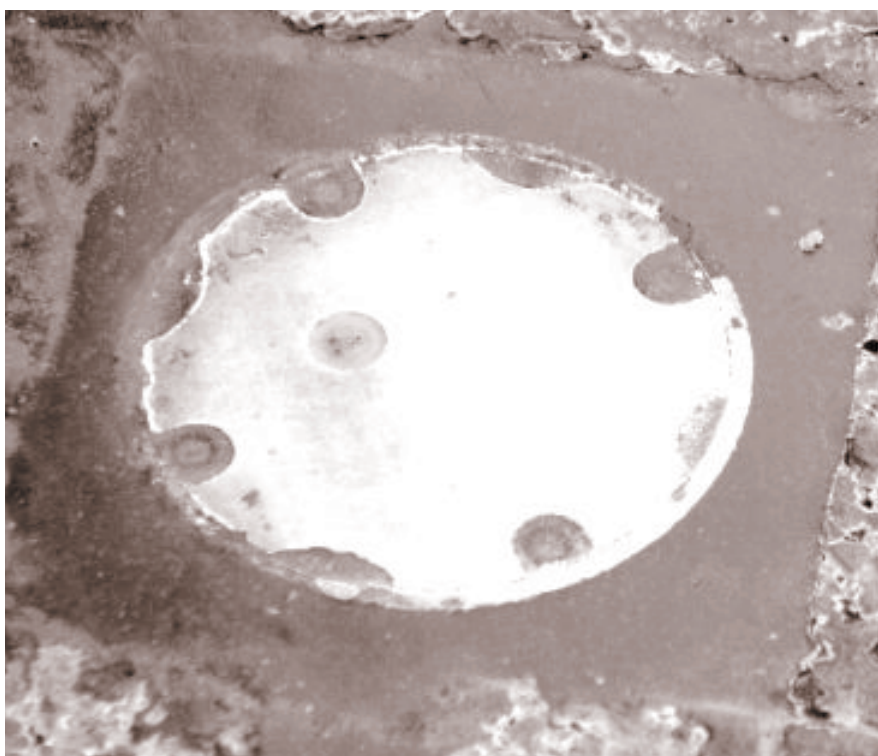
- un système intégré de gestion du trafic.

Dans certains pays comme ceux du nord de l'Europe et, plus récemment certains États américains, ces technologies ont atteint des degrés de sophistication assez élevés, notamment dans la présentation synthétique des données.

Mais la question pour nous reste bien : de quel système le Québec a-t-il besoin ? Et la réponse dépend bien sûr de notre réalité géo-climatique, mais aussi des contraintes organisationnelles qui sont les nôtres. Elle dépend également de la capacité d'appropriation de ces technologies par leurs futurs utilisateurs.

LES SMR DANS LE MONDE

USA	1200
Grande Bretagne	650
Suède	650
Allemagne	450
France	450
Suisse	400
Hollande	300
Danemark	250



Il existe près de 4000 stations dans le monde. Le Japon à lui seul dispose de nombreux sites de mesure de la température de surface.

Quelle est l'utilité véritable de ces technologies ?

La description technique des systèmes d'information météorologique risque de faire perdre de vue leurs applications concrètes. Voici donc un modèle global qui permettra de bien saisir ce qui peut être tiré des paramètres fournis par ce nouveau type de stations lorsqu'ils sont associés à d'autres données.

Il faut bien distinguer les conditions atmosphériques, ce qu'on appelle couramment le temps, les conditions routières sur la chaussée ou juste au-dessus et les conditions de circulation, qui résultent des deux premiers facteurs.

Aujourd'hui, les services de météorologie font des prévisions sur les conditions atmosphériques.

À partir de ces prévisions, les exploitants routiers essaient de déterminer quelles sont les conditions routières. Avec l'aide de systèmes plus perfectionnés de collecte et de traitement de données, ils pourraient faire de véritables prévisions sur les conditions routières.

Ces prévisions plus précises seraient un formidable outil pour améliorer les décisions en entretien hivernal.

À plus long terme, lorsque ces méthodes de prévisions seront maîtrisées et bien intégrées dans le processus de prise de décision, on pourrait envisager de diffuser au public des prévisions sur les conditions de circulation, 12 voire 24 heures à l'avance, ce qui serait beaucoup plus utile que la simple description de l'état des routes qui est diffusée actuellement.

Il est important de bien comprendre ce qui précède pour saisir :

- les possibilités qu'offrent de tels systèmes;
- les objectifs à court, moyen et long terme,

que nous pouvons nous fixer ;

- les efforts de formation qui vont s'imposer, à terme, à tous les acteurs.

Quelle intégration des données faut-il fournir ?

Les paramètres fournis par les stations météorologiques sont objectifs. Leur qualité météorologique peut être discutée, notamment pour les évaluations difficiles, comme celle de l'état de la surface de la chaussée. Mais la donnée brute ne détermine pas le choix de l'intervention, tant s'en faut ! Faut-il donc aider davantage le décideur, en ajoutant une méthode d'analyse, une intelligence artificielle qui guiderait voire remplacerait le décideur ? Si oui, jusqu'où peut-on aller sans risquer de nuire à la gestion des situations délicates, dans lesquelles le «sixième sens» reste toujours très précieux. Comment faire face aux situations de crise, aux pannes du système, si le décideur a été démobilisé par la présence de cette « intelligence » de substitution ?

L'outil à concevoir doit faciliter la prise de décision, la rendre plus simple. Mais **il ne doit en aucun cas prendre les décisions à la place des décideurs**, dont le rôle est appelé à devenir de plus en plus important, avec l'augmentation constante de la circulation et les exigences accrues de la population en matière de sécurité routière.

À propos de température

La température est un paramètre très important pour les décisions en viabilité hivernale. À cet égard, il faut savoir qu'il existe diverses températures mesurables.

D'une manière générale, la température traduit la vitesse moyenne des molécules gazeuses ou l'agitation des molécules solides qui composent un corps physique. Le système international d'unités (SI) utilise l'échelle de degrés Celsius (°C), définie à partir de deux températures caractéristiques de l'eau : celle de la glace fondante (correspondant à la graduation 0 °C) et celle de l'eau bouillante sous pression atmosphérique moyenne (correspondant à la graduation 100 °C).

Les échanges de chaleur

Mais la température permet aussi d'évaluer l'importance des échanges de chaleur entre les différents corps en présence. Entre deux corps à température différente s'établit automatiquement un passage de chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid, qui fait intervenir les processus physiques suivants : le rayonnement, la conduction, la convection. Cet échange de chaleur tend à égaliser les deux températures.

Quelles températures mesurer ?

La température de l'air (T_a) est la plus connue, car elle a une influence directe sur notre confort. C'est une température « convective », mesurée dans des conditions normalisées par l'Organisation mondiale de la météorologie pour limiter les effets indirects sur cette mesure (vent, ensoleillement, effets locaux, effets du sol...).

La température du corps de chaussée indique la quantité de chaleur ou de froid stockée dans la route. C'est une température « conductive » que l'on mesure au moyen d'une sonde placée à X cm de la surface (T-X).

Quelle approche adopter pour mesurer la température de surface de la chaussée (T_s) ? Le revêtement de la chaussée constitue une interface entre deux milieux très différents sur le plan thermodynamique. L'air est un milieu convectif, et le corps de chaussée un milieu conductif. La surface est soumise aux deux influences ainsi qu'au rayonnement solaire et bien sûr une source de rayonnement thermique.

La température de surface peut être définie comme étant :

- 1- la limite des températures conductives prises dans le corps de chaussée en rapprochant la sonde de la surface (exemple des températures des sondes chaussée des stations météorologiques) ;
- 2- la limite des températures convectives mesurées dans l'air en rapprochant la sonde de la surface (difficile à réaliser au-dessus d'une chaussée) ;
- 3- le rayonnement thermique émis par la surface (il s'agit d'une température radiative).

Chacune de ces façons de calculer a des avantages et des inconvénients. La température radiative, qui permet une mesure en continu, sans contact, est sans doute la plus opérationnelle.

Il n'existe pas de vraie température de surface, indiscutable, il importe simplement de choisir un outil et une méthode de mesure qu'on considérera comme donnant la température de surface de la route.

Le Ministère a fait appel à des chercheurs de l'Université de Sherbrooke pour définir une méthode de mesure de la température de surface qui pourrait être normalisée.

L'humidité de l'air

En l'absence de précipitations, l'humidité de l'air est un paramètre atmosphérique important pour comprendre les phénomènes d'apport d'eau sur la chaussée (condensation liquide, condensation solide, brouillard déposant), mais aussi le comportement de la neige sous l'effet du trafic ainsi que l'efficacité des fondants.

En météorologie, on utilise l'humidité relative (symbole U, exprimée en pourcentage) qui traduit le taux en vapeur d'eau de la masse d'air. Plus l'humidité relative se rapproche de cent pour cent, plus l'air est proche de la saturation. Tout refroidissement sans changement de masse d'air se traduit alors par une saturation de l'air humide. L'humidité relative se mesure avec un hygro-

mètre (il en existe de différents types).

On utilise aussi le point de rosée (symbole T_d , unité °C), température à laquelle il faut abaisser l'air pour l'amener à saturation ($U = 100\%$). Il y a alors début de condensation. Si le refroidissement de l'air se poursuit, la condensation augmente et il y a formation de brouillard. Plus le point de rosée est inférieur à la température de l'air, plus l'air est sec.

Analyse des besoins

Avant de se lancer dans l'installation massive de stations météorologiques sur le territoire du Québec, le Ministère a réalisé une analyse des besoins des utilisateurs potentiels de ces stations. L'objectif était de définir tous les besoins afin de trouver des pistes d'améliorations sans présupposer des solutions technologiques.

Nous avons rencontré une soixantaine de personnes de six directions territoriales (Estrie, Saguenay—Lac-Saint-Jean—Chibougamau, Chaudières-Appalaches, Est-de-la-Montérégie, Mauricie—Centre-du-Québec, Outaouais ainsi qu'une dizaine d'entrepreneurs de l'Association des propriétaires de machinerie lourde du Québec (APMLQ).

Tous les types de décisions ont été passés en revue, du monitoring des situations aux interventions proprement dites en passant par la gestion de la route et le suivi des contrats.

Voici les principales conclusions de cette analyse de besoins :

- 1- Un important effort de formation est nécessaire. En particulier, une meilleure connaissance des phénomènes routiers associés à la notion de «glace noire» est souhaitée.
- 2- La connaissance que les exploitants ont du réseau est à formaliser, d'une manière ou d'une autre.
- 3- Les décideurs opérationnels attendent plus d'informations sur les paramètres de chaussée (T_s , adhérence, humidité). Le patrouilla-

ge reste, de l'avis de tous, le meilleur moyen de collecter ces informations.

- 4- Une connaissance spatiale du paramètre température de surface de chaussée est particulièrement souhaitée.
- 5- La normalisation du matériel (capteur, affichage, traitement éventuel) et de son installation sur les camionnettes est souhaitée — une information sur la mesure infrarouge et ses limites devra être fournie. La même chose est attendue pour le système de mesure embarqué de la température de l'air.
- 6- Une amélioration des météocopies est attendue.
- 7- Le trafic joue un rôle très important et il faut tenir compte de son évolution. La prévision météo à très court terme, voire le suivi en temps réel, pourrait constituer un progrès déterminant.
- 8- Des données météo (prévisions et constat) plus précises pour les régions montagneuses sont attendues.
- 9- En particulier, les décideurs souhaiteraient une meilleure prévision des conditions propices à la formation de glace noire.
- 10- De nombreuses améliorations des données actuelles sont attendues pour que le SIMR ait une approche plus globale. La question de la représentativité spatiale des données est fondamentale.
- 11- Des stations météorologiques sont réclamées dans certains centres de services déjà familiarisés avec cette technologie. On s'accorde cependant à dire qu'il ne s'agit pas d'une panacée.

Cette analyse de besoins, réalisée à l'automne 1999, s'est avérée extrêmement riche. Les résultats sont relativement uniformes, que ce soit en régie ou chez les entrepreneurs, même si des points de vue différents se sont exprimés parmi les personnes interrogées.

Les dix conditions gagnantes

Voici les dix conditions que nous jugeons essentielles à la réussite du déploiement d'un système d'aide aux décisions en viabilité hivernale.

Note : dans ce qui suit, le terme « utilisateur » désigne les personnes chargées de prendre des décisions opérationnelles en s'appuyant sur les informations du système.

- 1- Une politique et, en particulier, des objectifs de service hivernal clairs et bien compris des utilisateurs.
- 2- Une organisation du service hivernal dans laquelle les divers rôles et les responsabilités sont bien définis et respectés.
- 3- Un management de l'évolution de ces technologies qui fait participer les utilisateurs et qui prend en compte leurs besoins réels.



- 4- Une approche qui laisse les utilisateurs au centre de la décision opérationnelle.
- 5- Des outils bien étudiés sur le plan ergonomique et qui aident les utilisateurs, sans penser à leur place.
- 6- Des réponses satisfaisantes aux autres attentes des utilisateurs révélées par l'analyse des besoins et qui ne peuvent pas être satisfaites par l'apport technologique.
- 7- Des supérieurs hiérarchiques qui encouragent l'adaptation à la nouveauté, en particulier en donnant le droit à l'erreur aux utilisateurs.
- 8- Un intéressement réel et concret proposé aux utilisateurs pour l'utilisation de ces nouvelles technologies et de ces nouvelles connaissances (point important, qui touche à la gestion des compétences).
- 9- Des formations conçues pour répondre aux préoccupations concrètes des utilisateurs.
- 10- Un véritable suivi dans le temps de l'utilisation et des performances de ces systèmes, confié en premier lieu aux utilisateurs.

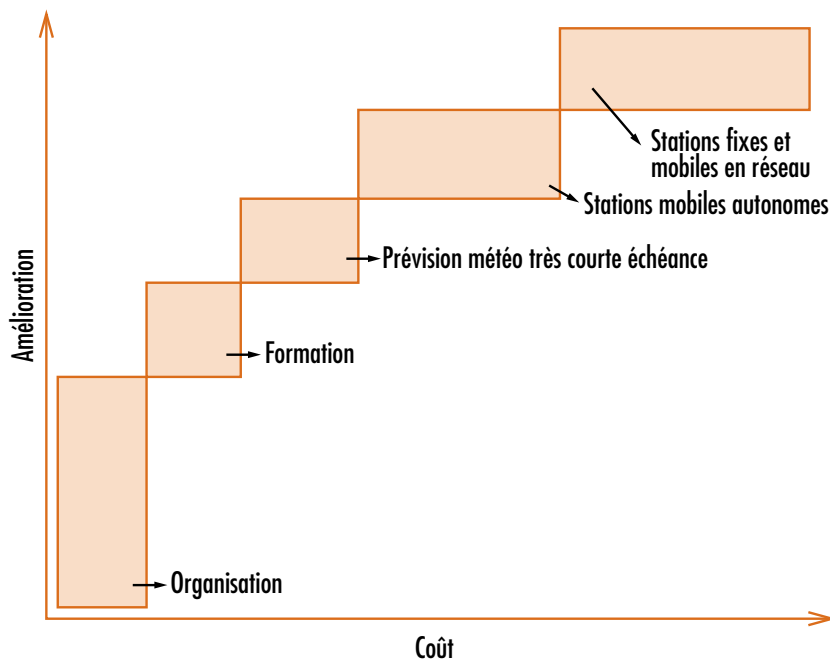
LE PROJET-PILOTE

Le Ministère s'est engagé cet automne dans un projet-pilote étalé sur deux années. Son but est de définir et de dimensionner le futur SADVH du Québec. Pour ce faire, cinq étapes ont été prévues.

La formation : Tous les décideurs opérationnels impliqués (régie et contrat) dans le projet-pilote vont suivre, en septembre-octobre, un stage de formation en météo routière d'une durée de deux jours. Ce stage leur donnera les connaissances nécessaires pour déterminer les informations utiles pour ensuite trouver les technologies à mettre en place. Ce sera également l'occasion de mettre en place une approche et un langage communs.

L'organisation : Décider, c'est d'abord disposer, dans l'espace et le temps, d'un certain nombre d'informations. Ces informations existent la

Mesure réelle appliquée à l'aide aux décisions en viabilité hivernale



plupart du temps et leur mise à la disposition des décideurs n'est bien souvent qu'un problème de circulation de données, donc d'organisation entre les divers acteurs.

Les outils météo : L'accès à des outils météo spécialisés, comme les images radar ou images satellite, et la production d'un bulletin météorologique amélioré sont de nature à améliorer le service hivernal de manière significative.

Les véhicules équipés ou stations météorologiques mobiles (SMRM) : La patrouille du réseau est, et restera, le principal moyen d'évaluer le temps et les conditions routières. Pour aider le patrouilleur à prendre des décisions, trois capteurs mesurant la température de l'air, le point de rosée et la température de la chaussée sont installés sur son véhicule.

Les stations météorologiques fixes (SMRF) et la mise en réseau de l'information : Alors que les SMRM se déplacent sur le réseau, les SMRF sont installées à des points précis. Elles constituent donc un repère par lequel le décideur peut évaluer l'état de ces points instantanément et à tout moment.

L'information collectée par certaines SMRM et SMRF pourra être utile à d'autres. Il apparaît donc souhaitable de la rendre disponible sur support informatique.

Jusqu'où aller ?

La nature des différentes étapes du projet et, par conséquent, leur coût varient sensiblement. Les étapes les moins onéreuses seront réalisées en premier. On évaluera le rendement à chacune des étapes afin de déterminer avec précision la courbe amélioration/coût.

Évaluer

Pour ce faire, le Service des technologies d'exploitation et la Direction de l'amélioration de la performance de l'organisation ont mis au point un outil d'évaluation. Le but de cet outil est de mesurer l'amélioration du contexte dans lequel la décision est prise, et non pas la décision elle-même. Il s'appuie essentiellement sur la perception subjective des décideurs.

Accompagner

Les moyens d'accompagnement seront définis durant le projet, par les participants des directions territoriales pilotes. C'est, en quelque sorte, du «sur mesure». Le Service des technologies d'exploitation a déjà réuni les différents partenaires qui, le moment venu, participeront à la mise en œuvre des réponses aux demandes du champ. Le rôle du service sera donc de s'assurer que la démarche est bien comprise par tous ceux qui participent dans les directions territoriales et de coordonner la mise en œuvre des activités.

Choix des deux directions territoriales

Le projet-pilote se déroulera dans deux directions territoriales : l'Est-de-la-Montérégie et la Mauricie—Centre-du-Québec. Les étapes vont être décalées d'une année entre ces deux directions pour les besoins de la mesure. Dans chacune d'elles, un **comité territorial de projet** assure la bonne marche du projet.

Rôle des centres de services étalons

Québec et Charny, premiers centres de services où ont été utilisées les stations météorologiques, de même que Hull ont été des précurseurs et seront bien sûr associés au projet. Sont en cours de mise au point avec eux :

la formation de base

le prototype de logiciel de visualisation

le prototype de SMRM

la définition d'un «produit météo» amélioré.

Objectifs

Le projet-pilote devrait aboutir au printemps 2002. On saura alors quel est le rapport amélioration/coût établi à chacune des étapes. On pourra ainsi déterminer quel est le système optimal pour le Québec. On aura également pu

établir quelles sont les conditions à remplir pour assurer son implantation, en particulier quel travail d'accompagnement il faudra assurer auprès des futurs utilisateurs.

CONCLUSION

L'importance de ce projet pour le ministère des Transports et le Québec est indiscutable. Mais, sa réussite est entièrement conditionnée par l'adhésion des futurs utilisateurs à ces technologies. Il importe donc qu'ils se sentent au centre de la démarche et qu'ils comprennent bien l'utilité des informations que peuvent fournir ces technologies.

La formation en météo routière hivernale est d'une importance capitale, et le Ministère entend y consacrer les moyens nécessaires. L'accompagnement pendant les étapes de la mise en œuvre jouera également un rôle fondamental et nous souhaitons une mobilisation de tous les coordonnateurs territoriaux en viabilité hivernale et de tous les techniciens. Sans leur collaboration, le déploiement à l'échelle du Québec et le maintien de ce système pourraient être difficiles.

La démarche engagée avec les directions territoriales pilotes sera riche d'enseignements quant au travail d'accompagnement à accomplir et elle permettra de mesurer jusqu'où il faut mener l'implantation technologique pour atteindre un rapport coût/résultat optimal. Elle permettra aussi d'évaluer le rôle des entreprises de déneigement dans ce projet et de définir de quelle manière ce nouveau service pourrait leur être offert.

L'expérience est originale, et les autres provinces, par l'intermédiaire d'un groupe RWIS Canada, d'ITS Canada s'intéressent de près à nos travaux, en particulier à l'aspect formation.

Nous entretenons également des relations étroites avec le consortium nord-américain Aurora qui travaille à promouvoir la recherche et les innovations en météo routière. Notre projet fera l'objet d'une présentation au prochain congrès international sur la viabilité hivernale à Sapporo, en

2002. La France et le Québec souhaitent y proposer l'approche québécoise aux pays qui ne sont pas encore équipés.

Le travail de préparation de l'ensemble des directions territoriales sera également fondamental lorsqu'il faudra, à partir de 2002-2003, généraliser la mise en place du système. Cette généralisation sera progressive et nécessitera sans doute, comme pour les deux directions territoriales pilotes, au minimum deux années de travail. Les coordonnateurs territoriaux en viabilité hivernale recevront une formation spéciale, car ils seront les principaux collaborateurs dans la mise en œuvre de cette démarche ; mais tous les centres de services et les entrepreneurs intéressés devront s'impliquer.

Cette démarche sera l'occasion :

- de capitaliser les savoirs que les décideurs expérimentés chargés des opérations ont de leur territoire et de leur climat ;
- de rapprocher la «culture» de la météo et la «culture» de gestion routière ;
- d'optimiser les moyens d'intervention en entretien hivernal, et en particulier les fondants.

Elle nécessite une révision des définitions générales de la politique de l'entretien d'hiver, en y incluant les nouvelles informations disponibles. Elle suppose aussi une révision de l'organisation actuelle, en vue d'augmenter l'échange des informations entre les acteurs.



Sécurité de l'information

LES RISQUES INFORMATIQUES

par Richard Pagé, coordonnateur ministériel de la sécurité de l'information,
Direction générale des services à la gestion

Le lundi 7 février 2000 : branle-bas de combat au FBI. La priorité numéro un est de savoir quels sont les petits futés qui ont saboté les fleurons de la cyberéconomie (Yahoo, CNN.com, Amazon, ZDN et E-Trade). Qui a donc osé bombarder ces cibles, qui promettent de changer les habitudes de consommation de la terre entière, d'un si grand nombre de questions à la fois que les circuits ont flanché?

Une semaine plus tard, le président des États-Unis réunissait les représentants de l'industrie informatique. La question de la sécurité était sérieuse. En effet, le Computer Security Institute a révélé que 60 % des 520 entreprises et institutions américaines ayant fait l'objet d'un sondage en 1998 avaient relevé diverses formes d'opérations illicites à l'intérieur de leurs systèmes, soit une augmentation de 50 % par rapport à l'année précédente. De ces opérations, 57 % avaient eu recours à Internet.

Il y a 10 millions de pirates informatiques dans le monde qui sont en mesure de lancer ce genre d'assaut. Las Vegas accueille annuellement en congrès la crème d'entre eux. Une panoplie de techniques permettent de perturber Internet ou de pirater un réseau qui y est relié. Toutes les organisations peuvent être éventuellement touchées par les problèmes de sécurité informatique.

Attrait du risque

Ce sont les conséquences hypothétiques en découlant qui caractérisent la représentation que l'on se fait du risque. L'incertitude nuit à la capacité de l'individu d'en contrôler les effets. Internet est un réseau mondial. Si, par exemple, l'auteur d'un délit se trouve à l'étranger, il faut des déro-

gations pour conduire les enquêtes. Avec Internet, la frontière tracée entre sécurité, espionnage et piratage est assez floue.

On peut réfléchir pour tenter de réduire la marge d'incertitude : c'est ce qu'on appelle le risque calculé. On peut considérer le doute comme un stimulus excitant : cela constitue le risque attractif. On peut également mettre l'accent sur les effets négatifs liés à l'inconnu : c'est la peur des conséquences, où l'interdiction rend l'accomplissement de certains actes de piratage informatique plus alléchant. Ce dernier type de perception demeure cependant un acte irréfléchi, voire naïf. Il caractérise, entre autres groupes, les *mafia boys* que l'on nomme, dans le jargon, les *script kiddies*. Les tentatives de sabotage immatériel (virus, bombes logiques) peuvent, néanmoins, avoir des conséquences très graves.

Une vingtaine de services de renseignements étrangers font de l'espionnage économique au Canada. Selon les Services canadiens de renseignements de sécurité (SCRS), leurs cibles, désormais, sont les PME engagées dans des secteurs de la haute technologie. Assurer la protection des données stratégiques est essentiel. Une sensibilisation élaborée par le SCRS est mise à la disposition des entreprises qui veulent implanter un système de protection de leur information (www.csis-scrs.qc.ca).

Faire de l'espionnage, c'est prendre un risque réfléchi, soit en fonction des avantages escomptés, soit en fonction des enjeux et du but visé. Il y a, à coup sûr, une quête de profits dans la prise de risque. L'estimation du risque à prendre s'apparente au calcul des probabilités. Le risque apparaît en tant que mesure subjective entre un acte et le profit qu'on en retire : il faut minimiser les

effets négatifs ou, encore, en arriver à les contrôler.

Il serait impensable de croire que ceux qui prennent des risques vont bientôt cesser leurs activités. Il est plutôt nécessaire d'élaborer des systèmes de protection, et ce, au sens le plus large du terme. Une organisation doit se protéger contre le risque. La problématique de sécurité de l'information porte sur la cohérence et la pertinence des actions prises en matière de prévention pour protéger les actifs informationnels. Il est donc important de s'intéresser à la mise en relation des logiques d'intention et des stratégies d'action.

Aujourd'hui, il faut gérer la sécurité informatique. Les systèmes d'information doivent être considérés comme étant un élément stratégique au même titre que le personnel, les produits, les techniques ou les marchés. Les analyses de risque montrent encore aujourd'hui que la grande faiblesse de ces systèmes réside principalement dans le manque de cohérence de la sécurité mise en œuvre. Cette situation résulte soit d'un manque de préoccupation au regard de la sécurité elle-même, soit d'une prise en compte inadaptée et trop tardive des besoins de sécurité dans le cycle de conception et de développement des applications informatiques.

Gérer la sécurité

Gérer signifie adopter et mettre en œuvre une politique « corporative » de sécurité de l'information, analyser les défauts de la cuirasse de l'organisation et les risques qui menacent les actifs informationnels, établir un registre d'autorité montrant clairement la délégation des responsa-

bilités de la haute direction, dresser un plan opérationnel pour minimiser les risques et contrôler les projets de ce plan qui visent à améliorer la sécurité de l'organisation.

L'arbre de la sécurité informatique présenté ci-après schématise l'ensemble de ce domaine et en montre les grandes lignes. Un plan opérationnel de sécurité qui s'appuie sur les flux, sur l'architecture technique, sur les données, sur les traitements et les procédures organisationnelles permet au processus d'être exhaustif et de répondre aux besoins de sécurité des activités informatisées. L'organisation cherche ainsi à obtenir un degré d'adéquation acceptable entre les risques potentiels qui la menacent et les mesures de sécurité correspondantes mises en place.

On se préoccupe, en premier lieu, de la sécurité des installations informatiques. Il ne faut surtout pas oublier les logiciels, les systèmes d'exploitation, les programmes et les applications. Vient ensuite la protection des données. C'est là que réside le cœur d'une organisation. Que ces données soient perdues, détruites ou divulguées peut avoir des effets néfastes, surtout si elles sont confidentielles ou stratégiques.

Le gouvernement du Québec détient une foule de renseignements indispensables à l'élaboration de ses produits et au bon fonctionnement des services qu'il rend. Cette masse d'information et les moyens d'en faire usage constituent une valeur importante. Ces systèmes sont considérés comme des biens faisant partie de l'actif de l'État. L'Administration québécoise est tenue de

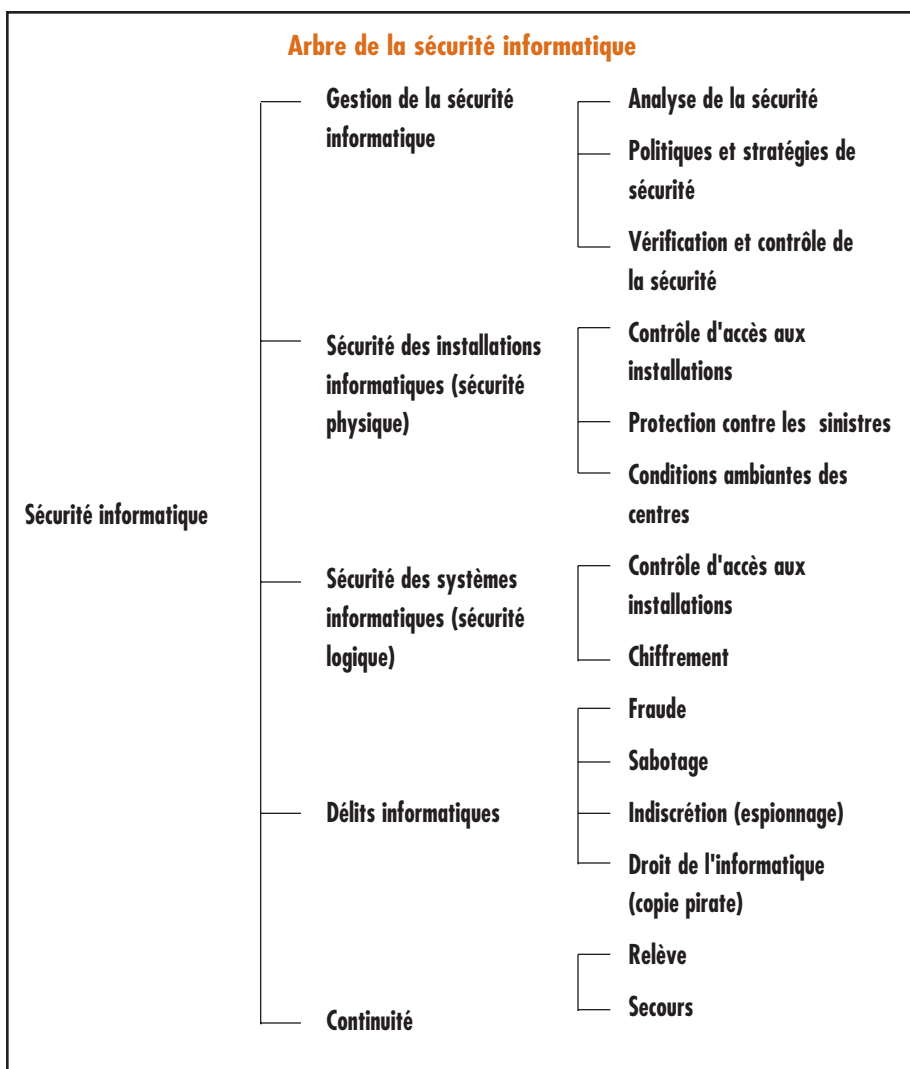
les protéger et enjoint, depuis 1993, tous les ministères et organismes du gouvernement à gérer leur propre sécurité informatique.

Enfin, il faut protéger les échanges d'information de même que les transactions. Un important volet de télécommunication est à la base de ces opérations. Il ne faut pas oublier que la navigation dans les sites Web et l'usage du courrier électronique se font à titre de représentant(e) de l'organisation. Le réseau du Ministère relie environ 4500 postes de travail au moyen de plus de 230 serveurs répartis dans environ 100 bureaux situés sur le territoire du Québec. Il peut donc être mis dans une position de vulnérabilité si l'on se sert indûment du courrier électronique pour faire du harcèlement, dénigrer des produits, diffamer des personnes, divulguer des informations confidentielles, violer des droits de propriété intellectuelle ou accomplir des actes illégaux.

Dès qu'une organisation utilise Internet, il est beaucoup plus difficile de maîtriser les flux qui entrent et qui sortent de son réseau. La vulnérabilité face aux intrusions augmente alors énormément. Chaque consultation sur Internet, chaque message électronique identifie et associe le ministère des Transports à cette consultation ou à cette transmission. La Politique sur l'utilisation de l'infrastructure à Transports Québec sera officiellement adoptée cet automne afin de guider le personnel du Ministère dans l'utilisation de ces outils fort utiles, mais qui n'en sont pas moins source de vulnérabilité.

Sécurité physique

La maniabilité des ordinateurs portatifs constitue un handicap en ce qui concerne leur protection. Au bureau, il est important qu'ils soient toujours fixés au moyen d'un câble métallique. Ils sont, en effet, faciles à voler parce qu'ils se dissimulent très facilement, ce qui engendre des pertes matérielles difficilement récupérables sans compter la perte d'informations irremplaçables et souvent confidentielles.



Quand on imagine en quoi consiste la sécurité physique, nous viennent immédiatement à l'esprit les moyens pris pour empêcher une éventuelle intrusion dans les locaux du Ministère au moyen d'un contrôle d'accès aux installations afin de nous prémunir contre le vol ou le sabotage de matériel. C'est exact, mais la sécurité physique représente plus que cela. En réalité, elle englobe l'entière sécurité des installations informatiques, ce qui couvre également la protection contre les sinistres ainsi que le maintien des conditions ambiantes des centres informatiques (climatisation, pollution).

La destruction physique par le feu, la fumée, le passage des pompiers, le déclenchement des gicleurs ou d'un système d'extincteurs ainsi que les dégâts causés par les eaux, la glace, la grêle, la neige, la boue, sont autant de préoccupations en matière de protection contre les sinistres. Mais il y a, de plus, les séismes, les effondrements, les glissements de terrain, les débordements de rivière, etc. Est-ce exagéré ? Pensons un seul instant à nos systèmes météorologiques. Le ministère des Transports n'a pas encore élaboré son plan de sécurité physique intégrant un plan de secours. Il est donc vulnérable aux avaries, aux pannes et autres sinistres pouvant entraîner l'indisponibilité ou la destruction d'actifs importants.

Bien qu'elle porte sur les biens informatiques matériels, la sécurité physique assure aussi la protection des biens informatiques immatériels. Elle constitue une protection de premier niveau au regard des logiciels, des données et des programmes. Il s'agit donc de la mise en vigueur d'un ensemble de mesures de sécurité informatique permettant d'assurer la sécurité des personnes dans un centre informatique ainsi que la protection de l'environnement et des biens informatiques matériels contre toute forme de menace physique, accidentelle ou humaine.

Sécurité logique

Si l'on poursuit l'examen de notre arbre de sécurité, nous en arrivons à la sécurité des systè-

mes informatiques eux-mêmes. On pense évidemment aux contrôles d'accès logique et au chiffrement. La mise en vigueur d'un certain nombre de mesures de sécurité informatique nous permettent, en effet, de protéger la confidentialité et l'intégrité de nos actifs technologiques (logiciels, données et réseaux). Ces mesures constituent, en outre, la protection « corporative » contre toute forme de menace accidentelle ou humaine.



Il existe des mécanismes intégrés au matériel pour assurer une défense contre les tentatives illégitimes d'accès et les pannes. Il existe aussi des mécanismes incorporés aux logiciels qui protègent les systèmes informatiques et le traitement des données contre les tentatives illégitimes d'accès. Le contrôle d'accès logique est basé sur l'utilisation de mots de passe, sur la mise en place de logiciels de contrôle d'accès, etc. Un gros travail nous attend dans ce domaine, d'autant plus que les mesures de sécurité logique existantes ne permettent pas encore au Ministère d'assurer l'application des exigences gouvernementales et ministérielles en vigueur.

Nous attendons du Conseil du trésor les outils de gestion qui nous permettront de mettre à la disposition de tous et de toutes les moyens nécessaires pour favoriser l'application de la nouvelle Directive sur la sécurité de l'information numérique et des échanges électroniques dans l'administration gouvernementale, en vigueur depuis février dernier. Est-il besoin de préciser les tenants et les aboutissants des délits informatiques tels qu'ils sont énumérés dans l'arbre qui nous sert d'illustration ? Cette simple énumération devient une image significative des

conséquences de ces délits au regard du droit de l'informatique.

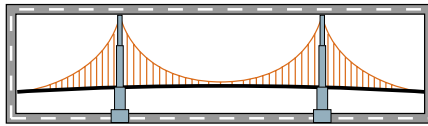
- Fraude et sabotage immatériel : piratage, détournement d'avantages ou de biens, bombes logiques, virus.
- Indiscrétion, détournement : non-respect du code de déontologie, espionnage industriel.
- Détournement de logiciel : copie illicite, plagiat.

Registre d'autorité

L'information, que nous gérons, nous est confiée par délégation d'autorité du sous-ministre. En effet, « les ministères et organismes étant les premiers responsables de la sécurité des informations qu'ils détiennent ou utilisent pour leur propre compte ou celui d'un tiers, le sous-ministre ou le dirigeant d'organisme doit s'assurer du respect des lois ainsi que des objectifs, directives et normes de sécurité déterminés par le Conseil du trésor et voir à ce que soit gérée la sécurité de l'information numérique et des échanges électroniques... », indique la directive à la page 9.

Nous aurons à constituer un registre d'autorité étroitement lié aux centres de responsabilité paraissant à l'organigramme budgétaire du Ministère. Ce registre d'autorité de la sécurité de l'information permettra de connaître précisément l'étendue des pouvoirs, les devoirs et les responsabilités attribués aux principaux acteurs concernés par la gestion des actifs informationnels et technologiques.

Ensuite, nous établirons nos besoins selon trois volets : l'évaluation et la classification des actifs ainsi que l'évaluation des risques qui les menacent. Le classement des actifs se fait en fonction de l'importance des valeurs en cause (importance stratégique, valeurs : administrative, légale, patrimoniale et économique) relativement aux conséquences qu'elles peuvent avoir sur la continuité des opérations (disponibilité), l'intégrité et la confidentialité qu'aurait une atteinte à la sécurité de l'information ministérielle.



Retraitement en place à Transports Québec : Résultats des suivis de performance de 1991 à 2000

Par Guy Bergeron, ing. M.Sc., Service des chaussées

Introduction

Au ministère des Transports du Québec, la technique de retraitement en place est utilisée depuis bientôt dix ans. Des suivis de performance entrepris sur divers projets ont permis de préciser les domaines d'application de la technique et de trouver de nouvelles technologies. Les résultats obtenus sont basés sur la mesure des indicateurs de performance tels la fissuration, le confort au roulement, l'orniérage et les propriétés mécaniques des matériaux.

Après plus de cinq ans de mise en service, plusieurs sites inclus dans le programme de suivi de performance du Service des chaussées présentent un faible taux de fissuration et un orniérage comparable à ceux mesurés sur des chaussées ayant fait l'objet d'une reconstruction partielle ou totale. La technique s'avère efficace pour éliminer certains types de fissures et elle est adaptable à différents contextes. L'évolution de divers paramètres liés à la technique, notamment l'utilisation de liant mixte, a permis d'élargir les domaines d'application à des routes plus sollicitées.

Les étapes de la préparation de projet, soit les études préliminaires, le choix des options et le dimensionnement structural sont essentielles.

Définition

Le retraitement en place des chaussées est aussi connu sous l'appellation «décohésionnement-stabilisation», et parfois «pulvérisation-stabilisation», lorsqu'il y a effectivement stabilisation des matériaux.

La technique consiste, dans un premier temps, à concasser le revêtement bitumineux sur toute son épaisseur, en lui incorporant une partie de la fondation granulaire sous-jacente. Une fois homogénéisé, le matériau décohésionné est nivelé et densifié pour former une nouvelle fondation. La deuxième étape consiste à stabiliser le matériau à l'aide d'un liant, sur une épaisseur définie, généralement comprise entre 100 et 150 mm. Cette deuxième étape est toutefois facultative. La méthode peut être combinée avec un mode de réfection traditionnel. La pose d'un revêtement bitumineux en surface complète la technique.

En fait, la notion de retraitement renvoie à trois options ou procédés distincts (figure 1), dont le choix dépend essentiellement du problème que présente la chaussée et du contexte caractérisant le site étudié. Le potentiel d'application de chacune des options est discuté dans cet article.

Depuis 1998, la réutilisation des résidus de béton de ciment et bitumineux est encadrée par le projet de norme sur les matériaux recyclés (MR) (2). L'intégration de ce projet de norme aux travaux de retraitement en place est à l'étude et n'est pas traitée dans le présent article.

Volume de travaux effectués

Comme le montre la figure 2, une hausse importante de l'utilisation de la technique de retraitement en place s'est produite à partir de 1991, atteignant un maximum de 108 km de chaussées retraitées (7000 m²/km) en 1994. Depuis, on note une diminution de l'utilisation de la technique, qui ne représentait plus que 60 km en 1999. Par contre, l'utilisation de matériaux recyclés (MR) est passée de 44 km en 1998 à 78 km en 1999.

La figure 3 met en évidence les différents types de travaux recourant au recyclage de matériaux de chaussée. Les options ne faisant pas appel à la stabilisation des matériaux, soit le «décohésionnement+revêtement» et le «décohésionnement+rechargement» représentent, à elles deux, environ 50 % des travaux, tandis que l'option stabilisation demeure la plus utilisée avec près de 50 % des travaux de retraitement. Notons que, depuis deux ans, on fait une utilisation plus systématique des liants mixtes lors de travaux de stabilisation (plus de 21 km). En 1999, plus de 63 % des travaux de recyclage ont été effectués autrement que par un retraitement en place «classique», au moyen de matériaux recyclés.

Suivis de performance

Un programme de suivi a été entrepris dès le début des années 90 par le Service des chaussées (1) afin d'évaluer la performance des chaussées retraitées ainsi que diverses caractéristiques des matériaux. L'étude des propriétés structurales des matériaux stabilisés, comprenant

Figure 1. Retraitement en place : OPTIONS (procédés)

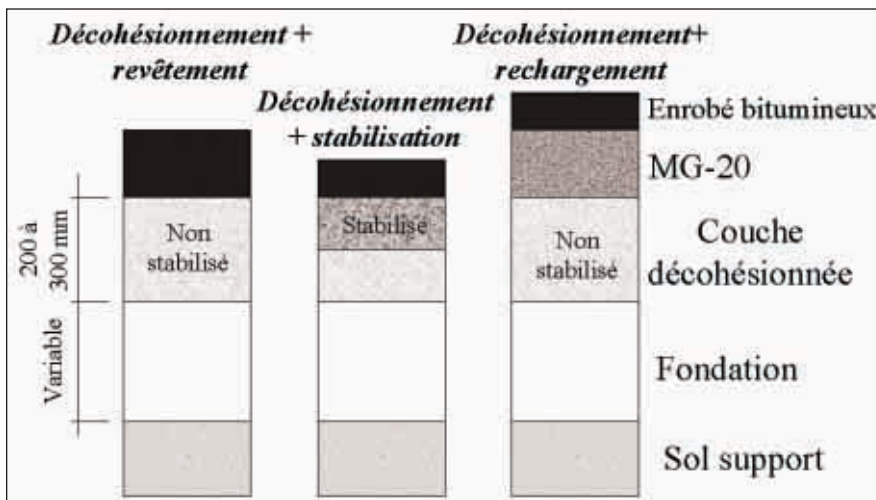


Figure 2 : Retraitement en place 1991-1999

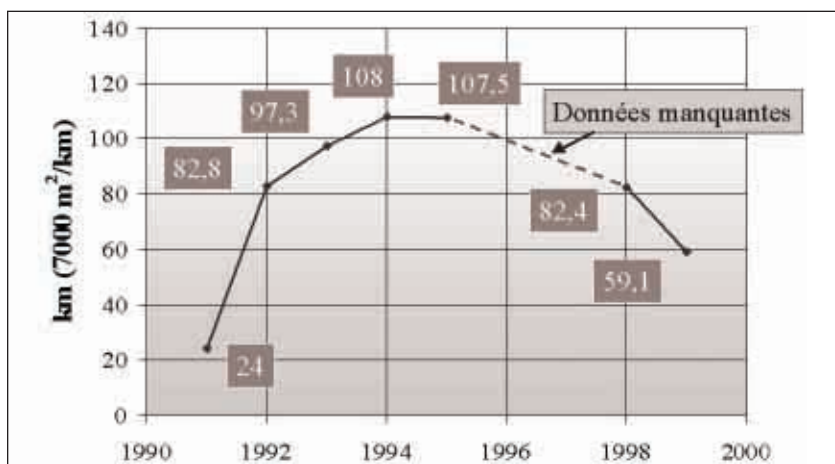
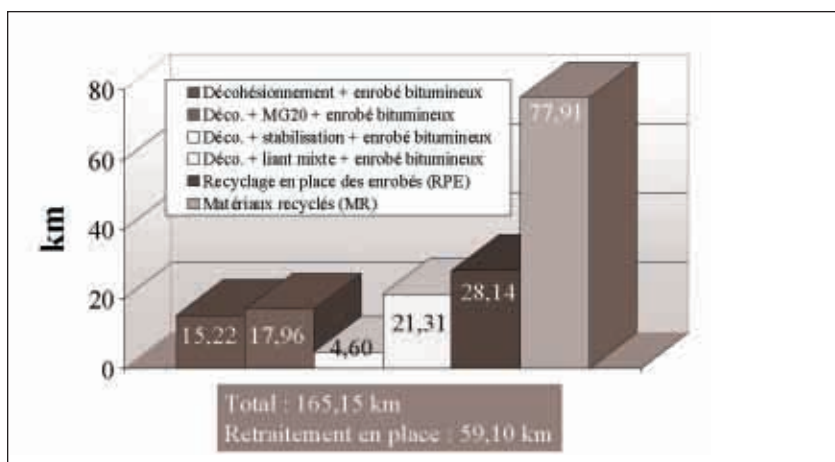


Figure 3 : Bilan 1999 : Retraitement en place et recyclage



des essais en laboratoire et sur la chaussée, constitue l'un des objectifs de ces suivis. La démarche consiste à mesurer des indicateurs de performance tels que la fissuration, les ornières et la qualité de roulement sur une période de cinq ans, et plus dans certains cas. Les sites présentés au tableau 1 ont en plus fait l'objet de relevés visuels détaillés, de carottage et d'essais de déflexion avec le deflectomètre à masse tombante (FWD). La plupart de ces sites ont été caractérisés de façon détaillée (été et hiver) avant les travaux et comportent des sections témoins. Cette approche est utile pour faire des comparaisons et établir les limites d'utilisation de la technique.

Caractéristiques mécaniques des matériaux selon le procédé

Matériaux décohesionnés (non stabilisés)

La pratique la plus courante jusqu'à maintenant, consistant à décohesionner sur une épaisseur égale à deux fois l'épaisseur du revêtement, se traduit par un contenu en granulats bitumineux voisin de 50 % dans le matériau décohesionné. Des études antérieures, réalisées en laboratoire (3), ont révélé que les propriétés mécaniques d'un matériau granulaire dont le calibre est voisin d'un MG20 décroissent avec l'augmentation de son contenu en granulats bitumineux. Selon les

propriétés des granulats vierges, l'indice CBR d'un matériau comportant 50 % de granulats bitumineux est généralement compris entre 40 et 60 (figure 4). Rappelons qu'il est courant de mesurer un indice CBR supérieur à 100 pour un granulat MG20 conventionnel.

Des essais triaxiaux ont été effectués afin de caractériser le comportement mécanique sous chargements cycliques. Les résultats (figure 5) de ces essais indiquent que les modules réversibles (M_r) d'un matériau contenant 50 % de granulats bitumineux sont semblables à ceux d'un matériau MG20 jugé faible. Des déformations permanentes (plastiques) notées en début d'essai caractérisent le comportement de ces matériaux. Ce constat incite à une certaine prudence quant à l'établissement d'une loi de comportement représentative des comportements sur chaussée. Des essais supplémentaires sont prévus afin d'évaluer la composante permanente et réversible de la déformation selon la masse volumique du matériau (conditionnement des échantillons). Ces essais devraient permettre d'établir une corrélation avec le comportement mesuré sur sections d'essais. Les premiers essais de déflexion FWD, effectués sur quelques sections, corroborent les résultats des essais triaxiaux montrant que les modules de déformation (E) évalués par rétrocalcul sont semblables à ceux d'un matériau de calibre MG20 (Route 281 et Autoroute 55).

Matériaux stabilisés aux liants hydrocarbonés

La stabilisation s'effectue généralement avec des émulsions de bitume à rupture lente ou du bitume moussé. L'émulsion CSS-1 est la plus utilisée. Le dosage en bitume et la teneur en eau requise avant l'ajout du liant sont déterminés à l'aide de la méthode de formulation LC 26-002 (12). La quantité de bitume ajoutée, exprimée en pourcentage, varie généralement de 1,8 % à 2,5 %, la moyenne étant 2,2 %. Le choix du liant est fonction, entre autres, des résultats des essais d'enrobage servant à évaluer la compatibilité entre le liant et le granulat.

Le gain de rigidité dû à la stabilisation a été évalué, notamment dans les cas des projets réalisés sur l'Autoroute 55 à Stanstead (1992) et de la Route 165 à Saint-Louis-de-Blandford (1994).

Le projet de l'Autoroute 55 comporte cinq planches d'essais (500 m/planche), chacune

Tableau 1. Suivis de performance

Route	Localité	Procédé, liant, épaisseur	Année des travaux
249	Saint-Élie-d'Orford	(1) 150 mm	1991
281	Saint-Raphaël	(1) 250 mm	1999
281	Saint-Raphaël	(2) Émulsion/ciment, 125 mm	1999
295	Squatec	(2) Émulsion/ciment sans chaux 125 mm	1998
295	Squatec (3 sections)	(2) Émulsion/ciment avec chaux 125 mm	1998
295	Squatec	(2) Émulsion/ciment avec chaux 125 mm	1997
117	Saint-Faustin	(2) Stabical, 125 mm	1996
117	Saint-Faustin	(2) Stabical, 110 mm	1996
117	Saint-Faustin	(2) Stabical, 150 mm	1996
117	Saint-Faustin	(2) CSS-1, polymère 150 mm	1996
117	Saint-Faustin (3 sections)	(2) CSS-1, 150 mm	1996
117	Saint-Faustin (2 sections)	(2) CSS-1, 200 mm	1995
117	Saint-Faustin (2 sections)	(2) CSS-1, 150 mm	1995
220	Bonsecours	(2) CSS-1, 100 mm	1990
	Chemin Alfred-Desrochers	(2) CSS-1, 100 mm	1991
165	Saint-Louis-de-Blandford	(2) CSS-1, 100 mm	1994
55	Standstead	(2) CSS-1, 150 mm	1992
		(2) SS-1, 150 mm	1992
		(2) CMS-2, 150 mm	1992
		(2) Bitume moussé, 150 mm	1992
10	Bromont	(2) Grave-émulsion, 150 mm	1995
269	Saint-Patrice-de-Beaurivage	(2) Grave Stabical, 100 mm	1993
10	Austin	(2) Stabical, 150 mm	1994
255	Saint-Joachim-de-Courval	(2) Stabical, 125 mm	1995
	Chemin Benoît	(2) CSS-1, 0,8 % à 1,6 % ciment	1998
50	Gatineau	(2) CSS-1, 1 % à 1,5 % ciment	1999
55	Omerville	(2) CSS-1, 0,8 % à 1,5 % ciment	1999
117	Saint-Faustin (2 sections)	(3) 200 mm MG20	1995
269	Saint-Patrice-de-Beaurivage	(3) 150 mm de MG20	1993
255	Kingsey Falls	(3) 150 mm de MG20	1994
10	Bromont	(3) 200 mm de MG	1995

diffère par le type de liant. Une section non stabilisée sert de section témoin. Les essais FWD réalisés à plusieurs périodes de l'année, entre la fin de la construction et 1994, ont permis d'évaluer les variations saisonnières de rigidité des matériaux. La détermination des modules de déformation (E) a été effectuée par rétrocalcul à l'aide du logiciel ELMOD (DYNATEST inc), basé sur la théorie des hauteurs équivalentes. Afin d'établir la comparaison la plus «juste» possible entre les différentes planches d'essais, aucune

correction de température n'a été apportée aux relevés. Le tableau 2 regroupe les valeurs moyennes des modules (E) pour chacune des planches d'essais à différents relevés et différentes températures du revêtement.

On constate que les valeurs de module (E) calculées sont semblables à celles fréquemment mesurées pour des matériaux granulaires de fondation dans des états de contraintes comparables. Les modules (E) pour tous les types de

Figure 4. Essais CBR, matériaux décohésionnés

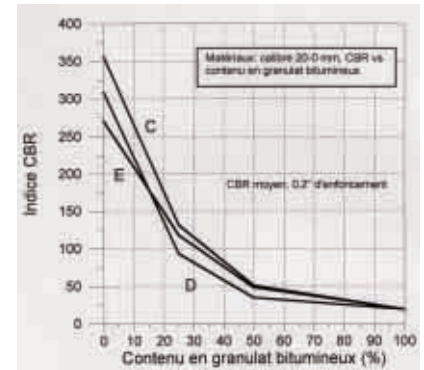
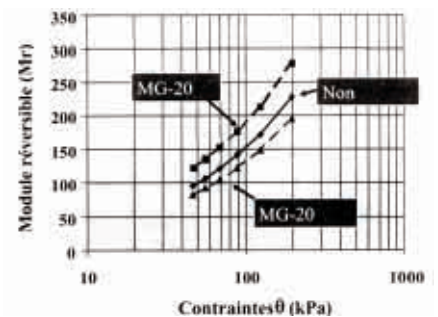


Figure 5. Essais triaxiaux, matériaux décohésionnés



matériaux sont généralement compris entre 400 et 700 MPa. Les valeurs (E) des matériaux stabilisés sont, en moyenne, 20 % plus élevées que celles des matériaux non stabilisés, ce qui représente un apport structural relativement limité.

Un mois après les travaux (octobre 92), les valeurs (E), sur la planche SS-1, sont semblables à celles des matériaux non stabilisés, ce qui relève une évolution lente du phénomène de cure (processus par lequel le matériau acquiert une plus grande cohésion). Le tableau 3 présente une comparaison sous la forme d'un rapport des modules entre les sections stabilisées et non stabilisées. L'augmentation de E est, tout au plus, de 40 %, ce qui est inférieur au pourcentage escompté. Sur une base annuelle, l'augmentation moyenne de E liée à la stabilisation est de l'ordre de 28 % pour les liants CMS-2 et le bitume moussé (B.M.), tandis qu'elle est de 15 % pour les émulsions de types SS-1 et CSS-1.

Tableau 2 : Module d'élasticité (MPa) sur les cinq planches, Autoroute 55.

Date	Temp. (°C)	S.L.	Temp. (°C)	B. M.	Temp. (°C)	CMS-2	Temp. (°C)	SS-1	Temp. (°C)	CSS-1
Octobre 92	5	513	5	726	5	668	5	542	0	635
Avril 93	20	248	3	356	3	355	3	346	5	350
Novembre 93	-2	399	-2	495	-2	497	2	461	2	430
Juin 94	22	541	22	582	22	594	22	530	25	484

S.L. : sans liant
 B.M. : bitume mousse
 Émulsions : CMS-2, SS-1, CSS-1.
 Temp. (°C) : température du revêtement bitumineux

Le projet de la Route 165 comporte deux sections (150 m/planche) ayant fait l'objet d'une stabilisation (100 mm) à l'aide d'une émulsion CSS-1. Les essais, effectués environ un mois après les travaux ainsi que une et deux années plus tard, ont permis de tirer des conclusions différentes de celles qu'on avait faites sur l'Autoroute 55. Pour les trois relevés, les analyses par rétrocalcul révèlent une forte contribution structurale de la couche stabilisée. Les valeurs moyennes des modules (16 points/planche) varient entre 631 MPa et 1000 Mpa, ce qui représente près de 50 % de plus que les valeurs calculées sur l'Autoroute 55.

Ces résultats mettent en évidence l'effet des conditions de mise en œuvre sur les propriétés des matériaux. Ces deux chantiers, réalisés dans des contextes géographiques semblables, se sont déroulés dans des conditions atmosphériques très différentes. Pour l'Autoroute 55, de fréquentes précipitations et de basses températures ont été enregistrées à l'automne 1992. Cela a vraisemblablement joué un rôle majeur en ce qui a trait à la cohésion qui se développe dans le matériau et aux propriétés mécaniques. Les résultats de carottage ont confirmé les résultats du FWD, puisque aucune carotte complète n'a pu être prélevée sur l'Autoroute 55, tandis que les six carottes prélevées sur la Route 165 ont présenté une excellente cohésion (100 % de récupération; collage complet avec le revêtement). Notons que le chantier de la Route 165 s'est déroulé durant l'été 1994 (juillet) et que le trafic a été dévié pendant la période de cure.

Ces deux projets montrent que les conditions atmosphériques pendant le chantier et, dans une moindre mesure, la compatibilité liant-granulats, ont un impact direct sur les propriétés structurales du matériau stabilisé. En d'autres termes, selon les conditions atmosphériques rencontrées, la stabilisation par l'ajout de liant hydrocarboné peut

donner une large gamme de modules (E), ce qui oblige le concepteur à poser certaines hypothèses au moment de la préparation du projet, notamment lors du dimensionnement structural.

Matériaux stabilisés aux liants mixtes

Une utilisation plus courante des liants mixtes a débuté vers 1994. Les premières études en laboratoire ont montré les effets bénéfiques liés à l'ajout d'une faible quantité de liant hydraulique. Par définition, un liant mixte comporte un liant bitumineux (émulsion de bitume ou bitume moussé) et un liant hydraulique (ciment ou chaux hydratée). Dans le cadre des travaux de stabilisation, le contenu en liant hydraulique représente moins de 1,5 % (rapport en masse) une fois incorporé au matériau à stabiliser.

Les principaux avantages liés à l'utilisation d'un liant mixte se résument ainsi :

- Diminution de la durée de la période de cure, le matériau acquérant plus rapidement une rigidité permettant de limiter les problèmes associés au déroulement d'un chantier.
- Augmentation des propriétés structurales des matériaux stabilisés, selon la quantité de ciment ajoutée.
- Amélioration des propriétés structurales des matériaux en conditions saturées.

Actuellement, trois modes d'ajout du liant hydraulique sont utilisés dans le cadre des travaux de stabilisation : à sec, avec coulis ou selon un procédé breveté.

Le premier mode consiste à épandre le liant sous une forme anhydre à l'aide d'un épandeur à vis hélicoïdale (photo 1) (capacité : environ 20 tonnes de liant). La quantité de liant est appliquée directement sur la surface granulaire par un ou plusieurs passages de l'équipement. La précision du dosage est de l'ordre de 10 %. Le soulèvement du liant (poudre) en présence de vent est un inconvénient. L'épandage sur une courte section et l'humidification de la surface permet de limiter ce problème. L'ajout du liant hydraulique s'effectue juste avant l'étape de la stabilisation au liant hydrocarboné.

- Le deuxième mode d'ajout est sous la forme d'un coulis composé d'eau et de ciment. Actuellement, au Québec, seul un équipement de marque Wirtgen est utilisé pour ce type de travaux (photo 2). Cet équipement permet de modifier le rapport eau/ciment (e/c) du coulis selon l'humidité des matériaux ou en vue de faciliter la dispersion du coulis dans le matériau selon la température ambiante. En général, le rapport e/c est compris entre 0,8 et 1,0 et peut varier entre 0,4 et 1,5 selon les besoins.
- Le troisième mode d'ajout fait l'objet d'un

Tableau3. Rapport des modules d'élasticité $E_{\text{stabilisé}}/E_{\text{planche non stabilisée}}$ (S.L.)

Date	BM/S.L.	CMS-2/S.L.	SS-1/S.L.	CSS-1/S.L.
Octobre 92	1.41	1.30	1.06	1.24
Avril 93	1.43	1.43	1.40	1.41
Novembre 93	1.24	1.25	1.16	1.08
Juin 94	1.08	1.10	0.98	0.89
MOYENNE	1.29	1.27	1.15	1.16

Photo 1. Épandage du ciment



Tableau 4. Taux d'épandage du ciment

Profondeur stabilisée (mm)	Liant hydraulique (kg/m ²)
250	7,6 (1,5 %)
200	6,1 (1,5 %)
150	4,6 (1,5 %)
150	3,1 (1,0 %)

Photo 2. Unité mobile de production de coulis de ciment, Wirtgen WM400



Photo 3. Centrale : liant STABICOL 90



brevet, comme celui du liant Stabicol 90 (photo 3). Le liant est fabriqué dans une centrale spécialement conçue, capable de produire environ 20 tonnes/h. Le liant hydraulique incorporé à une émulsion de bitume produit un liant plus dense ($\approx 1,3 \text{ g/cm}^3$), ce qui nécessite un système de pompage adapté pour permettre l'introduction du liant dans la chambre de malaxage de l'équipement de décohesionnement. Le délai admissible entre la fabrication et l'utilisation du liant est de l'ordre de trois à quatre heures. À l'intérieur de ce délai, aucun problème particulier n'a été noté dans des conditions normales d'utilisation.

Propriétés des matériaux traités aux liants mixtes

Des études en laboratoire, basées sur l'essai Marshall (4,10), ont permis de quantifier le gain de rigidité dû à la stabilisation avec un liant mixte. L'une d'entre elles (4) révèle une augmentation de l'ordre de 100 % de la stabilité en comparaison avec une stabilisation avec une émulsion CSS-1, lorsque le contenu en ciment est voisin de 1,5 % (tableau 5). Après immersion et plusieurs cycles de gel-dégel, le matériau traité au liant mixte conserve une stabilité plus élevée.

Quelques essais triaxiaux effectués sur des échantillons prélevés au chantier ont permis de préciser l'augmentation du module réversible du matériau stabilisé de même que l'évolution de ce paramètre pendant la période de cure. Comme

le montre la figure 6, après 28 jours de cure, le module réversible (M_r) stabilisation liant mixte d'un matériau traité avec un liant mixte est 3,3 à 6,6 fois plus élevé que celui du même matériau sans ajout de liant. Le mode de cure du matériau (air, étuve) ne semble pas influencer de façon significative la valeur du M_r . Ces résultats correspondent à ceux du site de la Route 281, qui comporte une section témoin (non stabilisée) et une section stabilisée avec un liant mixte. La figure 7 résume l'ensemble des essais FWD (16 points/planche) effectués quelques semaines après la fin des travaux. Les modules de déformation évalués par rétrocalcul sont, en moyenne, 2,2 fois plus élevés dans la couche retraitée au liant mixte.

L'ajout d'une faible quantité de ciment améliore de façon significative les propriétés mécaniques, surtout en conditions saturées. À titre d'exemple, la figure 8 montre l'augmentation du pourcentage de stabilité (Marshall) retenue (stab. humide/stab. sec) pour trois types de matériaux après l'ajout de 1,5 % de ciment. Le pourcentage de stabilité retenue augmente de plus de 50 % après l'ajout de 1,5 % de ciment. Dans plusieurs cas, on note que des ajouts en ciment de l'ordre de 0,5 % sont suffisants pour permettre d'atteindre la spécification de stabilité retenue, fixée à 70 %.

Des planches d'essais, construites sur la Route 117 en 1997, ont aussi mis en évidence l'effet du contenu en ciment sur la rigidité de la chaussée. La figure 9 montre les indicateurs structuraux D_0 et SCI mesurés à l'aide du déflectomètre FWD un an après travaux (août 1998).

Tableau 5. Stabilité Marshall, liant mixte vs CSS-1

Cycles de gel-dégel	Stabicol 90 (kN)	CSS1 (kN)
0	43,7 (3) **	21,9 (2)
7	43,8 (3)	27,0 (3)
14	40,8 (1)	27,6 (3)
Immersion	28	24,5 (3)
	35	21,2 (3)
	42	18,9 (3)

** Les valeurs entre parenthèses correspondent au nombre d'échantillons qui ont complété l'essai de dégradation par gel-dégel.

Figure 6 : Essais triaxiaux, stabilisation liant mixte

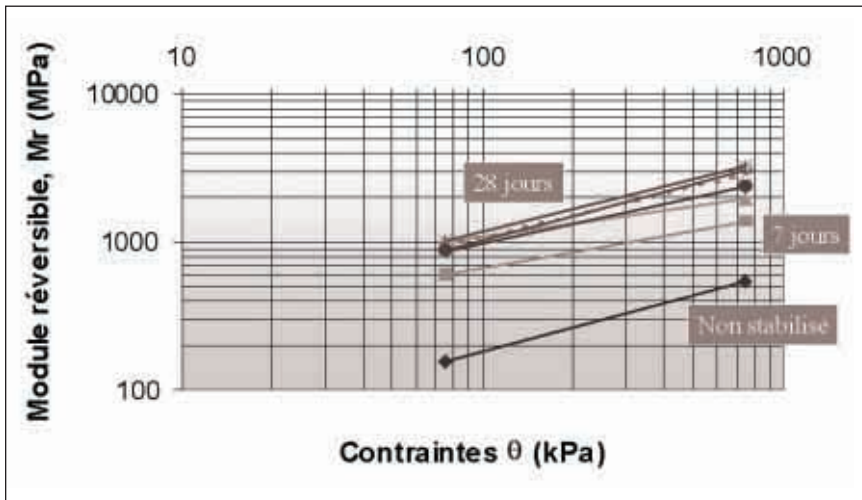


Figure 7 : Stabilisation liant mixte : 1,5 % ciment
Route 281

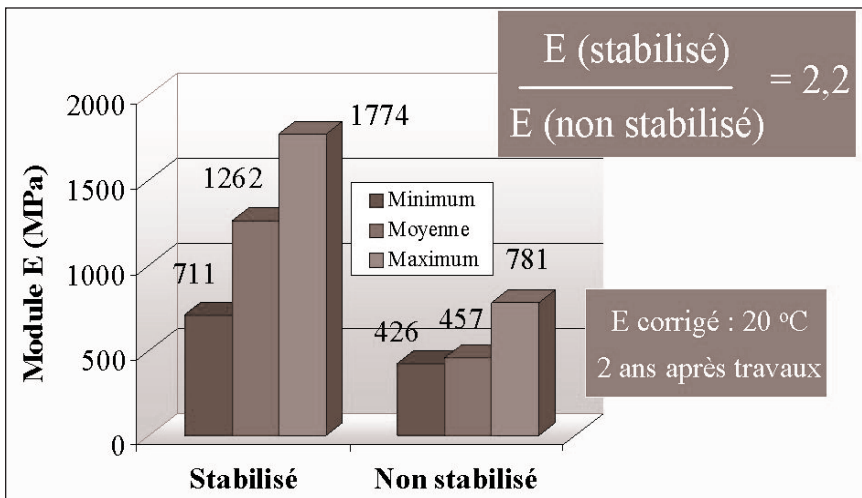
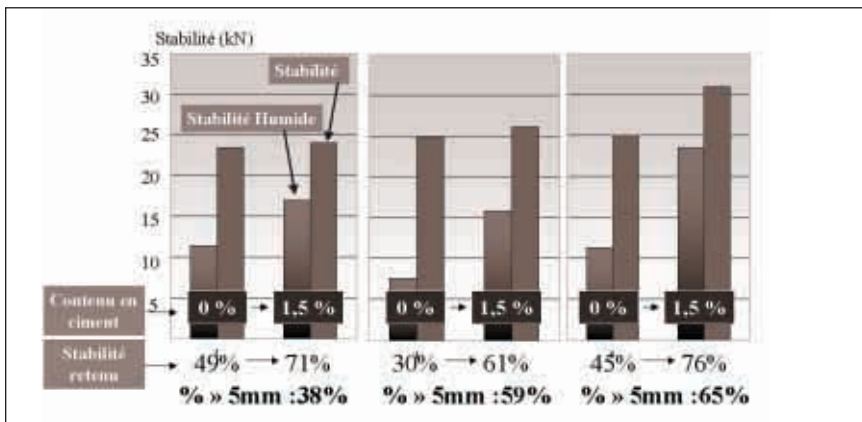


Figure 8 : Formulation.
Stabilisation liant mixte : 1,5 % ciment



L'épaisseur du revêtement est constante sur toutes les planches (100 mm). La décroissance des indicateurs structuraux avec l'augmentation du pourcentage de ciment (0,5 % à 2,0 %) est plus marquée entre 0,5 % et 1,5 % de ciment. À titre indicatif, l'augmentation du contenu en ciment de 0,5 à 1,5 % se traduit par une diminution de 13 % de la valeur D_0 . Une analyse par rétrocalcul révèle que les modules moyens (E) de la couche traitée sont respectivement, pour des teneurs en ciment de 0,5, 1,0 % et 1,5 %, de 869 MPa, 1029 MPa et 1152 MPa. À 2,0 % de ciment, le module E est similaire à celui calculé à 1,5 % de ciment, sans aucun gain significatif.

Des travaux expérimentaux, effectués sur la Route 340 à Saint-Polycarpe (11) et par la Ville de Montréal (fondations stabilisées en centrale (5)), ont montré que la mise en place des matériaux stabilisés avec des liants mixtes sur une épaisseur supérieure à 150 mm n'entraînait pas de problèmes particuliers. Le Ministère a aussi étudié les effets de l'épaisseur stabilisée au moyen de deux projets expérimentaux (Autoroutes 55, Omerville, et 50, Gatineau). La figure 10 montre clairement que, pour une teneur en ciment égale à 1,5 %, l'augmentation de l'épaisseur stabilisée (150 mm à 300 mm) se traduit par une baisse significative des déflexions (D_0) de l'ordre de 45 %. L'analyse par rétrocalcul a permis de caractériser la rigidité des couches stabilisées selon l'épaisseur traitée. Cette méthode de calcul permet l'établissement de lois de comportement mécanique des matériaux, selon l'épaisseur de la couche stabilisée et sa teneur en ciment. Ainsi, l'épaisseur du revêtement bitumineux est ajustée selon l'épaisseur stabilisée. Le cas de l'Autoroute 50, à Gatineau, montre que cette façon de faire permet d'optimiser la structure de chaussées selon le coût de chacune des étapes du projet.

Ainsi, sur la base des résultats de ces suivis, l'augmentation de l'épaisseur stabilisée avec un liant mixte constitue une approche valable. Divers essais visant à caractériser la cohésion et la compacité des matériaux stabilisés sont prévus dans le cadre de ces suivis.

Dimensionnement structural

L'ensemble des données provenant des divers suivis a permis d'établir des valeurs limites caractérisant

Figure 9 : Déflexion FWD , Route 117, stabilisation liant mixte, contenu en ciment variable

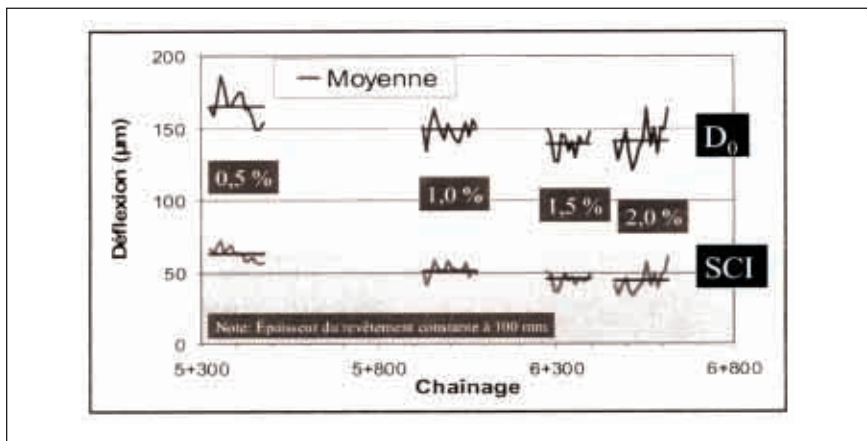
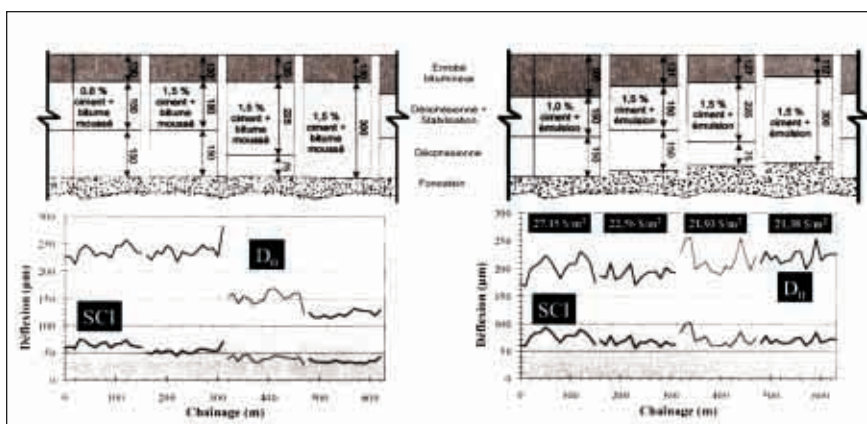


Figure 10 : Stabilisation liant mixte : épaisseurs variables Autoroutes 55, Omerville, et 50, Gatineau.



térisant les propriétés mécaniques des matériaux élaborés lors du retraitement en place d'une chaussée. L'intégration de ces valeurs aux méthodes de dimensionnement structural permet d'établir une base de comparaison avec les approches conventionnelles et ainsi d'optimiser le choix de l'intervention.

Le logiciel de dimensionnement structural des chaussées (DDL) mis au point au Ministère est une adaptation de la méthode AASHTO 1993 (6) aux conditions québécoises. Monté sur une plate-forme VISUEL BASIC, ce logiciel est relié à des bases de données (ACCESS) contenant les données atmosphériques de diverses stations météorologiques, les coûts unitaires et les lois de comportement des matériaux. Divers paramètres comme la fiabilité (risque) et le niveau de servi-

ce prévu sont proposés au concepteur. Le manuel de l'utilisateur, inclus dans le logiciel, explique le fondement de la méthode et le fonctionnement du logiciel.

L'intégration des caractéristiques de nouveaux matériaux dans la méthode de l'AASHTO exige qu'on fasse certaines hypothèses sur leur évolution dans le temps. La comparaison des résultats FWD provenant des sites d'essais avec les résultats des essais triaxiaux effectués en laboratoire est une approche à la fois prudente et représentative des propriétés des matériaux de chaussée. Les nombreux essais FWD effectués au cours des dernières années sur des chaussées «retraitées» et les modules calculés constituent une base de connaissance permettant d'établir une comparaison fiable avec la loi de comporte-

ment utilisée pour un matériau de calibre 0-20 mm (MG20) conventionnel (matériau de référence).

Divers paramètres ont été considérés pour établir des regroupements de matériaux stabilisés ayant des propriétés comparables en ce qui a trait à leur apport structural. Les propriétés structurales des matériaux, le type de liant et l'état de contrainte du matériau dans la chaussée (sous chargement) sont les principaux paramètres considérés. L'évolution des propriétés et leur variation saisonnière ont été considérées en établissant des valeurs moyennes et la variabilité des résultats. Cette approche a permis d'établir des lois de comportement pour les matériaux soit décohésionnés non stabilisés, soit stabilisés avec un liant hydrocarboné, soit avec un liant mixte (deux teneurs en ciment). Les lois de comportement, exprimées par la relation $M_r = K_1 \theta^{K_2}$, sont présentées à la figure 11. Selon la méthode AASHTO, ces lois de comportement correspondent à des coefficients structuraux (α_i) généralement compris entre les valeurs limites présentées au tableau 6.

Carottage

Dans le but d'évaluer la cohésion des matériaux stabilisés et l'efficacité du collage avec le revêtement bitumineux, un carottage a été effectué à divers moments après la fin des travaux. Notons qu'un mauvais collage entre l'enrobé et la fondation stabilisée favorise la formation de fissures par fatigue du revêtement. Au total, une centaine de spécimens ont été prélevés sur onze projets, dont six comportaient l'utilisation de liant mixte. Comme le montre la figure 12, on note, indépendamment du type de liant, que dans environ 12 % des cas le matériau ne présente aucune cohésion, ou une cohésion insuffisante pour résister aux efforts transmis lors du carottage. Avec les liants mixtes, le nombre d'échantillons affichant une excellente cohésion représente 52 % des prélèvements, tandis qu'il représente 44 % pour les liants hydrocarbonés.

À court terme (six mois et moins), le pourcentage d'échantillons affichant une excellente cohésion n'est que de 21 %. Les carottages effectués un an et plus après les travaux, sur d'autres sites, ont une excellente cohésion dans plus de 60 % des cas. Ces résultats traduisent

Tableau 6 : Coefficients structuraux (a_i) des matériaux de chaussées

Matériaux	Coefficient structuraux (a_i)
MG20	0,11 à 0,17
Matériau décohesionné + stabilisation émulsion	0,14 à 0,19
Matériau décohesionné + stabilisation liant mixte: 0,8 % ciment	0,20 à 0,25
Matériau décohesionné + stabilisation liant mixte 1,5 % ciment	0,25 à 0,29

Figure 11 : Lois de comportement des matériaux de chaussée

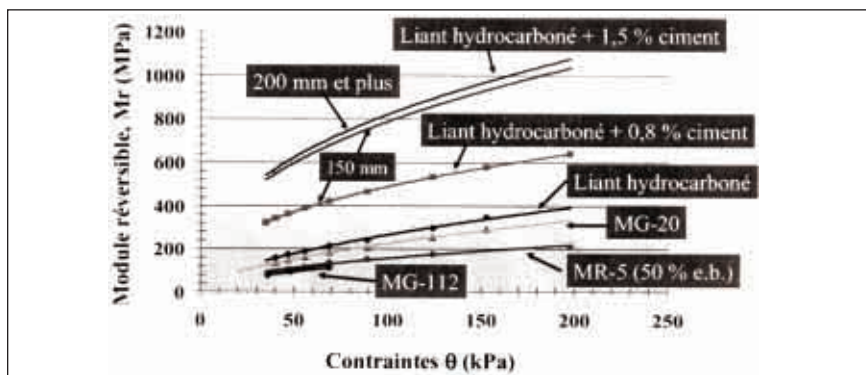
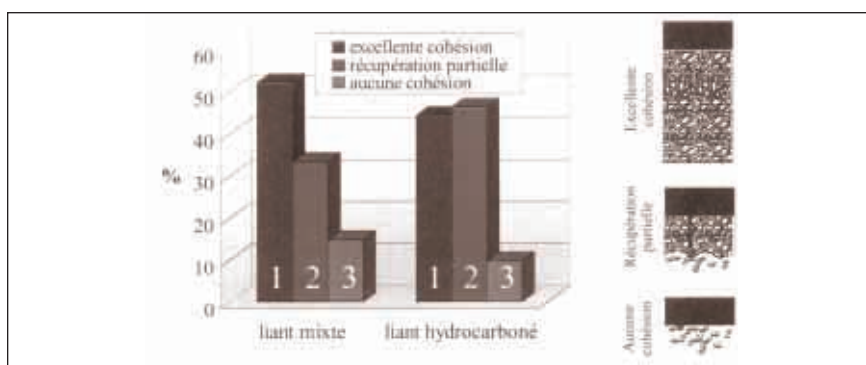


Figure 12 : Carottage



une certaine évolution de la cohésion des matériaux stabilisés au cours des premières années. Ce point sera précisé en effectuant du carottage de façon périodique sur certains sites de suivis.

L'analyse des carottages indique aussi que la cohésion des matériaux stabilisés est influencée par les conditions atmosphériques pendant les travaux de stabilisation. Il existe une relation entre le manque de cohésion observé sur certains sites et l'excès d'humidité des matériaux avant la stabilisation. En ce qui a trait au collage avec le revêtement, les données recueillies ne permettent pas de dégager une tendance claire, qui expliquerait les résultats. On observe cependant un meilleur collage sur les projets où la circulation

a été déviée pendant la période de cure. Notons que l'épandage de gravillons avec un taux trop élevé peut favoriser le décollement avec le revêtement.

Divers procédés ont été utilisés pour favoriser le collage avec le revêtement bitumineux, comme l'épandage de divers types d'émulsion à des taux variables (0,2 l/m² à 1,1 l/m²), avec parfois un gravillonnage (environ 7 kg/m²). En présence d'un liant d'accrochage, 86 % des carottes prélevées affichent un bon collage avec le revêtement. Notons que des résultats similaires ont été notés sur les sites où aucun liant n'avait été ajouté.

Principaux résultats des suivis de performance

Fissuration

La caractérisation de la fissuration par la longueur totale fissurée et par le niveau de sévérité est une méthode efficace pour caractériser la performance d'une chaussée et en évaluer le comportement futur.

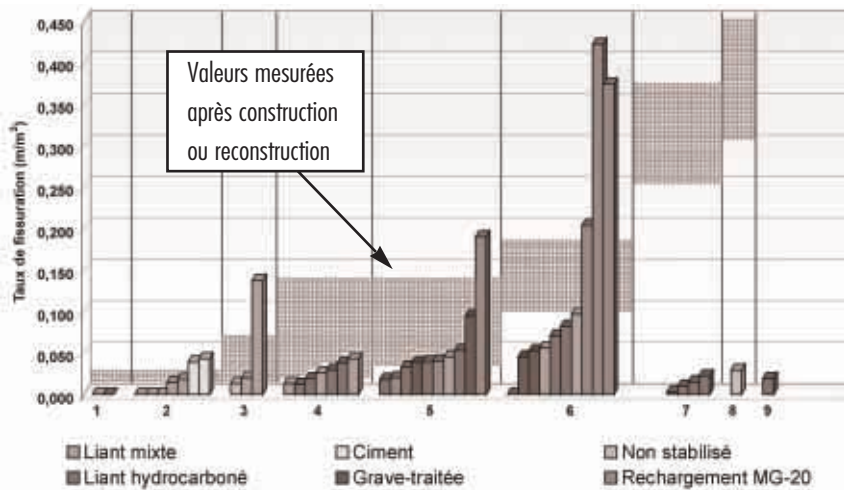
La figure 13 donne un aperçu du taux de fissuration (m/m²) mesuré sur diverses sections d'essais, un an à neuf ans après des travaux de retraitement en place. Chaque colonne représente une section d'essai. Les données présentées se rapportent aux trois options en matière de retraitement en place et à divers produits commerciaux. Les chaussées concernées sont situées dans des contextes géographiques présentant des types de trafics différents. La caractérisation des chaussées avant travaux indique que la majorité des sections affichaient un niveau de dégradation élevé. Les taux de fissuration mesurés avant les travaux varient de 0,264 m/m² à 1,155 m/m² (moyenne 0,441 m/m²) et plus de 20 % de la surface présentait des fissures multiples et du carrelage.

Les taux de fissuration présentés sont comparés à ceux mesurés sur des sections de routes ayant fait l'objet d'une construction ou de reconstruction au cours des neuf dernières années (zone hachurée, figure 13).

De façon générale, les taux de fissuration des chaussées ayant fait l'objet d'un retraitement en place se comparent avantageusement à ceux des chaussées conventionnelles. Cette observation s'applique à toutes les options, sauf à l'option «décohesionnement+rechargement». Dans ces derniers cas, les fissures observées coïncident avec des fissures présentes avant les travaux et dues à un comportement gélif différentiel des sols d'infrastructure. Ce point met en évidence les limites d'application de la technique.

En moyenne, les sections comportant la stabilisation des matériaux affichent un taux de fissuration voisin des valeurs minimales observées sur chaussées conventionnelles (reconstruction). Après cinq et six ans, les taux de fissuration sont respectivement de 0,035 m/m² et 0,052 m/m².

Figure 13 : Retraitement en place: fissuration



Pour l'ensemble des sites d'essais, on mesure un taux de fissuration moyen, après cinq ans, de 0,056 m/m², ce qui est nettement inférieur au taux couramment mesuré sur des sections ayant fait l'objet d'un recouvrement bitumineux conventionnel. À titre indicatif, il n'est pas rare de mesurer, après la pose d'un enrobé, un taux de fissuration supérieur à 0,20 m/m² après seulement deux ans.

Les résultats de l'ensemble des suivis concordent : l'utilisation de liants mixtes contenant une faible quantité de ciment, soit moins de 1,5 %, n'entraîne pas la formation de fissures de retrait ni de fissuration prématurée de la chaussée. Par contre, des projets expérimentaux avec un ajout cimentaire de 3,5 % et 8,0 % (9) ont clairement révélé, à court terme, des indices de retrait important, par la formation de fissures transversales (figure 13, Ciment).

Sur plusieurs sites, on note la présence de fissures longitudinales situées au centre de la chaussée ou au centre d'une voie. Plusieurs observations (photos 4 et 5) indiquent que ces fissures sont indépendantes du procédé et plutôt liées aux conditions de mise en œuvre du revêtement bitumineux (joints longitudinaux ou ségrégation).

Les faibles taux de fissuration liés à la technique de retraitement s'expliquent, d'une part, par l'élimination du patron de fissures sur une épaisseur de l'ordre de 300 mm, qui permet une certaine homogénéisation des matériaux lors du décohéssionnement de la chaussée. Les faibles taux (< 0,03 m/m²) mesurés sur des sections

non stabilisées, même après neuf ans, confortent cette hypothèse. D'autre part, les faibles taux mesurés au cours des cinq premières années sur les sections stabilisées portent à croire que l'épaisseur cumulée de la couche stabilisée et du revêtement contribue à limiter la formation de fissures, notamment les fissures transversales causées par le retrait thermique des matériaux liés. Ce point mérite une attention particulière et devra être quantifié plus précisément, puisqu'il s'agit d'un avantage non négligeable dans notre climat.

La profondeur moyenne des ornières pour l'ensemble des sites est présentée à la figure 14. Sur tous les sites de suivi, les valeurs mesurées renvoient à des ornières à grand rayon. Les valeurs sont en général voisines ou inférieures aux valeurs mesurées (zone hachurée) sur des chaussées neuves (construction ou reconstruction). Sur l'ensemble des sites, le taux d'ornièrage est inférieur à 0,7 mm/an, ce qui se compare avantageusement aux valeurs mesurées sur le réseau. Aucune relation claire n'a été établie entre la profondeur des ornières et le procédé de retraitement choisi. On constate, compte tenu du fait que la plupart des projets ont fait l'objet d'un dimensionnement structural adapté aux conditions locales (trafic et sols), que l'évolution de l'ornièrage correspond aux valeurs prévues.

La présence de zones plus instables (excès d'humidité ou de liants) observées pendant le déroulement de certains projets explique, dans quelques cas, un ornièrage localement plus important et prématuré.

Qualité de roulement

En ce qui a trait au confort au roulement, l'ensemble des données recueillies au cours des premières années après les interventions ne permet pas d'établir un lien clair entre le confort au roulement et un paramètre lié au retraitement. La qualité de roulement, exprimée par l'indice IRI (1 valeur /100 m), intègre l'ensemble des distorsions du profil, sans préciser et ni situer la cause de l'inconfort. Néanmoins, on mesure une faible augmentation annuelle de l'indice IRI moyen par site, de 0,07, ce qui est similaire au taux de dégradation (IRI/an) d'une chaussée flexible neuve. En fait, l'uni au cours des premières années suivant les travaux est fortement lié à celui atteint lors des travaux.

Sur les sections affichant localement des comportements gélifs plus marqués avant travaux, on relève une augmentation moyenne de l'indice IRI de 0,14 IRI/an, accompagnée, au cours des premières années, de fissures sévères (figure 15). Il n'est pas rare de mesurer localement, sur ces sections, entre les indices IRI estival et hivernal, un différentiel supérieur à 2,0 après seulement deux hivers.

En ce qui concerne le comportement de la chaussée à proximité de ponceaux ou traverses affichant un comportement différentiel l'hiver, le retraitement en place se traduit par une atténuation du phénomène au cours des premières années suivant les travaux. Selon l'intensité du soulèvement, on trouve des dégradations occasionnant une diminution marquée de la qualité de roulement entre trois et cinq ans après les travaux (7). Ces observations mettent en évidence les limites de la technique de retraitement en place pour atténuer l'évolution des dégradations dues au comportement gélif différentiel des sols supports.

Déroulement des travaux

- La réalisation d'une étude préliminaire comprenant la détermination de l'épaisseur du revêtement (1 mesure /250 m/voie) et de la nature des matériaux de fondation (1/500 m) permet généralement une estimation acceptable de la qualité des matériaux après décohéssionnement. La réalisation de fenêtres d'observation avec les équipements servant au décohéssionnement, de rele-

Photo 4 : Fissure longitudinale, centre de la chaussée (Route 165)



Photo 5 : Fissure longitudinale, centre de la voie (Route 255)



vés géoradar et de carottages supplémentaires sont nécessaires lors de projets d'envergure et lorsqu'il y a des variations importantes dans la nature et l'épaisseur des matériaux de la chaussée.

- Depuis le début des années 90, on observe que le décohésionnement de la chaussée entraîne la formation de grosses particules de revêtement bitumineux. Ces particules bitumineuses, dont la dimension excède 100 mm, sont fréquentes lors du décohésionnement de chaussées fissurées par carrelage. Ce phénomène ne semble pas avoir de rapport avec le type d'équipement. Un contrôle rigoureux au chantier et l'enlèvement manuel de ces particules s'avèrent nécessaire, la présence d'une barre d'arrêt en bon état dans la chambre de malaxage, la vitesse et le sens de rotation du baril, la vitesse d'avancement de l'équipement sont des paramètres qui ont une influence sur la formation de grosses particules.
- La réalisation de planches de référence au début du chantier est une pratique courante. Cette démarche permet, entre autres, de préciser la séquence de compactage et de valider les résultats de la formulation. Signalons l'importance d'étalonner adéquatement les appareils servant au contrôle de la compacité.
- La mise en place et le compactage final de

matériaux stabilisés demandent une attention particulière pendant le déroulement des travaux. C'est pratique courante d'atteindre le profil final juste avant le début de la stabilisation afin de limiter les corrections de profil après l'ajout du liant. Cette étape est importante et dépend étroitement de la minutie de l'opérateur de la niveleuse. L'installation de repères de nivellement (1/20 m) est recommandée. Les ajustements du profil après stabilisation sont limités, compte tenu de l'évolution des propriétés des matériaux pendant la cure et du respect de l'épaisseur de stabilisation prescrite.

- Sur les projets nécessitant la stabilisation des matériaux, il est recommandé de dévier la circulation pendant la période de cure, notamment pendant une période minimale de 24 heures suivant le compactage. Le problème est plus important en présence d'un trafic élevé et de fortes précipitations. La réparation des zones endommagées au moyen d'un enrobé à chaud et la réduction de la vitesse de circulation sont les principaux moyens de limiter ce problème.

Conclusion

Le retraitement en place des chaussées est une technique de réfection extrêmement efficace. Les performances évaluées dans le cadre de suivis de performance depuis 1991 témoignent d'un comportement équivalent à celui observé sur des chaussées «neuves» (construction et reconstruction).

Des résultats satisfaisants ont été observés pour les trois procédés de retraitement en place. Les faibles taux de fissuration et d'ornièrage mesurés indiquent que la technique peut être adaptée à différentes problématiques. Cependant, l'évolution rapide des dégradations dans des secteurs plus gélifs met en évidence les limites de la technique, qui ne doit être utilisée en présence de gonflements hivernaux significatifs d'origine profonde.

Le guide technique *Retraitement en place des chaussées* (8) décrit les principaux cas qui se prêtent au retraitement en place. Les dégradations dont l'origine se situe dans la partie supérieure de la chaussée constituent les cas les plus propices, par exemple: les fissures transversales mul-

Figure 14. Retraitement en place: ornièrage

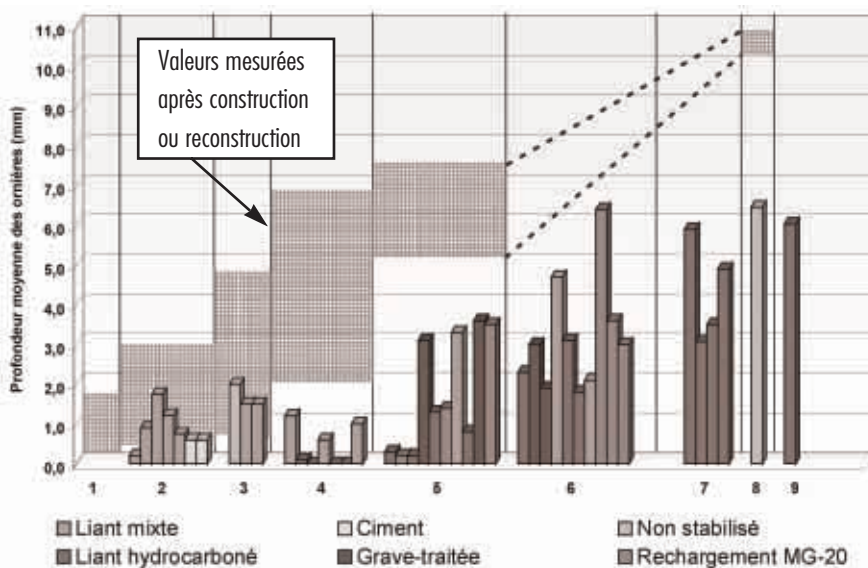
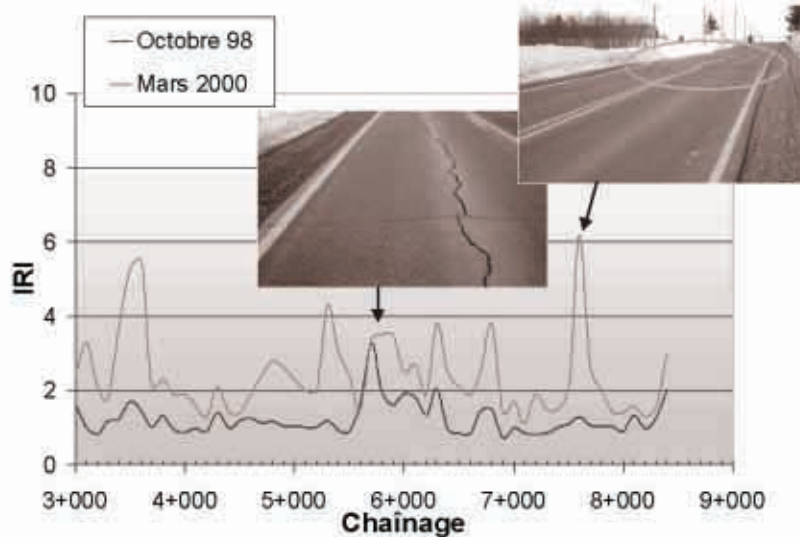


Figure 15 : Évolution de la qualité de roulement retraitement en place, Route 281, stabilisation liant mixte, secteurs gélifs



tiples ou soulevées, les fissures liées à la fatigue du revêtement telles les fissures longitudinales multiples accompagnées de carrelage dans le sentier des roues.

Les cas dits propices au retraitement en place correspondent à une problématique fréquemment observée sur le réseau routier québécois. Ce fait, associé aux performances satisfaisantes mesurées sur les diverses sections suivies, met en évidence le potentiel d'utilisation élevé de cette technique dans notre contexte. Les résultats de cette étude permettent de tirer certaines conclusions quant aux domaines d'application des différents procédés.

- Le procédé décohésionnement+revêtement a un potentiel d'utilisation plus élevé sur les routes faiblement sollicitées, où on trouve généralement moins de 100 véhicules lourds/jour/voie. Pour des débits plus élevés, le revêtement bitumineux doit être beaucoup plus épais, ce qui rend le procédé moins attrayant sur le plan économique.
- Le procédé décohésionnement+rechargement s'applique presque exclusivement en milieu rural, à des travaux comportant des terrassements, des modifications de profils ou des élargissements de chaussée (ex: ajout d'une voie). L'utilisation de ce procédé pour atténuer les effets du gel provenant des sols supports, notamment au droit de traverses, est

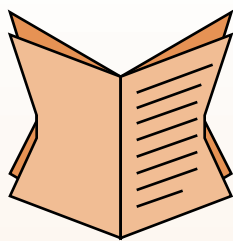
dans l'ensemble inefficace et se traduit par une remontée rapide des principales fissures ainsi qu'une distorsion significative du profil au cours des premiers hivers. En présence d'une problématique liée au gel plus généralisée et moins sévère, caractérisée par une ouverture hivernale des principales fissures inférieure à 5 mm, l'utilisation de ce procédé (rechargement 200 mm et plus) donne généralement des performances jugées acceptables.

- Le procédé faisant appel à la stabilisation par l'ajout de liant hydrocarboné ou mixte présente un potentiel d'utilisation élevé dans divers contextes. L'apport structural lié à la stabilisation permet d'adapter la technique à de nombreux types de trafic, tout en limitant le rehaussement du profil. On note que le gain structural résultant d'une stabilisation avec un liant hydrocarboné varie davantage par rapport au traitement avec des liants mixtes. Les mesures de déflexion effectuées sur divers sites indiquent que l'ajout d'un liant mixte se traduit par un apport structural significatif et permet la stabilisation sur une épaisseur supérieure à 150 mm. Ces caractéristiques confèrent à ce procédé un potentiel d'utilisation plus élevé pour les routes fortement sollicitées. Ces conclusions ont été prises en considération dans l'établissement des lois de comportement des matériaux stabili-

sés ainsi que pour leur intégration à la méthode de conception utilisée au Ministère.

Références :

1. *Guide pour évaluer la performance des chaussées* (1995). Gouvernement du Québec, ministère des Transports, Service des chaussées.
2. Bergeron, G. et al. (1999). «L'utilisation des matériaux recyclés dans les chaussées : caractérisation, exigences techniques et contrôle», Congrès annuel de 1999 de l'Association des transports du Canada, Saint-Jean (Nouveau-Brunswick).
3. Bergeron, G. et Martineau, B. (1995). «Réutilisation des résidus de béton bitumineux», 30^e Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes, tome 1.
4. Beaudoin, M. et Langlois, P. *Retraitement en place avec le liant Bitume/ciment Stabical* (1994). N/D, 6.2.4-93.6-441, Rapport MTQ.
5. Lupien, C. et al. (1997). Évaluation de la performance de 40 kilomètres de chaussées réhabilitées avec des matériaux recyclés et stabilisés en centrale», 32^e Congrès annuel de l'AQTR, tome 2.
6. *Guide for Design of Pavement Structures* (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-055-2.
7. D'Amours, C. et Bergeron, G. (1997). «Retraitement en place : chemin Alfred-Desrochers et Route 249- Suivi de performance 1991-1995». 32^e congrès de l'AQTR, tome 2.
8. Guides et manuels techniques : *Retraitement en place des chaussées* (1996), Laboratoire des chaussées, ISBN 2-550-31030-6.
9. Thébeau, D. (2000). «Retraitement en place de la chaussée et stabilisation au ciment sur le chemin Benoit», Routes et transports, AQTR, 29 (1), Hiver 2000, p 28-30.
10. *Utilisation du bitume moussé pour la stabilisation d'un revêtement bitumineux décohésionné et malaxé avec les granulats de la fondation supérieure avec ajout de ciment «Portland» ou de chaux hydratée* (1994). Rapport produit pour le ministère des Transports du Québec dans le cadre du Programme d'aide à la recherche-développement, Laboratoire de béton ltée, 260 p.
11. Proteau, Marc et al. (1997). *Étude des caractéristiques mécaniques et de la capacité structurale de chaussées recyclées par le procédé de retraitement en place : rapport final*
12. Ministère des Transports du Québec. Méthode d'essai LC 26-002 «Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion» (mise à jour du 98-12-15), Recueil des méthodes d'essai LC (Laboratoire des chaussées), Les Publications du Québec, ISBN 2-551-17912-2.



Évaluation par simulation informatique du comportement dynamique de certains ensembles de véhicules permettant d'établir leurs niveaux de sécurité

B. Falah et M. Tennich, MechaSim inc.

Le présent rapport traite des simulations se rapportant à trois nouvelles configurations de véhicules lourds que le Service de la sécurité routière et ferroviaire du ministère des Transports du Québec envisage, à la demande de l'industrie, d'analyser en vue de l'éclairer sur les changements éventuels à apporter à la réglementation en vigueur. Le rapport décrit les phases suivantes : une première étape est consacrée à une description générale des bases sur lesquelles reposent les différents modèles mathématiques associés aux six configurations simulées. Une seconde étape décrit les différents indices retenus pour l'analyse des performances dynamiques des différentes configurations de véhicules. Enfin, une dernière étape concerne les résultats des simulations à partir des modèles mathématiques développés en fonction des configurations retenues. Ces résultats et analyses sont divisés en trois parties distinctes. Chaque partie traite de la comparaison des performances dynamiques de la configuration actuellement en service à celle proposée comme une configuration nouvelle et supposément capable de donner de meilleures performances.

Mieux s'entendre avec le bruit routier Ministère des Transports du Québec

Le bruit produit par la circulation routière a envahi l'espace urbain au cours des dernières décennies. Cet envahissement progressif a entraîné une détérioration marquée de la qualité de l'environnement sonore. Au Québec, la population et les acteurs du milieu municipal et du ministère des Transports s'inquiètent de plus en plus des effets indésirables du bruit routier. Il faut chercher des moyens permettant de réduire les effets négatifs du bruit sur notre qualité de vie.

La présente brochure contient des renseignements sur le bruit produit par la circulation routière et sur la gêne qu'il entraîne pour les personnes habitant près des routes et des autoroutes. Elle contient également des explications sur la perception du bruit par l'oreille humaine et sur la mesure de celui-ci. Enfin, elle donne un aperçu des moyens préconisés par le ministère des Transports du Québec pour prévenir et atténuer le bruit routier.

Sécurité routière – Principales actions du ministère des Transports du Québec 1999-2000

Ministère des Transports du Québec

Le ministère des Transports du Québec et la Société de l'assurance automobile du Québec ont élaboré la Politique de sécurité dans les transports 1995-2000 – volet routier, en collaboration avec les partenaires externes les plus directement intéressés, soit les services policiers, les associations de transport et les municipalités. La Politique, rendue publique en 1995, présente 30 enjeux sur lesquels doivent porter les efforts visant à améliorer la sécurité routière. L'objectif premier du ministre des Transports était de réduire le risque associé aux accidents, en mettant en œuvre des mesures permettant d'abord de les prévenir et, ensuite, d'en réduire la gravité.

Pour faire suite à cette politique, le Ministère a élaboré un plan d'action en matière de sécurité routière. Les mesures mises en œuvre par le Ministère pendant l'année financière 1999-2000 sont présentées dans le document. Elles découlent de la Politique 1995-2000, de même que du plan d'action. Elles ont porté à la fois sur l'amélioration de l'infrastructure, le transport des personnes et des marchandises, les véhicules hors route et l'environnement socio-économique.

Parutions récentes

CONGRÈS CONFÉRENCES



Activité	Lieu et date	Organisation	Renseignements
7th World Congress on Intelligent Transport Systems	Du 6 au 9 novembre 2000 Turin, Italie	ITS America et autres	Mme Kip Stacy Prots Tél. : (202) 484-4542 Télec. : (202) 484-3483 Internet : www.itsa.org http://www.torino2000.itscongress.org
Eighth Joint Conference on Light Rail Transit	Du 11 au 15 novembre 2000, Dallas (Texas)	American Public Transit Association (APTA)	M. David R. Phelps Tél. : (202) 898-4085 Télec. : (202) 898-4019 Courriel : dphelps@apta.com
INFRA-EXPO 2000 <i>La saine gestion des infrastructures urbaines, une responsabilité à partager !</i>	Du 13 au 15 novembre 2000, Laval (Québec)	CERIU, AICQ, AIMQ	Télec. : (514) 848-7031 Internet : www.ceriu.qc.ca
42nd Annual Research and Policy Forum <i>Transportation Research at the Turn of the Century</i>	Du 28 novembre au 1 ^{er} décembre 2000, Annapolis (Maryland)		Tél. : (202) 879-4701
Transportation Research Board 80th Annual Meeting	Du 7 au 11 janvier 2001 Washington (DC)	Transportation Research Board	Mme Rosa Allen Tél. : (202) 334-2935 Télec. : (202) 334-2003 Courriel : rallen@nas.edu Internet : http://www4.nationalacademies.org/trb/annual.nsf
Geosynthetics Conference 2001	Du 12 au 14 février 2001, Portland (Oregon)	Industrial Fabrics Association International	North American Geosynthetics Society Geosynthetic Materials Association Mme Janet Schneider Tél. : (651) 225-6959 Télec. : (978) 945-2654 Courriel : jmschneider@ifai.com

INNOVATION TRANSPORT

Le bulletin scientifique et technologique INNOVATION TRANSPORT s'adresse au personnel du ministère des Transports et à tout partenaire des secteurs public et privé qui s'intéresse à ce domaine.

Il est le reflet des grands secteurs du transport au Québec : le transport des personnes, le transport des marchandises, les infrastructures et l'innovation. Il traite des enjeux importants, présente des projets de recherche en cours de réalisation ou terminés, de même que de l'information corporative.

INNOVATION TRANSPORT entend diffuser les résultats de travaux de spécialistes et d'expérimentations, les comptes rendus des activités de veille et de transfert technologiques, ainsi que des activités réalisées pour garantir le maintien d'une expertise de pointe.

Les textes publiés dans le bulletin INNOVATION TRANSPORT reflètent uniquement le point de vue de leurs auteurs et n'engagent en rien le ministère des Transports.