

B U L L E T I N

Innovation

TRANSPORT

Bulletin Innovation Transport

Numéro 34 • Janvier 2009



Table des matières

Québec 511 Info Transports : Un nouveau service d'information aux usagers de la route	3
Utilisation de barres d'armature en matériaux composites de polymère renforcé de fibres de verre plutôt que de barres d'acier dans une chaussée en béton armé continu	7
La caractérisation des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de méthylène	24
Recherche sur le statut de paysage humanisé au Québec	36

Québec 511 Info Transports : Un nouveau service d'information aux usagers de la route

Par Josée Séguin et François Béland, Direction des communications

Le ministère des Transports du Québec lançait en octobre dernier son tout nouveau service d'aide à la planification de déplacements efficaces et sécuritaires sur le réseau routier québécois : Québec 511 Info Transports. Communément appelé Québec 511, ce service s'inscrit dans un mouvement nord-américain de renseignements en matière de transport par la mise en place d'un numéro de téléphone abrégé 511 déjà disponible dans plusieurs administrations ou États américains et une province canadienne, soit la Nouvelle-Écosse.



Ce portail intégré et multimodal a pour but de faciliter l'accès aux renseignements sur les transports, et ce, tant par téléphone que sur le Web via une carte interactive, permettant ainsi aux usagers de la route de mieux planifier leurs déplacements partout au Québec. L'information provient du ministère des Transports du Québec ainsi que d'autres organismes, telle la Société des traversiers du Québec (STQ). Elle porte notamment sur : les conditions routières hivernales, les travaux routiers, les incidents majeurs, les alertes météo (SMOG), l'horaire des traversiers et le temps d'attente aux postes frontaliers. Dans le site Web, cette liste est enrichie des images provenant des caméras de circulation, des services offerts dans les haltes routières, et bien plus!

Le déploiement de Québec 511 Info Transports a été rendu possible grâce à la participation du ministère des Transports du Québec au Consortium 511 dirigé par la Société des systèmes de transport intelligents du Canada (STI Canada), pour la réservation du numéro 511, et au rôle de leader du Ministère dans le développement d'applications liées aux systèmes de transport intelligents sur le territoire québécois.

Des modes de consultation pour tous les goûts!

Que ce soit à l'aide d'un assistant numérique de poche (par exemple, Blackberry^{MD}), au moyen du téléphone ou en ligne, les services varient selon le mode de consultation choisi, mais ceux-ci sont toujours d'actualité et le plus à jour possible.

Quebec 511 Mobile (www.quebec511.gouv.qc.ca/mobile) est un mode d'accès par assistant numérique de poche à divers renseignements sur l'état du réseau routier québécois. Il est compatible avec les principales technologies sur le marché (Blackberry^{MD}, Palm^{MD} et Microsoft Windows CE^{MD}) et ne requiert aucun logiciel particulier, sauf un navigateur Internet puisqu'il utilise le langage HTML.

INFO TRANSPORTS
quebec511.gouv.qc.ca

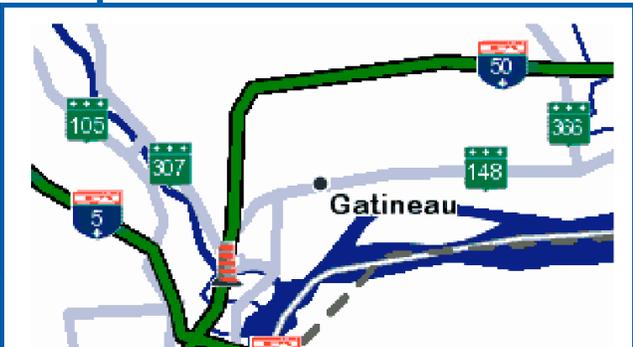


Québec 511 mobile
English



Le cellulaire tenu en main
au volant : **interdit!**

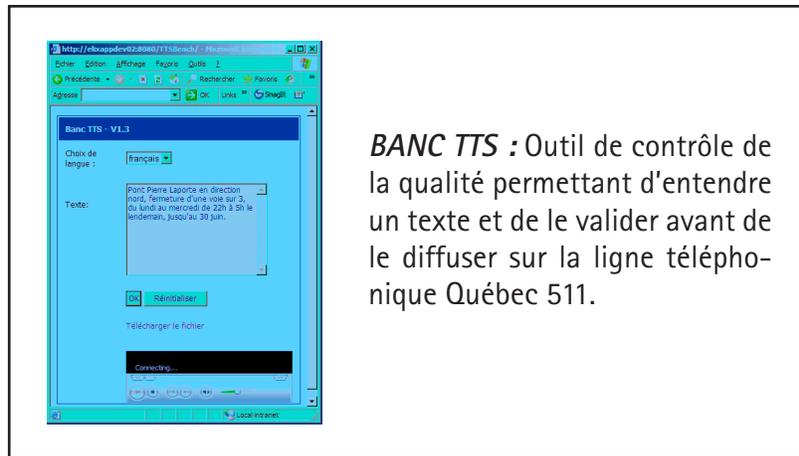
- [Avertissements](#)
- [État du réseau](#)
- [Caméras de circulation](#)
- [Conditions d'utilisation](#)



[Nord] [Sud] [Est] [Ouest] [-] [+] [Accueil]
[Retour]

La représentation cartographique de l'état du réseau est générée au moyen de la technologie MapServer^{MD}.

Conçu par le ministère des Transports du Québec, en collaboration avec son partenaire Bell, le service téléphonique Québec 511 Info Transports intègre une technologie de pointe permettant l'uniformisation de l'information diffusée. Le système de transfert automatisé du texte à la parole (TTS : *text-to-speech*) permet de s'assurer que l'information consultée sur le site Web du Ministère est la même que celle diffusée par le système téléphonique. Ce service fonctionne de façon conviviale et simple, soit par la reconnaissance vocale, et permet aussi à l'utilisateur de demander des renseignements en utilisant le clavier de son téléphone. Il est possible de faire une demande relative à un trajet entre deux villes, par numéro de route ou d'autoroute, ou à un accès précis, tel un pont, un poste frontalier ou un traversier. Dans le cas d'une demande portant sur un itinéraire donné, le système automatisé vous donne une estimation de la distance à parcourir.

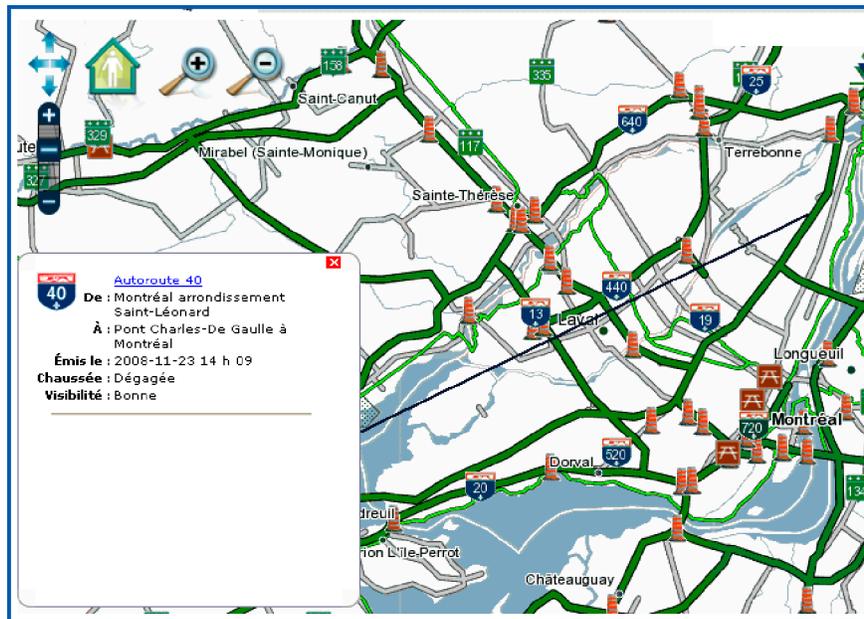


BANC TTS : Outil de contrôle de la qualité permettant d'entendre un texte et de le valider avant de le diffuser sur la ligne téléphonique Québec 511.

Québec 511 Web met à la disposition des internautes une variété de renseignements dans le domaine des transports, mais la section qui est sans aucun doute la plus consultée est *État du réseau routier en direct*. Cette section réunit sur une carte interactive, présentée par région ou disponible en format texte par numéro de route ou d'autoroute, toute l'information relative au réseau routier au moment de la consultation, permettant ainsi une planification judicieuse de ses déplacements. On y trouve :

- les événements majeurs en cours sur le réseau routier, entraînant des entraves importantes (accidents majeurs, inondations, congestions majeures, etc.);
- les alertes au smog;
- les conditions routières en hiver (visibilité et état de la chaussée);
- les travaux routiers (nature, entraves, horaires, durée);
- le temps d'attente aux postes frontaliers (voyageurs et véhicules commerciaux);
- l'état du service et l'horaire des traversiers;
- les images provenant des caméras de circulation (grandes régions du Québec et postes frontaliers);
- les services offerts dans les haltes routières.

Le géoréférencement de toute cette information répertoriée dans une base de données permet une diffusion intégrée de l'état du réseau routier supérieur et facilite la recherche de renseignements en un seul endroit. Il est possible de déplacer aisément la carte dans toutes les directions et de faire varier l'étendue cartographique. La rapidité d'exécution de la carte est attribuable à OpenLayers et à MapServer. Par ailleurs, il suffit d'interroger la carte sur un point d'intérêt pour que s'affiche une fenêtre d'information dans laquelle on obtiendra, par exemple, l'état de la chaussée et de la visibilité pour un tronçon de l'autoroute 40.



Les autres renseignements que l'on trouve sur le site sont de nature plus générale, par exemple les services 511 des États et provinces limitrophes du Québec, les principaux moyens de transport publics au Québec, les campagnes d'information nationales et les grands projets du Ministère, et les limites de poids et de charge pour l'industrie du camionnage.

Le service actuel Québec 511 constitue le premier jalon vers un portail élargi sur les transports qui regroupera une véritable communauté en transport intégrée et multimodale. Québec 511 Info Transports est donc voué à prendre de l'expansion en fonction des futurs partenariats qui seront établis.

Références

Site Internet : www.Québec511.gouv.qc.ca

Utilisation de barres d'armature en matériaux composites de polymère renforcé de fibres de verre plutôt que de barres d'acier dans une chaussée en béton armé continu

Denis Thébeau, ing., Service des chaussées, Direction du laboratoire des chaussées

Brahim Benmokrane, ing., Ph. D., FACI, FCSCCE, professeur titulaire, Chaire de recherche du CRSNG sur les matériaux composites novateurs de PRF pour les infrastructures, Département de génie civil, Université de Sherbrooke

Mohamed Eisa, ing., étudiant au doctorat, Département de génie civil, Université de Sherbrooke

Introduction

Depuis le début des années 1990, les spécifications de conception des chaussées ont changé de façon importante au ministère des Transports du Québec (MTQ). La conception structurale et la protection contre le gel de tous les types de chaussées en fonction du climat local et des conditions de la circulation routière étaient visées. Depuis lors, de nombreux efforts ont été déployés pour concevoir des chaussées en béton dont la durée de vie serait plus longue. La première chaussée en béton armé continu (BAC) sur une autoroute a été construite en 2000 dans la province de Québec. À ce moment, les chargés de projet et les experts ont essayé d'adapter la conception de ce type de chaussée en béton réalisée dans d'autres pays au rude climat du Québec. Depuis 2000, près de 50 kilomètres de chaussées en BAC ont été construits au Québec avec des barres en acier comme armature.

En 2005, des problèmes survenus lors de la construction de certaines sections de BAC armées de barres d'acier, par exemple l'insuffisance de la couverture de béton au-dessus des barres d'acier, ont suscité chez le chargé de projet des inquiétudes au sujet des performances à long terme du BAC (Thébeau et Davidson, 2006). Certaines carottes prélevées dans le premier tronçon de BAC cinq ans après sa construction ont permis de constater qu'il y avait déjà de la corrosion dans les armatures longitudinales vis-à-vis des fissures. Comme les conditions climatiques du Québec sont plus rigoureuses que celles de la plupart des autres pays dans lesquels des chaussées en BAC sont construites depuis de nombreuses années, il est difficile d'extrapoler le comportement éventuel de ces chaussées en fonction de données provenant d'ailleurs. Les données d'un centre de services de Montréal indiquent que jusqu'à 65 tonnes de sel par année peuvent être répandues sur un tronçon de deux voies d'un kilomètre de longueur. En comparaison avec l'État de l'Illinois par exemple, nous utilisons trois fois plus de sel que ce qu'il utilise sur ses routes.

De nombreuses solutions ont été analysées en 2005 pour faire face à ce problème et l'acier galvanisé a été sélectionné pour les armatures des prochains projets de BAC. Une autre solution au problème de corrosion consiste en l'utilisation de barres d'armature en matériaux composites de polymère renforcé de fibres de verre (PRFV). L'armature en matériaux composites de PRF est d'ailleurs utilisée depuis de nombreuses années par le MTQ dans les dalles et les glissières de ponts en béton, mais n'a jamais été étudiée dans le cas des autoroutes en BAC. Pour cette raison, le MTQ et l'Université de Sherbrooke, par l'entremise de la Chaire de recherche du CRSNG sur les matériaux composites novateurs de PRF pour les infrastructures, ont lancé un projet de recherche innovant impli-

quant l'utilisation de barres de PRFV dans des dalles en BAC en septembre 2006. La chaussée a été construite sur l'autoroute 40 en direction est à Montréal. L'objectif principal de ce projet, qui constituait une première mondiale, était de mettre en application la technologie des barres d'armature en PRFV et de montrer que ces barres pouvaient satisfaire à toutes les exigences relatives au BAC. En outre, il était important d'évaluer la performance à court et à long terme du BAC renforcé de barres en PRFV, ainsi que d'améliorer et de valider les méthodes de conception en fonction des conditions environnementales et de chargement.

Cet article récapitule essentiellement les objectifs du projet de recherche et les détails de la construction de 18 sections de BAC avec des barres en PRFV et en acier. Comme la chaussée est relativement jeune, la performance est abordée sommairement.

Questions et réponses concernant les barres en matériaux composites de polymère renforcé de fibres de verre dans les BAC

Dès le début, il a fallu trouver des réponses à beaucoup de questions avant d'envisager d'utiliser ce matériau pour la première fois dans des dalles de BAC supportant un trafic élevé. Tout d'abord, les barres en PRFV sont très stables dans le béton. Cela a été prouvé au moyen de plusieurs études en laboratoire et sur le terrain (Mufti et autres, 2007a, 2007b). C'est la raison pour laquelle le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-06) a accepté l'utilisation de barres en PRFV comme armature principale dans les dalles en béton des ponts et plusieurs autres éléments structuraux des ponts en béton. Les barres V-RODTM en PRFV utilisées dans le projet de l'autoroute 40 ont été fabriquées au moyen d'un processus appelé pultrusion. Le processus de pultrusion consiste généralement à tirer des filaments en continu à travers un bain de résine, puis dans des dispositifs de préformage où la section est partiellement formée et l'excès de résine et d'air éliminé. Les filaments passent ensuite à travers une forme chauffée où la section est traitée de façon continue. On obtient une liaison de bonne qualité avec le béton en revêtant de sable la surface des barres (ISIS Canada, MO3-2001, Pultrall, 2007). Le tableau 1 indique les propriétés structurales des barres en PRFV utilisées dans cette étude, celles-ci étant tirées des normes de fabrication du manufacturier (Pultrall, 2007).

Tableau 1 – Propriétés structurales des barres droites en PRFV V•ROD™ (Pultrall, 2007)

Taille de la barre	Diamètre (mm)	Section (mm ²)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction garantie f_{fu}^* (MPa)
No 6	19,1	285,1	47.6	656
No 7	22,2	387,9	46.4	625
No 8	25	506,7	51.0	611

* f_{fu}^* = Résistance à la traction moyenne moins trois fois l'écart type (ACI 440.1R-06)

La réparation des dalles endommagées armées de barres en PRFV fait actuellement l'objet d'études. Pour le moment, une des solutions recommandées consiste à couper la section endommagée de la chaussée et à installer des nouvelles barres en PRFV ancrées avec de la résine ou du coulis de ciment

dans des trous percés dans la dalle existante. Le recyclage du BAC avec les barres en PRFV est un autre avantage important de ce type d'armature. En effet, le béton contenant des barres en PRFV peut facilement être concassé et réutilisé comme granulats dans la construction de chaussées. En outre, la résine et les fibres (qui entrent dans la composition des barres en polymère renforcé de fibres) n'ont aucune incidence négative sur le matériau recyclé. Il a été prouvé que l'armature de PRFV a une incidence sur l'environnement bien plus faible que l'armature d'acier (Katz, 2004).

Objectifs et phases de la recherche

Il existe beaucoup de données sur l'effet du pourcentage d'armature en acier et de la grosseur des barres sur le comportement du BAC. Il existe également beaucoup de données sur l'utilisation d'armatures en matériaux composites de polymère renforcé de fibres (PRF) dans divers éléments structuraux en béton. Toutefois, aucune étude expérimentale n'a été effectuée jusqu'ici sur le BAC renforcé de barres en matériaux composites de PRF (Walton et Bradberry, 2005). Selon le comité 440 de l'*American Concrete Institute* (ACI) (2006), on ne dispose d'aucune donnée expérimentale sur le BAC ou sur les dalles sur sol et armées de barres de PRF.

Les objectifs principaux de cette étude sont énumérés ci-dessous :

- Étudier le comportement du BAC renforcé de barres en PRFV et le comparer à celui du BAC renforcé de barres en acier (en ce qui concerne la fissuration, les contraintes et les déformations).
- Développer des équations de calcul s'appliquant à l'utilisation des barres de PRFV utilisées pour armer le BAC.
- Élaborer un modèle analytique au moyen d'une analyse non linéaire par éléments finis pour le BAC renforcé de barres en PRFV.

Les objectifs spécifiques sont la détermination de l'effet des facteurs suivants :

- Le pourcentage d'armature, le type d'armature, l'espacement des armatures, le diamètre des barres et l'épaisseur de la dalle sur l'ouverture et l'espacement des fissures.
- La profondeur des armatures par rapport à la surface sur la fissuration et les contraintes dans la chaussée.
- L'espacement de fissures induites uniformément sur le comportement du BAC.
- Les caractéristiques d'adhérence des barres en PRFV avec le béton sur la fissuration et les contraintes dans la chaussée.
- La présence de plus d'un lit d'armature sur le comportement du BAC renforcé de barres en PRFV.

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, un vaste projet de recherche est actuellement en cours à l'Université de Sherbrooke par l'intermédiaire du projet de recherche de l'autoroute 40 réalisé en collaboration avec le MTQ. Le programme de recherche comprend les trois phases suivantes :

- Phase 1 : Conception, instrumentation et construction de 18 sections complètes de BAC sur l'autoroute 40.
- Phase 2 : Suivi périodique du comportement de 18 sections de BAC sur une période de 24 mois après la fin de la construction.
- Phase 3 : Modélisation analytique au moyen de la méthode par éléments finis dans le but de prédire le comportement du BAC renforcé de barres en PRFV.

Méthode de conception et détails structuraux des sections en BAC

La conception des chaussées au Québec s'effectue en deux étapes : la première concerne la conception structurale et la deuxième, la protection contre le gel. En ce qui concerne la conception structurale, le dimensionnement du BAC porte sur deux éléments principaux : l'épaisseur de la dalle et le pourcentage d'armature. Dans le cas du projet de l'autoroute 40, divers aspects ont été pris en compte pour l'évaluation de l'épaisseur de la chaussée (AASHTO, 1993) : trafic anticipé, durée de vie de la chaussée, propriétés du béton, sol d'infrastructure et couches de fondation, drainage et anciens projets de BAC réalisés par le MTQ sur l'autoroute 13 (2000) et l'autoroute 40 (de 2003 à 2005). L'autoroute 40 est située à Montréal sur le réseau stratégique du MTQ. L'équivalent de charge axiale simple (ECAS) estimé pour la période de calcul de 30 ans était de 230 millions (béton). Il a été décidé qu'une dalle de BAC de 280 mm d'épaisseur était nécessaire pour la plupart des sections.

L'étape suivante a consisté à déterminer la quantité de barres en PRFV. Quatre équations ont été utilisées pour calculer le pourcentage d'acier longitudinal : Vetter 1933, AASHTO 1972, USDT 1996 et ACI 440.1R-06. Bien que les trois premières aient été proposées pour du BAC renforcé de barres d'acier, on les a utilisées dans cette étude en modifiant les paramètres pour les rendre compatibles avec les propriétés de l'armature de PRFV. La seule équation proposée pour les dalles sur sol et armées de barres en PRFV est celle décrite dans ACI 440.1R-06. Toutefois, aucune étude expérimentale n'a permis de la valider. Les calculs effectués à l'aide de ces équations ont conduit à un pourcentage d'armature longitudinale de PRFV de 1,2 %. Pour les besoins de cette étude sur le terrain, le pourcentage d'armature longitudinale de PRFV a varié de 0,77 % à 1,57 %. Le pourcentage d'armature en acier utilisé pour le BAC de l'autoroute 40 est égal à 0,77 %.

Pour garantir la qualité de la conception du BAC, on doit vérifier trois critères : l'ouverture des fissures, l'espacement des fissures et les contraintes dans l'armature. Dans cette étude, trois méthodes ont été appliquées (AASHTO 1986; Gilbert 1992 et logiciel CRCP-10) pour vérifier ces limites, comme on peut le voir dans le tableau 2.

Tableau 2 – Vérification des critères de calcul pour le BAC avec des barres en PRFV (conception proposée)

	AASHTO 1986	Gilbert 1992		CRCP-10 2001	
		Résistance d'adhérence barre/béton élevée*	Résistance d'adhérence barre/béton faible**	Résistance d'adhérence barre/béton élevée*	Résistance d'adhérence barre/béton faible**
Ouverture des fissures (mm)	0,25	0,26	0,52	0,38	0,48
Espacement des fissures (m)	0,43	0,56	1,08	0,73	0,73
Contraintes dans les barres en PRFV (MPa)	98	211	206	79	65

* Résistance d'adhérence barre/béton = 14,8 MPa,

** Résistance d'adhérence barre/béton = 7,5 MPa

En outre, le tableau 3 montre la configuration des armatures et les paramètres étudiés pour chaque section mise à l'essai du projet de recherche de l'autoroute 40.

Tableau 3 – Configuration des armatures de PRFV et paramètres étudiés dans le projet de recherche sur les BAC, autoroute 40 (Montréal)

Série	Paramètre étudié	Dalle	Épaisseur de la dalle (mm)	Pourcentage des armatures longitudinales (%)
A	Pourcentage d'armature (espacement entre les barres variable)	A1	280	1,05
		A2		1,16
		A3 (A2)		1,16
		A4		1,32
B	Pourcentage des armatures transversales	B	280	1,16
C	Pourcentage d'armature (espacement entre les barres fixe)	C1	280	1,57
		C2		1,06
D	Une barre isolée	D1	280	1,27
		D2 (D1)		1,27
		D3		0,97
		D4		0,77
E	Contrôle de la fissuration (fissures induites par la création de rainures à la surface de la dalle)(coupe à la scie chaque 1,2 m)	E1	280	1,16
		E2		1,03
F	Épaisseur de la dalle	F	350	0,93
G	Deux lits d'armature	G	350	0,93
S	Barres d'acier	S1, S2, S3	280	0,77

La structure typique des dalles en BAC armées de barres en PRFV est comparée dans la figure 1 à celle de la dalle standard du MTQ armée de barres en acier. Dans ce projet, une sous-fondation de MG-112 de 450 mm d'épaisseur a été mise en place, puis une couche de 150 mm de MG-20, et enfin une couche à granulométrie ouverte de 100 mm stabilisée avec du ciment a été utilisée comme couche de drainage sous la dalle.

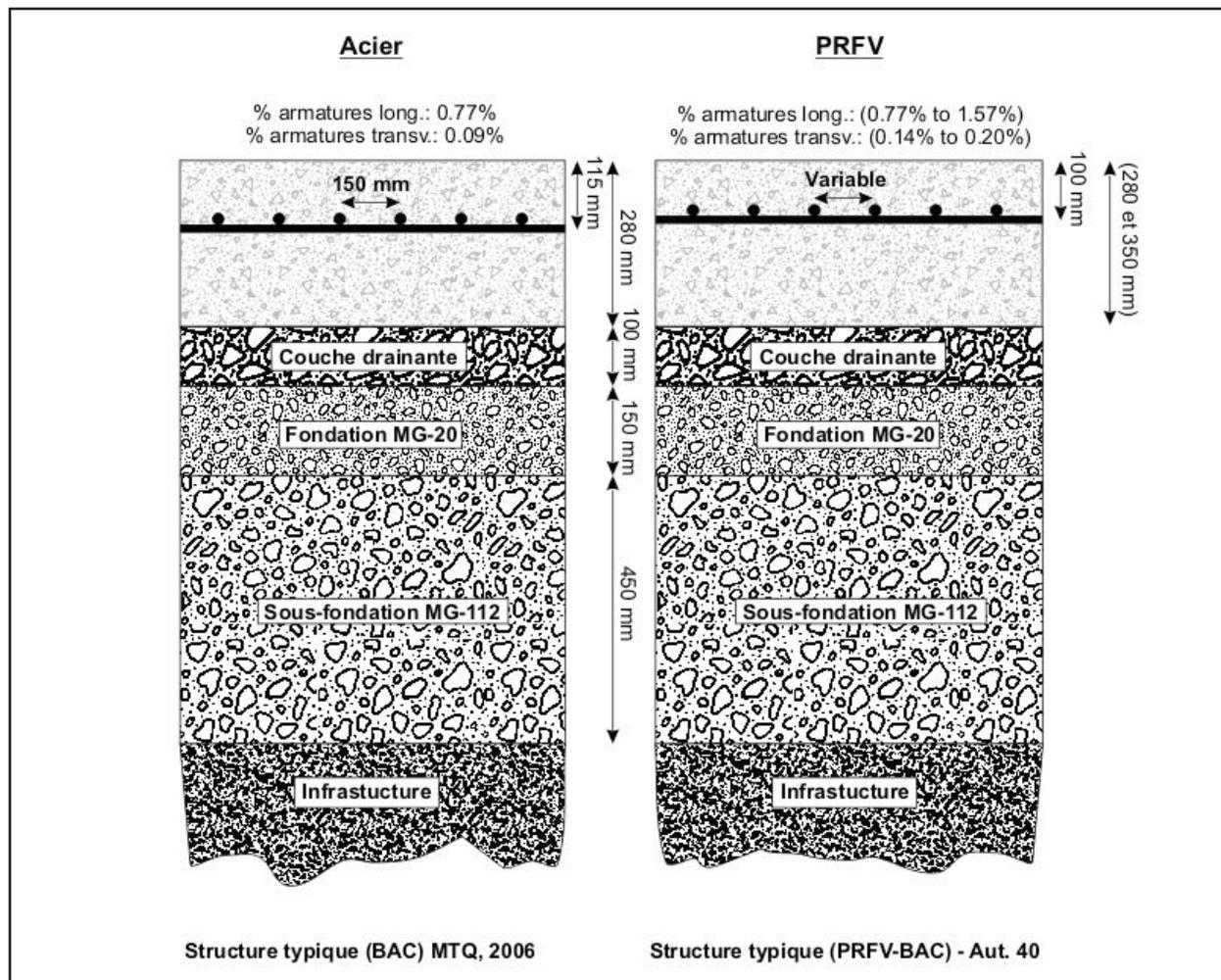


Figure 1 – Structure typique de la chaussée des tronçons mis à l'essai

Construction et instrumentation des sections d'essais

Construction du BAC. Les travaux de construction du projet de recherche ont commencé en août 2006. Les sections d'essais ont été construites à la fin du projet de reconstruction de 6 kilomètres de l'autoroute 40. Des ancrages ont été réalisés aux deux extrémités des sections de 150 m avec au moins trois poutres. Chaque accotement était constitué de dalles courtes goujonnées de 5 m de longueur; il s'agit de la norme pour les projets de BAC du MTQ.

Des barres V-ROD™ en PRFV de diamètres de 20 (PRFV-20M), 22 (PRFV-22M) et 25 mm (PRFV-25M) ont été utilisées pour les armatures longitudinales des 15 sections. L'armature transversale comprend une seule grosseur, soit un diamètre de 20 mm (PRFV-20M). Comme on peut le voir à la figure 2, la manipulation des barres en PRFV est plus facile que celle des barres d'acier. La mise en place des armatures a commencé par la voie du centre, les barres d'armature transversales étant posées en travers selon un angle de 30° par rapport à l'axe transversal et espacées de 520 mm entre elles. Ensuite, les barres longitudinales ont été posées conformément aux plans et devis.



Figure 2 – Manipulation des barres d'armature de PRFV

La figure 3 montre les barres d'armature de PRFV prêtes pour la coulée du béton : à gauche, la section C2 (voie centrale) est composée d'une rangée de barres de PRFV de 25 mm de diamètre et à droite, la section G (voie de droite), de deux lits d'armature de PRFV de 20 mm de diamètre.

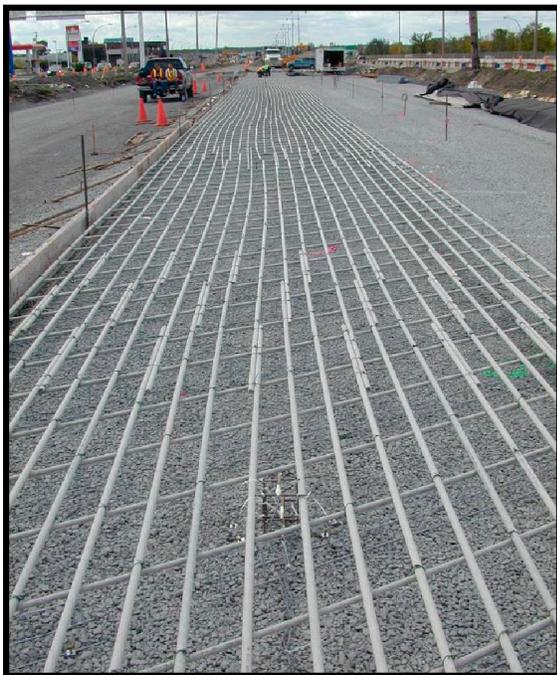


Figure 3 – Barres d'armature de PRFV posées en un lit et en deux lits

Conformément aux normes du MTQ, des barres d'acier galvanisé ont été utilisées comme armature pour les trois sections en acier (S1, S2 et S3), qui ont été construites pour base de comparaison. Dans ces sections de référence, des barres d'acier 20M et 15M ont été utilisées pour les armatures longitudinales et transversales, respectivement.

Du béton de type IIIA a été utilisé pour le projet de recherche conformément aux spécifications du MTQ (voir le tableau 4). La résistance à la compression spécifique du béton est de 35 MPa à 28 jours.

Tableau 4 – Caractéristiques du béton

Type de béton	Quantité de ciment (kg/m ³)	Rapport eau/liant	Type et grosseur des granulats (mm)	Teneur en air (%)	Entraîneur d'air (ml/100 kg)	Affaissement (mm)
35 compr. 4,5 flexion Type IIIA	340	0,45	Granite 10-20 Granite 5-14	5-8	60,00	40 ± 20

L'entrepreneur avait une usine de malaxage à proximité du chantier et le béton était transporté au moyen de camions à benne. Une machine à coffrages glissants GOMACO-GT6300 a été utilisée pour mouler le béton. Le premier jour de la mise en place du béton a été le mardi 29 septembre 2006, au cours duquel une quantité de 168 m³ de béton a été coulée dans la voie du centre. Ensuite, 188 m³ de béton ont été mis en place dans la voie de droite le lundi 2 octobre 2006 (voir la figure 4). Le vendredi 6 octobre 2006 a été le jour final et une quantité de 208 m³ a alors été coulée dans la voie de gauche. On notera qu'une erreur dans les plans s'est produite, car des goujons étaient prévus entre les sections S et l'ancrage est. L'erreur a été corrigée en perçant la dalle d'ancrage et en y introduisant des barres crénelées à la dernière minute avant la coulée du béton. Finalement, à la fin d'octobre 2006, l'autoroute 40 a été ouverte au trafic.

Instrumentation des dalles en BAC. Divers capteurs de mesure ont été installés pour surveiller le comportement dès le début de la mise en service ainsi que l'effet des charges répétées sur le comportement des dalles de BAC. Des jauges de déformation électriques ont été noyées dans le béton pour mesurer les déformations du béton et des armatures (acier et barres en PRFV) comme on peut le voir à la figure 5, afin de collecter des données pour ce projet.

En outre, des thermocouples ont été installés pour mesurer la température à l'intérieur du béton de la chaussée, comme on peut le voir à la figure 6.



Figure 4 – Pose du béton sur l'armature de PRFV dans la voie de gauche

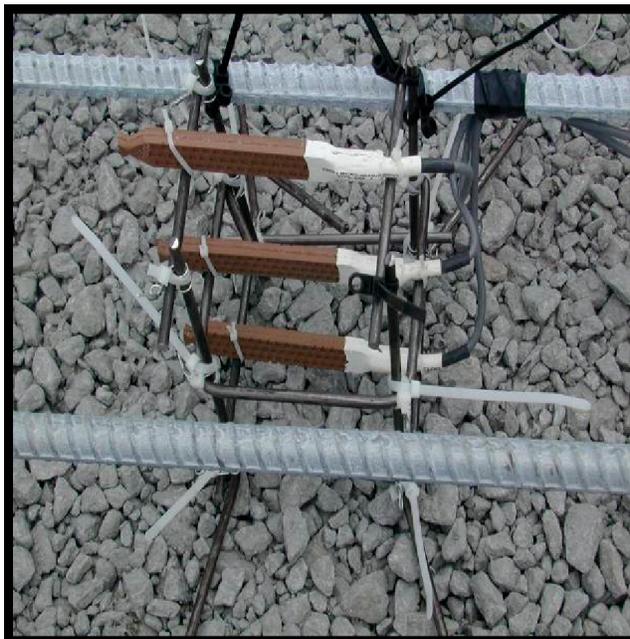


Figure 5 – Jauge de déformation électrique dans le béton et sur des barres de PRFV

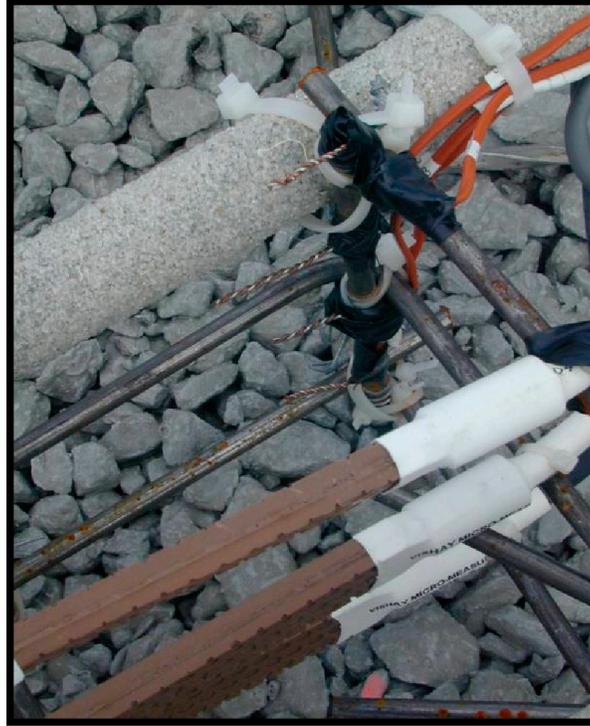


Figure 6 – Quatre fils de thermocouple montés sur une chaise

Enfin, des capteurs à fibres optiques ont été utilisés dans ce projet en plus des jauges de déformation électriques. Quatre types de capteurs à fibres optiques ont été installés, notamment pour mesurer les déformations des armatures (capteurs Fabry-Perot, Réseau de Bragg et Brillouin), ainsi que des thermocouples à capteur à fibre optique (OTP-P) (voir la figure 7).



Figure 7 – Capteurs à fibres optiques pour les mesures de déformation

Comportement de la chaussée

Un programme de suivi de la performance des chaussées, semblable au programme américain LTPP, a été lancé par le MTQ en 1992. Les objectifs principaux de ce programme sont l'amélioration du comportement et la prolongation de la durée de vie des chaussées, ainsi que l'optimisation des ressources affectées à l'entretien et à la construction des routes.

En plus des relevés du projet de recherche abordés ci-dessus, le comportement de toutes les sections mises à l'essai a été étroitement surveillé à l'aide des moyens suivants :

- Cartographie des dégradations dans toutes les sections de 25 m.
- Mesure de l'ouverture des fissures et des joints d'extrémité.
- Mesure des profils longitudinaux (IRI).
- Mesure des profils transversaux (ornières).
- Carottage et échantillonnage.
- Mesure de la déflexion des dalles (FWD).
- Mesure de la pénétration du sel dans le béton.

Comportement du BAC

Les dalles en BAC avaient un an et demi d'âge (18 mois) au moment de la rédaction de cet article. Jusqu'ici, les dalles se sont comportées de façon satisfaisante comme on peut le voir à la figure 8. Aucun dommage important n'a été observé, notamment pompage, épaufrure ou *punch-out*. Le suivi des sections d'essais a commencé dès le premier jour de la construction, ce qui a permis aux chercheurs d'étudier dès le début l'effet des conditions climatiques et des charges sur le comportement de la chaussée.



Figure 8 – Vue générale de l'autoroute 40

Température de la dalle de chaussée

Les changements de température imposent de grandes contraintes aux dalles en BAC. Ils sont responsables de la variation des contraintes et des déformations durant la construction et tout au long de la durée de vie de la chaussée. Dans ce projet, cinq groupes de thermocouples ont été installés dans cinq dalles (A3, D1, D3, E1 et F). Chaque groupe était constitué de quatre fils répartis sur la profondeur de la chaussée (à 80, 130, 180 et 230 mm de la surface de la chaussée). La figure 9 représente la variation de la température moyenne dans le béton mesurée pour un de ces groupes (dalle E1) en fonction du temps. Durant les 18 premiers mois après la construction, aucune différence majeure n'a été constatée entre les températures enregistrées des cinq groupes. La variation de température annuelle absolue enregistrée a été de 45 °C et la température différentielle moyenne maximale entre le thermocouple supérieur et le thermocouple inférieur a atteint 5 °C durant l'hiver, ce qui constitue une valeur relativement élevée comparativement aux États du Nord des États-Unis (p. ex. : Illinois) dans lesquels le BAC est largement utilisé (Kohler, E. et Roesler, J., 2006).

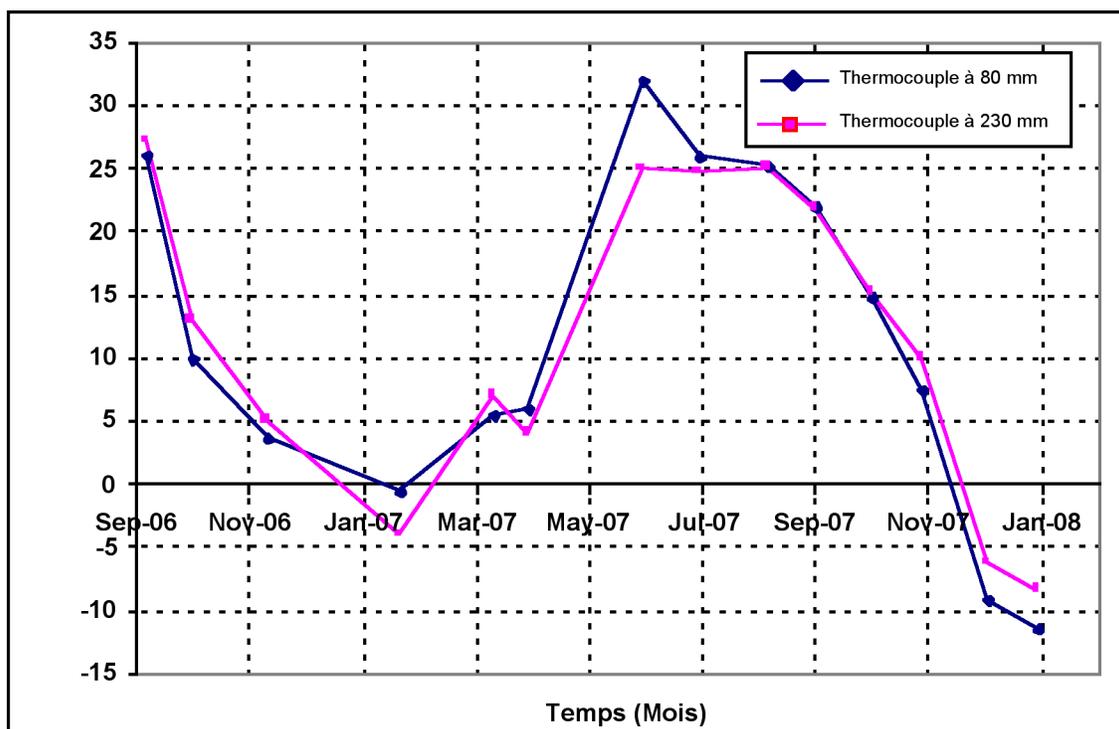


Figure 9 – Variation de température moyenne dans le béton des dalles en BAC durant la première année après la construction

Déformations dans les dalles

Les déformations dans les dalles en BAC sont considérées comme étant l'un des facteurs les plus importants permettant d'en comprendre le comportement. La figure 10 montre des déformations typiques mesurées des armatures ainsi que du béton en fonction du temps dans la dalle A4 du BAC (pourcentage d'armature de 1,2 %). La relation étroite entre la formation de fissures et les valeurs

des déformations dans les dalles BAC est visible dans cette figure : la zone I correspond aux six premiers mois de mesures dans la dalle A4. Dans cette zone, quatre fissures se sont formées (no 1) et ont été la cause des faibles valeurs des déformations dans les sections non fissurées de la dalle pendant cette période. Quatre mois plus tard, les valeurs des déformations ont commencé à augmenter sans qu'aucune nouvelle fissure se crée. La formation de seulement une fissure (no 2) dans la zone II a entraîné une réduction importante des valeurs des déformations dans cette zone. Les valeurs des déformations ont commencé à augmenter trois mois plus tard sans qu'il se forme de nouvelles fissures; toutefois, elles ont ensuite diminué après la formation de deux nouvelles fissures (no 3) dans la zone III.

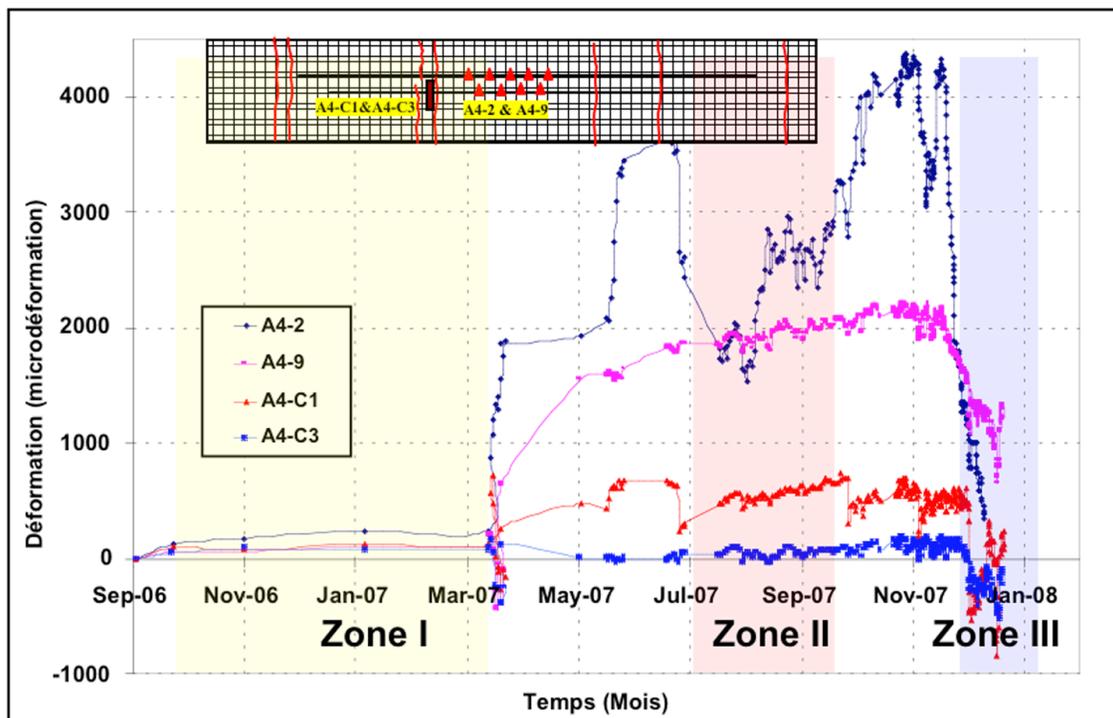


Figure 10 – Déformations des armatures et du béton en fonction du temps dans la dalle A4 (1,2 ‰)

Durant cette période, la déformation maximale a atteint 4 100 microdéformations dans les armatures et 1700 microdéformations dans les jauges de déformation du béton, et elle est donc restée dans les limites de conception du guide ACI 440.1R-06. À cette étape, les valeurs mesurées des déformations ne peuvent pas être considérées comme donnant une mesure des valeurs des déformations prévues, car il est probable que des nouvelles fissures se propageront dans un avenir proche et qu'elles relâcheront les contraintes dans les dalles en BAC.

Espacement et ouverture des fissures

L'ouverture et l'espacement des fissures sont considérés comme étant les problèmes les plus critiques en ce qui concerne le comportement des dalles en BAC. Dans cette étude, le développement de la

fissuration à la surface de la chaussée, y inclus l'ouverture et l'espacement des fissures, est recherché afin que l'on puisse déterminer ses effets sur le comportement du BAC depuis la construction. Les mesures ont commencé 20 jours après la pose du béton et ont été répétées régulièrement (tous les deux mois). Une roue de mesure et une règle graduée ont été utilisées pour déterminer l'espacement et l'ouverture des fissures, respectivement. Récemment, afin de mesurer l'ouverture des fissures avec une haute précision, on a utilisé un comparateur (de type Mitutoyo) pour déterminer plus exactement la variation de l'ouverture des fissures avec une résolution de 10^{-4} mm.

La figure 11 montre l'ouverture et l'espacement moyens des fissures de la dalle C2 du BAC depuis la construction. On s'attendait à ce que le pourcentage d'armature constitue le facteur dominant influant sur l'ouverture et l'espacement moyens des fissures du BAC. Toutefois, en raison du jeune âge de la chaussée ainsi que des variations de température élevées, il n'a pas été possible d'observer une relation très claire entre la formation de fissures et le pourcentage d'armature. On prévoit malgré tout qu'au fil du temps le pourcentage d'armature aura une incidence plus significative sur l'espacement et la largeur des fissures.

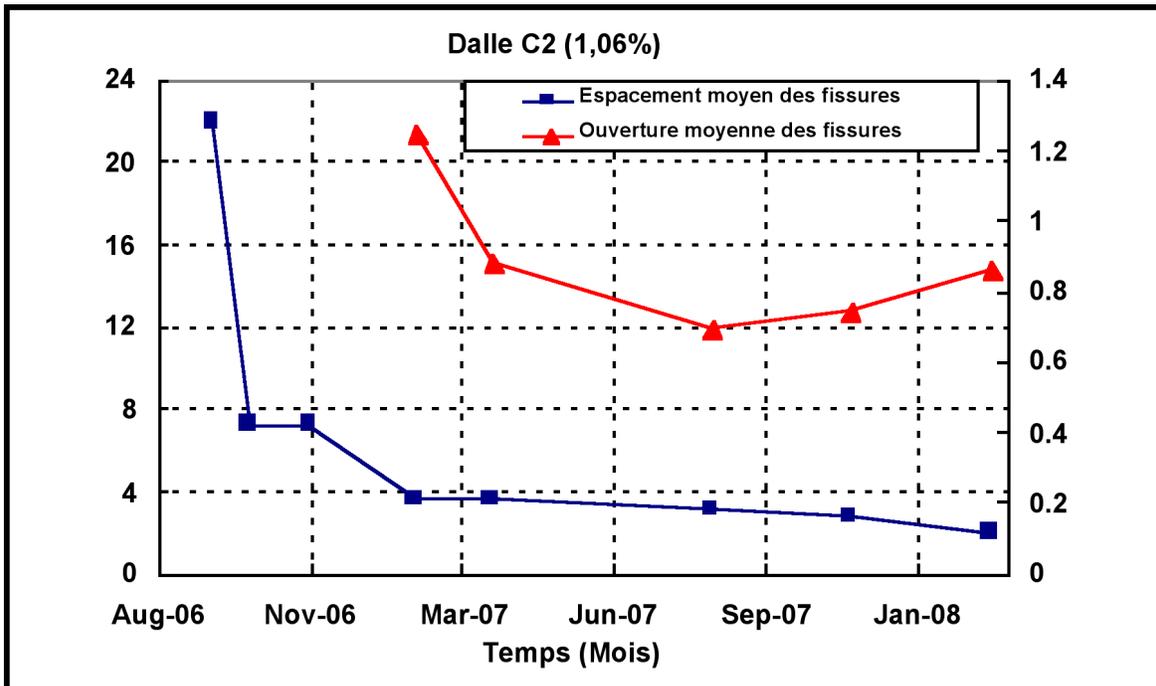


Figure 11 – Ouverture et espacement moyens des fissures de la dalle C2 du BAC

Il a toutefois été observé que les variations de température avaient une incidence significative sur le comportement des dalles. On peut noter en examinant les figures 9 et 11 qu'il existe une relation entre la température de la dalle et à la fois l'espacement moyen des fissures et l'ouverture moyenne des fissures. Chaque fois que la température a diminué (de septembre 2006 à février 2007, puis de septembre 2007 à février 2008), des nouvelles fissures se sont formées dans les dalles et l'espacement moyen des fissures a diminué, tandis que l'ouverture moyenne des fissures a augmenté. Par contre,

lorsque la température a augmenté (de février à juin 2007), aucune nouvelle fissure ne s'est formée dans les dalles; par conséquent, l'espacement moyen des fissures est resté constant et l'ouverture moyenne des fissures a diminué.

Les derniers résultats, correspondant aux mesures de février 2008, indiquent que l'espacement moyen des fissures a varié de 1,5 m à 4 m dans la plupart des dalles de BAC renforcées en PRFV. L'ouverture moyenne des fissures a varié de 0,7 mm à 0,9 mm, ce qui est inférieur à la limite de calcul de l'AASHTO de 1 mm. Cela correspond aussi aux ouvertures moyennes des fissures (0,9 mm) mesurées dans les dalles en BAC renforcées en acier.

Conclusion

Cet article présente les objectifs du projet de recherche, des questions et des réponses sur l'utilisation du polymère renforcé de fibres de verre (PRFV) dans le béton armé continu (BAC), ainsi que des renseignements sur la conception, l'instrumentation, les détails de construction, les propriétés des matériaux utilisés et les résultats préliminaires du comportement des 18 sections complètes de BAC renforcées de barres en PRFV de l'autoroute 40 est (Montréal). Des résultats préliminaires du projet, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- Après un an et demi de service, le comportement général des dalles en BAC est satisfaisant. Aucun dommage majeur n'a été observé, notamment pompage, épaufrure ou *punch-out*, dans les dalles en BAC.
- Il a été observé que les variations climatiques avaient un effet important sur le comportement de la plupart des dalles en BAC renforcées de barres en PRFV.
- Jusqu'à maintenant, le pourcentage d'armature ne semble pas avoir un effet significatif sur le comportement des dalles en BAC (ouverture et espacement des fissures). Cela pourrait être dû au jeune âge des dalles, et l'on s'attend à ce qu'au fil du temps le pourcentage d'armature ait un effet plus significatif.
- Les derniers résultats montrent que l'espacement moyen des fissures varie de 1,5 m à 4,0 m dans la plupart des dalles en BAC. En outre, l'ouverture moyenne des fissures varie de 0,7 mm à 0,9 mm, ce qui est inférieur à la limite de calcul de l'AASHTO.
- Les résultats finaux de ce projet de mise à l'essai pourraient contribuer à l'utilisation de barres en PRFV dans les chaussées en béton. En outre, ils permettront d'introduire des résultats dans la littérature sur l'utilisation des barres en PRFV dans le BAC.

Au cours des mois suivants, nous devrions obtenir des données intéressantes et établir des tendances plus nettes mettant en évidence la relation entre le béton de chaussée en BAC et les armatures de PRFV. En outre, nous espérons élaborer une méthode de conception pour ce type de chaussée en béton avant nos prochains projets de BAC au Québec. Cela nous permettra aussi d'effectuer des analyses des coûts globaux sur le cycle de vie correspondant aux diverses solutions et de choisir la meilleure, celle capable de résister le plus longtemps à la rigueur du climat au Québec.

Cet article est dédié à la mémoire du coauteur Mohamed Eisa, qui est décédé de façon imprévue à l'âge de 31 ans.

Références

- AASHTO (1972, 1986 et 1993). *Guide of Pavement Structural*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- ACI Committee 440 (2006). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI 440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 42 p.
- CAN/CSA-S6-06 (2006) *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, Association canadienne de normalisation, Toronto, ON, Canada, 2006, 706 p.
- Gilbert, R. I. (1992). « Shrinkage Cracking in Fully Restrained Concrete Members », *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 2, p. 141-149.
- ISIS-M03-01 (2001) *Reinforcing Concrete Structure with Fibre Reinforced Polymers*, The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structure, ISIS Canada, University of Winnipeg, Manitoba, Canada, 158 p.
- Katz, A. (2004) « Environmental Impact of Steel and Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Pavements », *ASCE, Journal of composites for construction*, Vol. 8, Issue 6, p. 481-488 (November/December 2004).
- Kohler, E., and Roesler, J. 2006 "Accelerated Pavement Testing of Extended Life. Continuously Reinforced Concrete Pavement Sections," Transportation Engineering Series No.126, Illinois Cooperative Highway and Transportation Series No. 289, UILU-ENG-2006-2010, University of Illinois, Urbana, IL, 354 p.
- Mufti, A., Banthia, N., Benmokrane, B., Boulfiza, M., and Newhook, J. (2007a). « Durability of PRFV Composite Rods », *Concrete International, the American Concrete Institute Magazine*, Vol. 29, No. 2, p. 37-42.
- Mufti, A., Onofrei, M. Benmokrane, B., Banthia, N., Boulfiza, M., Newhook, J.P., Bakht, B., Tadros, G., and Brett, P. (2007b). « Field Study of Glass-Fibre-Reinforced Polymer Durability in Concrete », *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 3, p. 355-366.
- Pultrall Inc. (2007). *V-RODTM Technical Specification and Material Properties*, site Web <http://www.pultrall.com/products/construction/TechMech1.html>.
- USDT (1990). *Technical Advisory for Continuously Reinforced Concrete Pavement*, United States Department of Transportation, Federal Highway Administration, T 5080.14, Washington, USA, DC 20590.
- USDT (1996). *Guidelines of Airport Pavement Design and Evaluation*, United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration. AC. No: 150/5320-6D, Washington, USA, DC 20591.

Thébeau, D., Davidson F. (2006) « First Experiences with Continuously Reinforced Concrete Pavement (BAC) in Canada » 10th International Symposium on Concrete Roads, Belgium.

Vetter, C. P. (1933). « Stresses in Reinforced Concrete Due to Volume Changes », ASCE, Vol. 98, p. 1039-1050.

Walton, S., Bradbury, T. (2005) « Feasibility of a Concrete Pavement Continuously Reinforced by Glass Fiber Reinforced Polymer Bars », ConMat 2005, site Web http://www.dot.state.tx.us/publications/bridge/feasibility_concrete.pdf.

La caractérisation des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de méthylène

Par Claude Robert, Service des matériaux d'infrastructures,
Direction du laboratoire des chaussées, MTQ

Deux chercheurs du Département de génie civil de l'Université Laval, MM. Jean-Marie Konrad et Fabian Alonso Valencia Gabézas ont présenté au ministère des Transports du Québec (MTQ) le résultat d'une recherche intitulée *Caractérisation des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de méthylène*. Le présent article dresse le portrait de ce travail pour connaître davantage le potentiel de cet essai et son domaine d'utilisation.

1. Contexte

Pour limiter les effets néfastes d'une trop grande présence de particules fines dans les matériaux granulaires de fondation routière, des exigences ont été fixées en ce qui concerne la proportion de particules passant le tamis de 80µm. Pour tenter de quantifier la capacité de rétention en eau des particules fines, l'essai au bleu de méthylène est aussi exigé. À l'aide de l'essai au bleu de méthylène, on évalue la capacité d'adsorption ionique des particules fines, mais pas vraiment la quantité de particules argileuses responsables en grande partie de la rétention d'eau dans les matériaux granulaires.

2. Objectifs de l'étude

L'objectif de ce projet est de caractériser les particules fines de différents matériaux granulaires MG-20 à l'aide de l'essai au bleu de méthylène. Cet essai est utilisé au ministère des Transports du Québec depuis plusieurs années, mais une nouvelle approche dans la réalisation et l'interprétation des résultats pourrait donner davantage d'information sur la nature des particules fines en ce qui a trait à leur potentiel d'adsorption.

L'exigence du ministère des Transports concernant la valeur au bleu de méthylène ne s'applique que pour les matériaux granulaires produits à partir des dépôts meubles naturels, et non pour ceux provenant des carrières. Un raffinement de la méthode pourrait permettre une meilleure analyse des matériaux de carrière, et la possibilité d'appliquer l'essai de valeur au bleu à des types de pierre pour lesquels l'essai au bleu a rarement présenté des valeurs cohérentes.

3. L'absorption du bleu de méthylène

Le bleu de méthylène est utilisé pour déterminer la surface spécifique des minéraux argileux depuis plusieurs décennies. La formule chimique du bleu de méthylène est $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$ avec une masse moléculaire de 373,91 g/mol; à l'état aqueux, le bleu de méthylène est un colorant cationique qui est adsorbé par les surfaces des argiles qui sont chargées négativement (Hang et Bindley, 1970; Chen et autres, 1999).

L'essai au bleu de méthylène consiste à déterminer la capacité d'adsorption ionique d'un sol en mesurant la quantité de colorant de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir la surface totale, externe et interne, de toutes les particules argileuses présentes dans la solution à étudier par une monocouche de bleu de méthylène. On appelle cette quantité « la valeur au bleu » notée VB et exprimée en grammes de bleu par 100 grammes de sol, selon l'équation suivante :

$$VB = \frac{V_{BM}}{M_{sol}} \left(\frac{ml}{g} \right)$$

où V_{BM} = la quantité de bleu de méthylène adsorbé (ml)
 M_{sol} = la masse de sol sec de la prise d'essai (g)

Le principe de cet essai repose sur la base d'échanges ioniques ayant lieu entre les cations des argiles facilement échangeables et les cations de bleu de méthylène libérés au moment de sa dissolution dans l'eau. Considérant que les particules argileuses ont une grande surface spécifique et une capacité d'échange ionique importante, la présence de minéraux argileux peut être mise en évidence.

Par la quantité de bleu de méthylène adsorbée sur les particules argileuses, la surface spécifique (S_s) des particules fines peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$S_s = VB * FC$$

$$S_s = \left[\frac{V_{BM}}{M_{sol}} \right] * \left[m_{BM} \frac{A_V}{M} A_{BM} \right] \left(\frac{m^2}{g} \right)$$

où VB = la valeur au bleu du sol exprimée en fonction de :
 V_{BM} = la quantité de bleu de méthylène adsorbé par le sol (ml);
 M_{sol} = la masse sèche de la prise d'essai (g);
 FC = est un facteur de conversion exprimé en fonction de :
 m_{BM} = la teneur en bleu de la solution de titrage (g/ml);
 A_V = le nombre d'Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ atomes/mol);
 A_{BM} = l'aire couverte par une molécule de bleu de méthylène (130\AA^2);
 M = la masse moléculaire du bleu de méthylène (373,91g/mol).

4. Matériaux granulaires à l'étude

Les matériaux granulaires soumis à l'étude sont des MG-20 qui ont présenté des problèmes de drainage et/ou des problèmes de dégradation. La plupart proviennent de gravières et certains sont formés d'éléments schisteux. Le tableau 1 présente les caractéristiques des huit matériaux analysés, dont la valeur au bleu VB qui a été mesurée suivant la méthode d'essai LC 21-255 « Détermination de la

valeur au bleu de méthylène des sols et des granulats » par le MTQ. L'analyse granulométrique et la sédimentation des particules fines ont été réalisées suivant la méthode d'essai NQ 2501-025 « Sols – Analyse granulométrique des sols inorganiques » par l'Université Laval.

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux MG-20 soumis à l'étude

Matériau	Source	Type de pierre	VB MTQ)	% <400µm	% <160µm	% <80µm	D50(FF) (µm)
495003	Gravière	Schiste dur	0,64	8,3	5,4	4,4	8
433366	Carrière	Calcaire	0,59	8,3	5,9	5,1	14
488898	Gravière	Granite	0,30	7,5	1,5	0,7	23
260942	Gravière	Grès et schiste	0,24	14,4	7,0	4,1	23
380160	Gravière	Grès et schiste	0,32	10,2	4,3	2,8	12
463437	Gravière (avec silt)	Granite	0,30	17,8	9,3	6,0	27
433374	Carrière	Granite + sable	0,14	16,4	8,3	4,3	29
331232	Gravière	Quartzite et schiste	0,10	9,2	4,4	2,9	24

5. Méthode au spectrophotomètre

La présente étude porte essentiellement sur l'essai d'adsorption de bleu de méthylène par les particules fines des matériaux granulaires. Les différents matériaux granulaires de fondation MG-20 ont été analysés selon une nouvelle approche mise au point au Département de génie civil de l'Université Laval à l'aide d'un spectrophotomètre.

Cette méthode est semblable à la méthode d'essai conventionnelle, sauf qu'un spectrophotomètre est employé pour établir le point de saturation en bleu de méthylène en déterminant l'absorbance de la solution sol-bleu. La méthode du spectrophotomètre a été élaborée afin d'éliminer un facteur d'erreur que l'on trouvait dans la méthode conventionnelle au chapitre de l'interprétation de l'auréole.

La méthode du spectrophotomètre nécessite les mêmes instruments que la méthode conventionnelle, en plus d'une centrifugeuse et d'un spectrophotomètre.

5.1. La procédure d'essai :

La détermination de la valeur au bleu par la méthode du spectrophotomètre nécessite l'utilisation d'environ sept béchers pour chaque échantillon avec différentes concentrations de bleu de méthylène. La procédure d'essai pour chacun des béchers est décrite comme suit :

- ajouter la solution de bleu de méthylène dans la suspension de sol;
- mélanger continuellement pendant 15 minutes avec un agitateur à ailettes;
- à la fin de l'agitation, laisser reposer la solution pendant 1 à 2 minutes pour permettre aux grosses particules de sédimenter;
- prélever par la suite le liquide de la surface avec une pipette pour remplir des petits tubes qui seront insérés dans la centrifugeuse;
- centrifuger pendant 5 minutes à haute vitesse;
- prendre le liquide surnageant dans chaque tube de la centrifugeuse et déterminer l'absorbance au spectrophotomètre pour une longueur d'onde de 664 nm.

5.2. Détermination de la courbe de titrage :

La valeur au bleu déterminée à l'aide du spectrophotomètre (VB_s) est déduite à partir de la courbe de titrage. La procédure de détermination de la courbe de titrage est divisée en deux étapes.

- La première étape est la détermination du point de saturation. L'essai au spectrophotomètre doit commencer par un point de référence (c.-à-d. le point de saturation). Pour avoir une première approximation du degré d'adsorption de l'échantillon, on utilise le papier filtre. On ajoute à la prise d'essai placée dans un premier bécher du titrant jusqu'à l'obtention sur le papier filtre d'une auréole visible. La solution obtenue à la fin de cette première étape n'est pas prise en considération dans le traçage de la courbe de titrage car le temps de brassage est difficile à estimer.
- La deuxième étape porte sur les mesures au spectrophotomètre. Un deuxième bécher est placé sur l'agitateur avec la quantité de titrant trouvée à la première étape. Après quelques minutes d'agitation, le titrage peut alors commencer comme il a été décrit précédemment à la section 5.1. L'absorbance obtenue doit être inférieure à 1,0 (figure 1a). Le cas échéant, il est recommandé de reprendre la préparation du deuxième bécher en diminuant la quantité de titrant ajoutée. Dans un troisième bécher, on ajoute de 0,5 à 1 ml de titrant et on détermine l'absorbance. Le point trouvé sera considéré comme étant le niveau de base (figure 1b).

À partir des deux premiers points trouvés, on doit diviser l'intervalle formé par ces deux points en termes de quantité de bleu ajoutée suivant quatre petits intervalles égaux. On utilise trois autres béchers dans lesquels les niveaux de titrant correspondent aux bornes des quatre intervalles trouvés (figure 1c). On répète la même procédure pour ces trois béchers. Finalement, pour mieux définir la courbe entre les deux points où se produit la cassure ou le changement de pente, on peut utiliser le septième bécher (figure 1d).

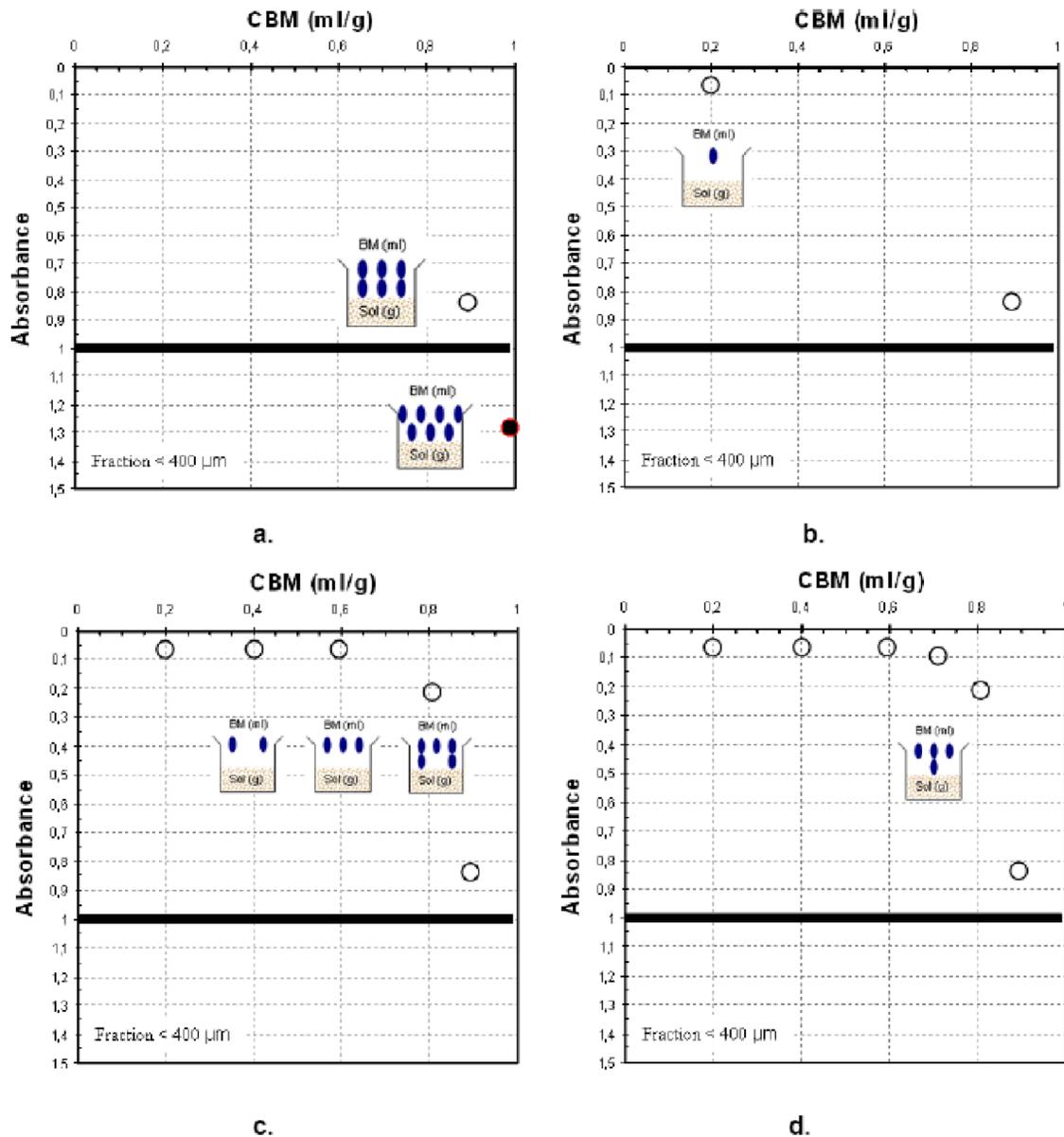


Figure 1 : Obtention de la courbe de titrage

5.3. Détermination de la valeur au bleu (VB_5) :

La valeur au bleu à l'aide du spectrophotomètre VB_5 , correspond à la concentration de bleu de méthylène (CBM) où se présente le premier changement dans la pente de la courbe de titrage, comme montré à la figure 2. Cette valeur CBM correspond au point où le sol a utilisé toute sa capacité d'adsorption.

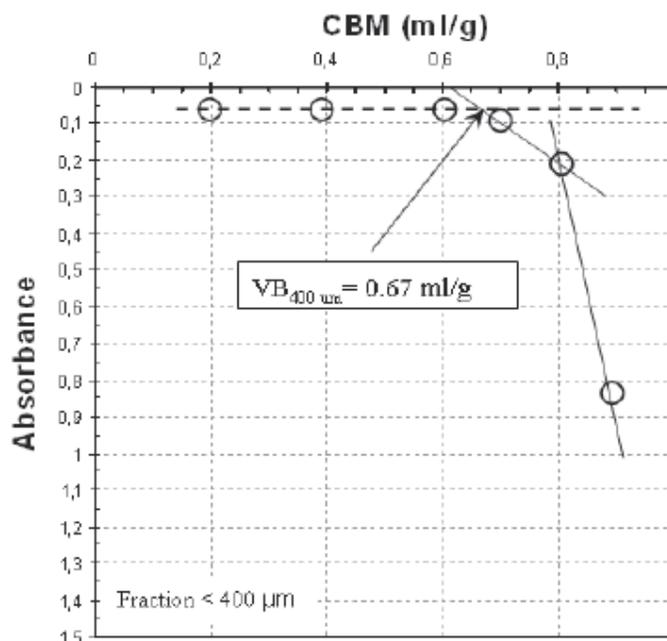


Figure 2 : Détermination de la valeur au bleu d'un sol par la méthode du spectrophotomètre

6. Essais sur les matériaux granulaires à l'étude

Selon la méthode d'essai LC 21-255, l'essai au bleu de méthylène est effectué sur la fraction des matériaux passant le tamis de $400\mu\text{m}$. Dans le cadre du présent projet, l'essai sera effectué sur les trois fractions composant le passant $400\mu\text{m}$, soit sur la fraction passant le tamis de $400\mu\text{m}$, la fraction passant le tamis de $160\mu\text{m}$ et sur la fraction passant le tamis de $80\mu\text{m}$. Parallèlement, l'essai de détermination de la valeur au bleu sera effectué pour tous les échantillons selon la méthode du spectrophotomètre, pour valider les valeurs au bleu obtenues à l'aide de la méthode conventionnelle.

Le tableau 2 présente les résultats de la valeur au bleu VB_{pf} obtenus par la méthode conventionnelle du papier filtre et les résultats de la valeur au bleu VB_s obtenus par la méthode du spectrophotomètre. On peut voir l'influence de la taille des particules sur la valeur au bleu, car plus la taille de particules augmente, plus la valeur VB_{pf} diminue. Ces résultats sont en accord avec la littérature.

Tableau 2 : Valeur au bleu des MG-20 selon la méthode conventionnelle (VB_{PF}) et selon la méthode du spectrophotomètre (VB_S).

Échantillon	VB_{PF} (ml/g)			VB_S (ml/g)		
	< 80 μ m	< 160 μ m	< 400 μ m	< 80 μ m	< 160 μ m	< 400 μ m
495003	0,95	0,88	0,64	0,77	0,68	0,51
433366	0,70	0,60	0,45	0,68	0,53	0,42
488898	0,55	0,33	0,20	0,32	0,22	0,11
260942	0,30	0,22	0,13	0,28	0,21	0,13
380160	0,35	0,32	0,18	0,24	0,17	0,13
463437	0,20	0,12	0,07	0,22	0,14	0,12
433374	0,25	0,14	0,07	0,18	0,11	0,06
331232	0,15	0,10	0,06	0,09	0,06	0,03

7. Analyse des résultats

Il est important de souligner le fait que la relation entre la surface spécifique, calculée à partir des valeurs VB_S , et le pourcentage relatif de particules fines < 80 μ m dans la prise d'essai (c.-à-d. 100 % pour la fraction < 80 μ m analysée, et une proportion quelconque pour les fractions < 400 μ m et < 160 μ m) est linéaire avec une ordonnée à l'origine qui varie selon le type de matériau granulaire (figure 3). Deux hypothèses peuvent expliquer un tel comportement. La première fait appel au degré « d'argilosité » de chaque matériau, suggérant que plus la quantité de minéraux argileux est importante, plus la valeur de l'ordonnée à l'origine est élevée. La seconde hypothèse est reliée à l'état d'altération ou d'endommagement de la surface des particules fines du MG-20 suggérant que plus le degré d'altération est important, plus la valeur de l'ordonnée à l'origine est élevée.

Les matériaux présentant une valeur de surface spécifique élevée (c.-à-d. $Ss_{<80\mu m} > 12\text{m}^2/\text{g}$) correspondent aux matériaux provenant de roches calcaires, alors que les matériaux ayant une valeur de surface spécifique faible (c.-à-d. $Ss_{<80\mu m} < 7\text{m}^2/\text{g}$) correspondent à des matériaux provenant de roches granitiques. L'influence du type de particules fines sur la valeur de la surface spécifique a été avancée dans plusieurs études. Des relations similaires ont été observées pour des tills (comme celui de Caniapiscau et celui de Péribonka) utilisés pour la construction des noyaux de barrage en remblai.

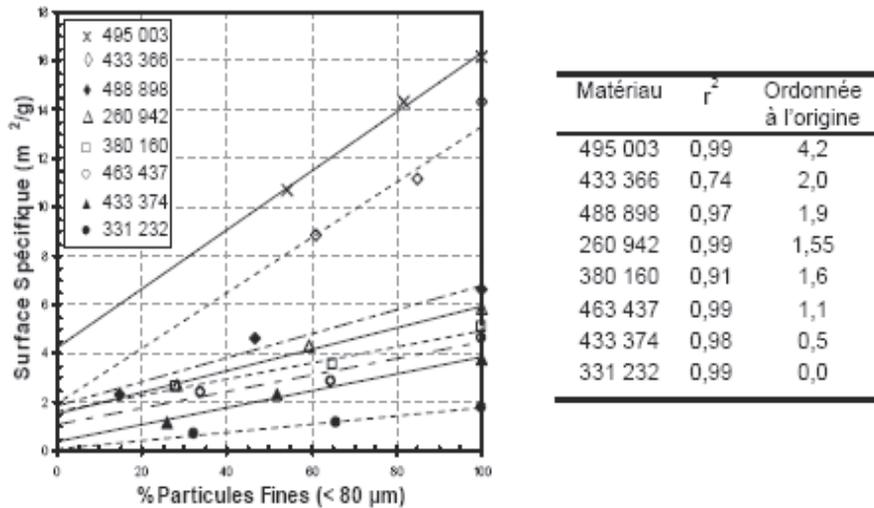


Figure 3 : Droites caractéristiques des MG-20 montrant la surface spécifique en fonction du pourcentage relatif des particules fines < 80µm

Pour obtenir de l'information sur la forme et l'état de surface des particules, des essais au microscope électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur les MG-20 et les tills. L'évaluation a été faite sur la fraction passant le tamis 400µm et retenue sur le tamis 160µm (400-160µm), ainsi que sur la fraction passant le tamis 80µm.

Sur les photos du MEB, on a mis en évidence l'existence de porosité intraminérale ainsi que des surfaces rugueuses et des fissures. Ce sont tous des facteurs conduisant à la surestimation de la surface spécifique réelle du matériau (figure 4).

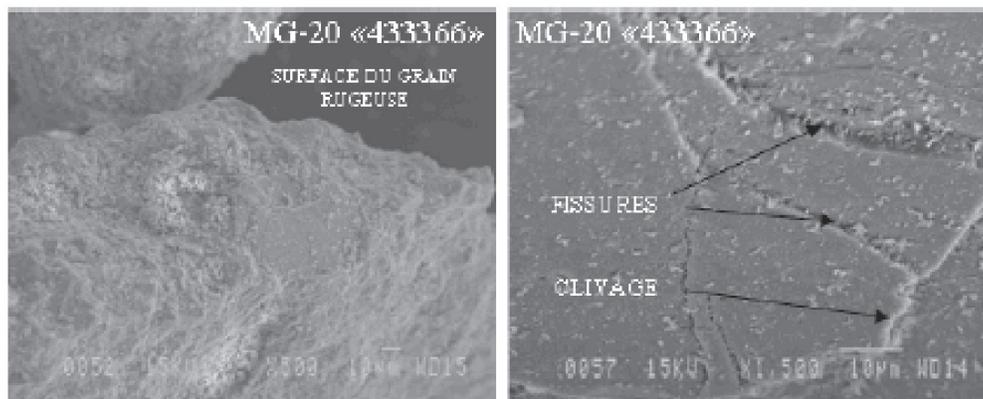


Figure 4 : Images au microscope électronique à balayage (MEB) pour le MG-20 # 433366

Sur la figure 5a), on peut observer le schéma d'un grain de matériau de $60\mu\text{m}$ de diamètre, qui présente des surfaces rugueuses, une porosité interne importante ainsi que des altérations superficielles causées par des agents atmosphériques. Le diamètre et la profondeur de ces irrégularités sont de l'ordre de quelques nanomètres à quelques microns, comme montré sur la figure 5b). Lorsque l'essai au bleu de méthylène est en cours, les molécules de bleu pénètrent dans les irrégularités des grains et peuvent recouvrir leurs surfaces internes en plusieurs couches. De plus, l'arrangement en plusieurs couches peut être ordonné ou désordonné (figure 5c), pouvant entraîner une surestimation de la surface spécifique des particules calculée à partir de la quantité de bleu de méthylène adsorbée sur ces dernières. Pour une particule fine qui adsorbe du bleu de méthylène, plus l'état de surface du grain est altéré, plus importante sera la surestimation de la surface spécifique, démontrant la nécessité de corriger la valeur de bleu de méthylène adsorbée par un matériau.

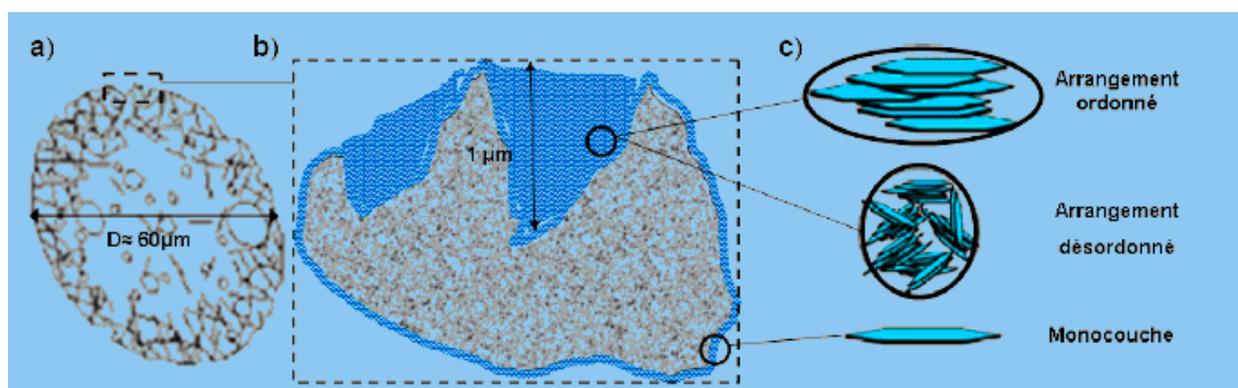


Figure 5 : a) L'état de surface d'un grain de matériau; b) Bleu de méthylène adsorbé dans les imperfections du grain; c) Arrangements possibles des molécules de bleu de méthylène

8. Correction de la valeur au bleu

Comme la perméabilité ou la gélivité des matériaux sont dépendantes de l'eau libre interstitielle, qui est reliée à son tour à la quantité d'eau adsorbée pour une porosité donnée, il est proposé de corriger la valeur de la surface spécifique de la fraction fine en effectuant une translation vers le bas de la droite caractéristique jusqu'à ce que l'ordonnée à l'origine devienne nulle. En d'autres termes, on élimine l'effet de l'endommagement des particules qui peut être causé par l'action des glaciers dans le cas des tills, ou par l'action du concassage dans le cas des matériaux granulaires comme le MG-20.

La figure 6 présente la méthode de correction de la surface spécifique en utilisant les données obtenues avec l'échantillon #495003. Les résultats factuels de la valeur au bleu ou de la surface spécifique pour les trois fractions différentes analysées sont représentés sous forme de carrés noirs. L'ordonnée à l'origine est égale à $4,2 \text{ m}^2/\text{g}$, ce qui correspond à une valeur au bleu VB_0 égale à $0,2 \text{ ml/g}$. La correction proposée correspond à la droite pointillée passant par l'origine et parallèle à la droite caractéristique des résultats bruts. Les carrés vides représentent les valeurs corrigées de

la surface spécifique pour les trois fractions étudiées. Pour la fraction passant le tamis de 400 μ m, la valeur au bleu passe donc de 0,51 ml/g à 0,31 ml/g.

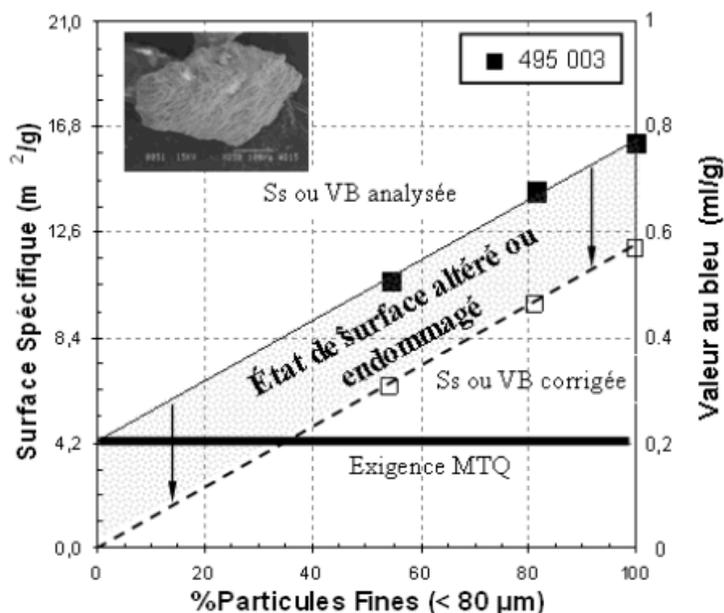


Figure 6 : Application de la méthode proposée pour corriger la surestimation de la surface spécifique

Le tableau 3 présente les valeurs au bleu corrigées pour la fraction passant le tamis 400 μ m pour les MG-20 étudiés, et les valeurs de surface spécifique corrigées des particules fines.

Tableau 3 : Valeurs au bleu corrigées des MG-20 à partir de la méthode du spectrophotomètre, et surfaces spécifiques calculées corrigées

Échantillon	VB _{<400μm} (ml/g)	VB _o (ml/g)	VB _{corr} (ml/g)	Ss _{analysées} (m ² /g)	Ss _{corrigées} (m ² /g)
495003	0,51	0,20	0,31	16,17	12,20
433366	0,42	0,09	0,33	14,28	11,50
488898	0,11	0,09	0,02	6,72	5,00
260942	0,13	0,08	0,05	5,88	4,40
380160	0,13	0,08	0,05	5,04	3,50
463437	0,12	0,05	0,07	4,62	3,50
433374	0,06	0,02	0,04	3,78	3,50
331232	0,03	0,00	0,03	1,89	1,89

9. Recommandations

Cette étude a révélé que pour des matériaux granulaires présentant des surfaces de particules endommagées, l'essai d'adsorption de bleu de méthylène donnait des valeurs au bleu qui ne pouvaient pas être corrélées avec des propriétés comme la sensibilité à l'eau ou la gélivité. Afin de raffiner les exigences du MTQ par rapport à cet essai dans les matériaux granulaires de type MG-20, il est recommandé de réaliser l'essai au bleu de méthylène sur deux fractions différentes du MG-20, soit la fraction $< 400\mu\text{m}$ et la fraction $< 80\mu\text{m}$. En utilisant les valeurs au bleu $VB_{<400}$ et $VB_{<80}$, on pourra déterminer la valeur VBo qui représente l'ordonnée à l'origine de la droite caractéristique $VB - \% \text{ relatif } < 80\mu\text{m}$.

Afin que le matériau soit acceptable du point de vue de la gélivité ou de la sensibilité à l'eau, on s'assurera que la valeur au bleu corrigée respecte l'exigence actuelle, où $VBC_{<400} \leq 0,2\text{ml/g}$. De plus, on pourrait également utiliser l'approche proposée par Konrad (2005) qui utilise la surface spécifique Ss de la fraction fine ($d < 80\mu\text{m}$) avec un critère à respecter qui serait $Ss_{\text{corr}} (< 80\mu\text{m}) \leq 5 \text{ m}^2/\text{g}$. Il est intéressant de noter qu'une valeur de la surface spécifique de $5 \text{ m}^2/\text{g}$ correspond à une valeur au bleu de $0,24 \text{ ml/g}$ pour la fraction fine $< 80\mu\text{m}$.

10. Conclusion

La présente étude a porté sur une nouvelle méthode pour la détermination de la valeur au bleu VB des matériaux granulaires de fondation MG-20 contenant une certaine proportion de particules fines $< 80\mu\text{m}$. La méthode de détermination de la valeur au bleu à l'aide d'un spectrophotomètre est prometteuse, car la méthode est simple et permet une meilleure standardisation de la mesure de la valeur au bleu VB ou de la surface spécifique active Ss effectuée par différents laboratoires d'analyse des matériaux. De plus, cet essai est rapide et peu coûteux; on peut considérer un investissement d'environ 3 000 \$ pour se doter d'un spectrophotomètre et d'une centrifugeuse.

Afin de caractériser davantage les particules fines dans les matériaux granulaires, une nouvelle façon d'interpréter les résultats de la valeur au bleu est proposée. L'analyse de trois différentes fractions d'un matériau granulaire soumis à l'essai de bleu de méthylène a permis de proposer une méthode de correction pour la valeur au bleu ou pour la surface spécifique obtenues lors des essais. La méthode de correction réduit l'influence de l'état de surface des grains et permet d'utiliser les caractéristiques de la fraction fine qui contrôle les propriétés reliées à la gélivité ou à la sensibilité à l'eau des MG-20.

Références

- Konrad, J.-M. 2005. *Frost Estimation of the Segregation Potential of Fine-Grained Soils using the Frost Heave Response of Two Reference Soils*. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 42(1): 38-50
- Hang, P.T., Bindley, G.W. 1970. *Methylene Blue Adsorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities (Clay-Organic Studies XVII)*. *Clays and Clay minerals*, 18: 203-212

Recherche sur le statut de paysage humanisé au Québec

Par Denis Stonehouse, architecte paysagiste,
Service de l'environnement et des études d'intégration au milieu, MTQ

Contexte

Depuis décembre 2005, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a participé à la recherche intitulée *Mise en place et cadre de gestion du statut de paysage humanisé au Québec* (R557.1). Cette recherche a été menée par la Chaire en paysage et environnement de l'Université de Montréal (CPEUM). Outre la CPEUM, le MTQ s'est alors joint à quelques autres partenaires, soit : le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), le ministère des Affaires municipales et des Régions, le ministère de la Culture, des Communications et de la Condition féminine, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, et Hydro-Québec.

L'intérêt pour ce sujet tire son origine de la décision du gouvernement du Québec, en mai 2000, de se doter d'une stratégie et d'un plan d'action sur les aires protégées. Le Conseil des ministres a alors fixé comme objectif quantitatif la protection de 8 % de la superficie du Québec tout en adoptant l'objectif qualitatif que le réseau des aires protégées soit représentatif de la diversité biologique du Québec. Cependant, aucune aire ne représentant spécifiquement la biodiversité anthropique, le gouvernement a été amené à créer un statut à cet effet. C'est ainsi que le statut de paysage humanisé a été introduit dans la Loi sur la conservation du patrimoine naturel (L.R.Q., chapitre c-61.01) (LCPN) adoptée en 2002.

Cette loi, sous la responsabilité du MDDEP, définit ce nouveau statut comme suit : « une aire constituée à des fins de protection de la biodiversité d'un territoire habité, terrestre ou aquatique, dont le paysage et ses composantes naturelles ont été façonnés au fil du temps par des activités humaines en harmonie avec la nature et présentent des qualités intrinsèques remarquables dont la conservation dépend fortement de la poursuite des pratiques qui en sont à l'origine ».

Cette définition est compatible avec la catégorie V de l'Union mondiale pour la nature (UICN) parmi les six catégories qu'elle a établies pour les aires protégées. La classification en cause est basée sur le degré de modification de l'environnement par l'homme. Pour la catégorie V, l'accent a été mis sur l'interaction entre les activités humaines et la nature. Un rapprochement particulier avec le concept de développement durable y est manifeste.

Un aspect important de la reconnaissance et de l'officialisation du nouveau statut sera la volonté exprimée par le milieu et sa participation. Il en découle qu'un des défis de la mise en place d'un paysage humanisé sera celui de sa prise en charge locale (de prime abord, municipalités et municipalités régionales de comté [MRC]). Toutefois, les municipalités et les MRC ne pouvant agir qu'à l'intérieur de leur compétence, une adhésion des différents autres acteurs visés sera nécessaire lorsque cela concerne des activités sur lesquelles ils ont autorité. Ce faisant, la concrétisation d'un paysage humanisé nécessite une bonne concertation et devient aussi une excellente occasion d'appliquer des principes de développement durable.

Déroulement

La recherche a comporté trois volets qui ont été menés de manière presque simultanée. Le premier volet a porté sur la concertation des partenaires de la recherche. Le deuxième volet en a été un de documentation, d'accompagnement et de prospective sur l'implantation et la gestion des paysages humanisés. Enfin, le troisième volet a permis l'analyse des outils de gestion.

Il est utile de signaler aussi qu'un projet pilote principalement axé sur l'inventaire d'un territoire et la préparation d'un dossier de candidature au statut de paysage humanisé a eu lieu dans le cadre du deuxième volet. Le cas traité est celui de l'Estran en Gaspésie. Ce territoire renferme les municipalités de Sainte-Madeleine-de-la-Rivière-Madeleine, Grande-Vallée, Petite-Vallée et Cloridorme. Trois autres territoires faisant partie de Charlevoix, de la MRC de La Vallée-de-la-Gatineau et de la MRC de Memphrémagog ont aussi été documentés. L'apport de l'information recueillie et des constats posés a permis d'approfondir la réflexion sur la mise en œuvre du statut en prenant ces endroits comme des paysages humanisés potentiels.



Figure 1 : L'Estran dans le secteur de Cloridorme en Gaspésie
(source : Transports Québec DBGI 2005-07)

En ce qui concerne le troisième volet, l'analyse a couvert plus particulièrement la conservation de la biodiversité en milieu habité, l'évaluation des dispositifs de maintien des activités, ainsi que l'arrimage réglementaire et administratif. Le contenu du rapport final concerne essentiellement ce volet.

Au cours de la recherche, des membres de l'équipe et des professionnels représentant les divers partenaires se sont réunis à quelques occasions. Cela a permis de faire le point et de discuter des résultats obtenus. Pour le MTQ, un suivi plus spécifique a été effectué en régie en collaboration avec des professionnels et un technicien des directions territoriales du Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine, de la Capitale-Nationale, de l'Outaouais, de l'Estrie, ainsi que de la Direction du soutien à l'exploitation des infrastructures et de la Direction des parcs routiers.

Rapport final

Le rapport final (Domon, 2007) a été achevé en novembre 2007. Il est divisé en trois parties, soit : la partie 1 – Enjeux et défis; la partie 2 – Protection de la biodiversité et maintien d'activités; et la partie 3 – Mise en œuvre. L'ensemble de ces parties contient au total six chapitres.

Dès l'introduction, les auteurs soulignent l'événement significatif en matière de conservation de la diversité biologique, d'aménagement du territoire et de développement durable, que constitue selon eux l'instauration du statut de paysage humanisé dans la LCPN. Ils dressent ensuite un portrait du contexte et du déroulement de la recherche dont il a déjà été question précédemment.

Il est indiqué, en particulier, que « la spécificité d'un Paysage humanisé par rapport aux autres catégories d'espaces protégés tient principalement à la présence de communautés et d'activités humaines sur le territoire. Elle réside non seulement dans la complémentarité entre ses objectifs de protection et de développement d'un territoire habité, mais aussi dans l'engagement volontaire de l'ensemble des partenaires (privés et publics, acteurs locaux et ministères) à appliquer un projet de protection » (Domon, 2007 : 2).

Le chapitre 1 traite des enjeux et des défis liés à la catégorie V de l'UICN et au contexte québécois. Il est fait état de la « reconnaissance récente du caractère indissociable de la nature et de la culture » (Domon, 2007 : 5). Cela positionne bien le paysage comme porteur de cette interprétation tout en favorisant une approche intégrée pour la protection du territoire. Cependant, il ne s'agit pas ici d'en figer l'aménagement. C'est plutôt une occasion d'opter pour une démarche dynamique et concertée.

Le chapitre 2 concerne la nature et la pertinence de la prise en compte de la biodiversité des paysages humanisés. Le succès de ces aires dépend de ceux qui l'occupent. Il faut y concilier les activités humaines et le maintien de la diversité biologique. La sensibilisation de ces occupants paraît primordiale. Le besoin de développer des connaissances est également souligné.

Le chapitre 3 approfondit le sujet du maintien des activités. Il ne s'agit pas simplement de poursuivre certaines activités, mais d'en élaborer aussi de nouvelles. Chaque activité doit être viable tout en étant compatible avec l'objectif de protection de la biodiversité et le projet de paysage humanisé. L'appui des intervenants gouvernementaux est aussi jugé très important.

À la section 3.3, une attention particulière est portée à l'agriculture. À l'intérieur d'un paysage humanisé, le développement d'une agriculture en harmonie avec le territoire est une orientation importante. Cette activité ne doit pas être isolée. Ses effets sur le paysage, le patrimoine et le tourisme notamment doivent être considérés.

Le chapitre 4 est le premier de la partie sur la mise en œuvre du statut de paysage humanisé. Il décrit le diagnostic paysager préconisé. Il s'agit en fait d'une proposition sous la forme d'une « boîte à outils », c'est-à-dire une série de méthodes optionnelles décrites brièvement pour inventorier les caractéristiques pertinentes du territoire et les analyser afin de révéler les qualités et les dynamiques présentes. Les méthodes particulières retenues doivent faciliter l'établissement d'une vision commune de l'avenir du territoire. On peut parler ici plus spécifiquement d'un projet de paysage, donc élaboré en respectant une approche paysagère, et le statut de paysage humanisé s'y prête très bien.

Le chapitre 5 aborde les principes de gestion et d'organisation. Il y est question d'abord d'un processus de planification et de gestion à la fois « participatif, itératif, adaptable, flexible et cohérent » (Domon, 2007 : 45). Ce processus en est un de planification stratégique territoriale. L'exemple du comté d'Haliburton en Ontario est brièvement présenté. Sur le plan de l'organisation, l'initiative locale est déterminante. La collaboration d'intervenants extérieurs sera aussi un facteur important. Selon le paysage humanisé, les statuts, les rôles et les fonctions de l'organisme de gestion seront à définir en fonction du contexte. Pour illustrer cet aspect, une référence est faite aux parcs naturels régionaux français.

En dernier lieu, le chapitre 6 approfondit la planification et les moyens d'action. Un survol est fait des outils utilisés en urbanisme et en aménagement du territoire afin de voir leur utilité potentielle par rapport au statut de paysage humanisé. La création d'un paysage humanisé impose le passage au travers de plusieurs étapes de planification qu'il s'agisse de la préparation d'une demande de reconnaissance, d'un plan de conservation ou d'une convention de protection. La figure 2 montre le cheminement rattaché à ce statut. D'après la LPCN, une conformité est requise entre le paysage humanisé et le schéma d'aménagement et de développement de la MRC en cause. C'est donc dire qu'une intégration devra être faite dans ce schéma, très probablement au moment de sa révision.

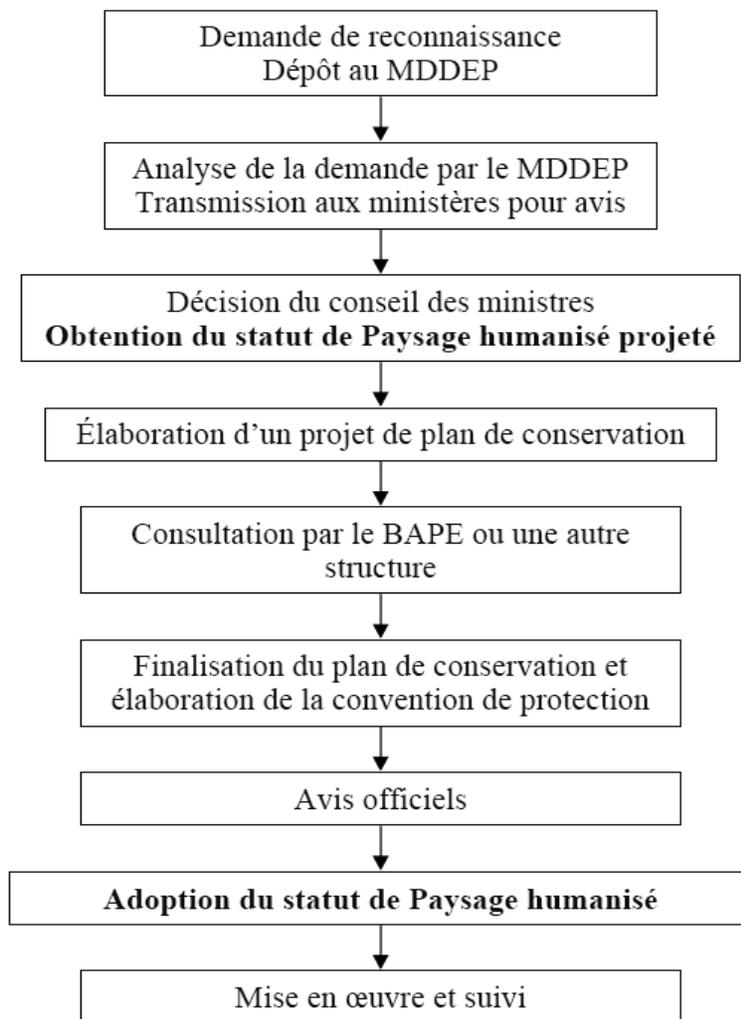


Figure 2 : Les étapes menant à l'obtention du statut de paysage humanisé
(Domon, 2007 : 52)

Incidence pour le MTQ

Il est intéressant de noter que plusieurs modes d'intervention du MTQ paraissent exemplaires et très compatibles de prime abord avec le statut de paysage humanisé. *La Méthode d'analyse visuelle pour l'intégration des infrastructures de transport* mise au point au MTQ durant les années 1980 est d'ailleurs citée comme une méthode éprouvée pour la caractérisation visuelle des paysages. La gestion écologique de la végétation, la restauration d'habitats fauniques, l'entretien des fossés routiers par la méthode du tiers inférieur, l'appui au patrimoine culturel dans le cas des ponts couverts et plusieurs mesures d'atténuation entourant la réalisation de projets routiers sont des pratiques pouvant être considérées comme très positives dans le contexte de la mise en place et de la gestion d'un paysage humanisé.

Le MTQ pourrait être appelé à jouer un rôle là où la situation se présentera en fonction de l'opération et de l'aménagement des infrastructures de transport, en particulier sur le réseau routier, sous sa responsabilité. Il s'agira d'un engagement volontaire et au niveau qu'il consentira dans le cadre d'un plan de conservation et d'une convention de protection du territoire visé. Dans ce cas, il pourrait avoir à valider ou à adapter certaines de ses pratiques sur ce territoire. Le MTQ dispose cependant d'une bonne base et d'une expérience concrète très utile en matière de protection de l'environnement et de développement durable. Un paysage humanisé peut être une bonne occasion pour lui de mettre en valeur ses programmes, comme celui sur les villages-relais, tout en contribuant au maintien de la biodiversité d'origine anthropique et à la qualité du paysage.

Conclusion

L'introduction du statut de paysage humanisé dans la LCPN est un événement important. C'est la première fois que le terme « paysage » est inscrit dans une loi québécoise. Cela offre une occasion de réfléchir davantage aux enjeux que cette notion soulève. Cela survient également à une époque où à l'échelle internationale, à travers la notion de biodiversité anthropique, un nouvel intérêt se manifeste envers la sauvegarde de situations représentatives des relations entre l'homme et la nature.

Pour lancer et réaliser un projet de paysage humanisé, il n'y a pas une façon unique d'y parvenir. Les chercheurs insistent sur cet aspect. Il faudra suivre un processus à définir propre à chaque cas pour bien maîtriser les données utiles sur la connaissance du territoire visé, les activités qui s'y déroulent, la biodiversité présente, de même que pour bien le planifier et le gérer. Le rapport final propose en somme un cadre général pour amener la réflexion plus loin tout en indiquant quelques outils utiles. La publication d'un livre aux Presses de l'Université de Montréal, contenant une information encore plus complète sur le sujet, est prévue au cours de l'automne 2008.

Actuellement, aucun territoire n'a reçu le statut de paysage humanisé. La désignation dépendra de la qualité de la demande de reconnaissance que produira l'organisme initiateur et des ressources qui pourront être consacrées au projet. L'initiative locale sera déterminante. Le rôle des acteurs interpellés, en particulier les ministères, sera également majeur. Le but d'un projet de paysage humanisé devra bien servir le milieu en cause. C'est pourquoi la sensibilisation, la concertation et la collaboration constitueront des facteurs primordiaux. Il s'agira d'une très bonne occasion d'expérimenter les principes du développement durable.

Références

DOMON, Gérald (dir.). *Analyse des moyens existants afin de mettre en œuvre le concept de Paysage humanisé tel que défini dans la Loi sur la conservation du patrimoine naturel. Projet de recherche. Rapport final*, Montréal, Université de Montréal, Chaire en paysage et environnement, 2007, 73 p.

QUÉBEC. *Loi sur la conservation du patrimoine naturel : L.R.Q., chapitre c-61.01, à jour au 1^{er} août 2008*, [En ligne]

www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/C_61_01/C61_01.htm] (consulté le 14 août 2008)

TRANSPORTS QUÉBEC. *Titre du projet : Mise en place et cadre de gestion du statut de paysage humanisé au Québec*, [En ligne], c2007

www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/projet_recherche/description.asp?NO_PROJ=R557.1P1
(consulté le 14 août 2008)