

**Comportement de fondations stabilisées au ciment  
et au bitume dans un climat froid**

Nadia Pouliot, Yves Savard, Kate De Blois  
Ministère des transports du Québec, Québec, Canada  
et

Michel Boutonnet  
Consultant pour le Laboratoire des Ponts et Chaussées, Besançon, France

Exposé préparé pour la séance :  
***Essais accélérés des chaussées in situ et en laboratoire***

du congrès annuel 2004 de  
l'Association des transports du Canada  
Québec (Québec), 19-22 septembre 2004

## Résumé

Un projet de collaboration franco-qubécois entre le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le ministère des Transports du Québec (MTQ) a mené à la conception, à la construction et au suivi rigoureux du comportement dans le temps de quatre sections de route expérimentales implantées en territoire québécois. Le projet a pour principal objectif la validation et l'amélioration des méthodes française et québécoise de conception de chaussées en conditions de gel sévère et, plus particulièrement, le calage des modèles d'endommagement à partir des dégradations observées sur les sections expérimentales. Le dimensionnement a été prévu afin d'observer un endommagement dans un court délai de trois ans.

Cet article présente une description du site expérimental et du programme de collecte de données mis en place en 1998 pour suivre la performance des sections d'essais ainsi que les résultats à ce jour, en mettant en lumière les différences de comportement, dans un climat rigoureux, entre une chaussée en enrobé bitumineux et une chaussée comportant une assise en grave-ciment.

Les planches en grave-ciment ont montré dès la première année des fissures transversales correspondant aux pré-fissures et des fissures en piste de roues liées à un endommagement par fatigue, tandis que les planches en enrobé bitumineux ne présentent aucune fissure après cinq ans.

Dans le contexte climatique québécois, l'utilisation d'une grave stabilisée avec un fort pourcentage de ciment offre peu d'avantages comparativement à une chaussée souple conventionnelle. La stabilisation de fondations constituées de matériaux neufs ou recyclés avec un liant mixte composé d'une émulsion bitumineuse et d'une faible quantité de ciment présente un fort potentiel d'utilisation sur les chaussées à trafic élevé.

## 1. Introduction

En conditions de gel sévère, une structure de chaussée doit être conçue de façon à résister aux contraintes qui lui sont transmises sous l'effet du trafic et satisfaire aux critères de protection contre les effets du gel et du dégel. Les effets du gel peuvent être considérables : fissuration de retrait thermique des matériaux liés, soulèvements au moment du gel et perte de portance au moment du dégel (1), (2), (3), (4) et (5). Compte tenu de l'évolution des méthodes de dimensionnement et de l'absence d'hivers exceptionnels en France, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de France et le ministère des Transports du Québec (MTQ) ont engagé en 1998 un projet de collaboration ayant pour objectif d'optimiser leur méthode de dimensionnement des chaussées au gel-dégel (6) et (7). Deux types de chaussées – les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques et les chaussées en enrobé bitumineux – ont été retenus pour la construction d'un site expérimental au Québec.

Les principaux objectifs du projet de collaboration sont les suivants :

- Valider, raffiner et comparer les méthodes de conception française et québécoise au regard de la tenue au gel des chaussées soumises à des hivers rigoureux (8) et (9);
- Prévoir la propagation des phénomènes de gel et de dégel et du gonflement associé en fonction des caractéristiques thermiques des matériaux de chaussées et du sol suivant le climat (10);
- Préciser les modèles d'endommagement en fatigue à partir des propriétés mécaniques des matériaux de chaussées et du sol support en fonction du trafic et par la suite caler les modèles sur l'apparition des dégradations sur les planches d'essai (11);
- Améliorer les techniques d'auscultation et d'instrumentation *in situ* et l'interprétation des résultats;
- Observer le comportement de chaussées comportant une couche de base en grave-ciment préfissurée dans les conditions climatiques et d'exploitation hivernales propres au Québec.

Cette communication présente une description du site expérimental et du programme de collecte de données mis en place en 1998 pour suivre la performance des sections d'essais. Les résultats issus de l'instrumentation et des relevés *in situ* sont énoncés, puis analysés, en mettant en lumière les différences de comportement, dans un climat rigoureux, entre une chaussée souple ayant un revêtement en enrobé bitumineux couramment utilisée en France et au Québec et une chaussée en grave-ciment couramment utilisée en France et très peu au Québec.

## 2. La stabilisation des fondations de chaussées aux liants hydrauliques

Les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques (graves-ciments), d'une épaisseur supérieure à 250 mm et répondant aux critères de la méthode rationnelle de dimensionnement, ont recommencé à être largement utilisées en France à partir de 1975 (12). Les graves-ciments sont composées de granulats neufs de diamètre inférieur à 20 mm. Elles sont malaxées en centrale et contiennent généralement de 3 à 4,5 % de ciment en masse de matériaux secs. Un retardateur de prise est également ajouté à l'eau de gâchage afin d'augmenter le délai de maniabilité et améliorer la mise en œuvre. Les graves-ciments sont le plus souvent recouvertes d'une épaisseur relativement mince d'enrobé bitumineux (60 à 150 mm).

La principale dégradation observée sur une chaussée en grave-ciment est la fissuration transversale sous l'effet du retrait de prise et du retrait thermique (12). La méthode de dimensionnement française prend en compte la présence inévitable de ces fissures transversales par une augmentation des contraintes en bord de fissures. Les facteurs influençant la fissuration de retrait des graves-ciments sont les suivants : nature et granulométrie des granulats, nature et dosage du liant, période de mise en œuvre, climat annuel, trafic, épaisseur et nature de l'enrobé bitumineux de surface. Les graves-ciments non préfissurées montrent un espacement entre les fissures transversales se formant de façon naturelle qui varie entre 5 à 10 m. Il existe des techniques de préfissuration, telles que le découpage d'entailles à la surface de la couche, les joints à l'émulsion de bitume et les joints ondulés, qui permettent de localiser et de contrôler l'ouverture des fissures, à des espacements inférieurs à 5 m. Ces préfissures sont scellées une fois qu'elles remontent à la surface de la couche de roulement. Plusieurs autres techniques peuvent également retarder la remontée des fissures dans la couche de roulement bitumineuse, dont très peu s'avèrent efficaces pour les graves-ciments compte tenu des mouvements thermiques importants aux joints (13).

On caractérise une grave-ciment par son module élastique, sa résistance à la traction et son comportement à la fatigue. La rigidité élevée de la couche en grave-ciment limite considérablement les contraintes verticales de compression transmises au sol support, pourvu que l'on contrôle l'ouverture et la sévérité des fissures transversales. Toutefois, la grave-ciment est particulièrement sensible aux passages répétés des véhicules et à l'endommagement par fatigue (12). La contrainte horizontale en traction à la fibre inférieure de la couche rigide est déterminante pour le dimensionnement d'une telle chaussée. C'est pourquoi les épaisseurs de grave-ciment maintenant utilisées en France sont supérieures à 250 mm. De façon générale, pour supporter un nombre de cycles de chargement égal à un million, le rapport de la contrainte de chargement ( $\sigma_6$ ) sur la résistance à la traction statique ( $\sigma_0$ ) doit être inférieur à 0,50. La durée de vie de la grave-ciment est très sensible à une variation de son épaisseur et de son degré de compacité.

Au Québec, les fondations stabilisées au liant hydraulique sous un revêtement souple ont été très peu utilisées. En plus du site expérimental de Saint-Célestin, on note deux expériences de retraitement du revêtement et stabilisation *in situ* de la fondation avec du ciment Portland réalisées en 1996 et en 1998 sur des routes sollicitées par des véhicules lourds (14) et (15). Dans les deux cas, les matériaux pulvérisés étaient constitués de l'ancien enrobé bitumineux et d'une partie de la fondation granulaire en proportions égales. La quantité de ciment, incorporée en place sous forme de coulis, variait de 7 à 9 % par rapport à la masse de matériaux secs. Quatre ans après la mise en service, on comptait plusieurs fissures longitudinales associées à une rupture en fatigue du matériau stabilisé ou à une faiblesse des joints longitudinaux entre les passages de l'engin de retraitement. On observait également plusieurs fissures transversales (espacées de 10 m à 17 m) apparues dès les premières années et liées au retrait de prise et au retrait thermique du matériau cimentaire et affectant significativement la qualité de roulement. Des relevés sous chargement dynamique montraient de faibles déformations comparativement à une chaussée souple standard mais très variables le long des sections. Cette variabilité a été attribuée à l'hétérogénéité des matériaux retraités et à la difficulté de contrôler avec précision le débit de coulis injecté. On a constaté que la perte de portance au dégel demeurait relativement faible (15).

Sur le réseau routier du MTQ, les liants le plus souvent utilisés lors du retraitement en place ou en centrale des chaussées sont les émulsions de bitume additionnées d'une faible quantité de ciment ou de chaux (0,8 à 1,5 % en masse de matériaux secs) (16). Le matériau cimentaire permet de réduire la période de mûrissement de l'émulsion et d'augmenter l'apport structural des matériaux traités. Le module élastique des fondations traitées au liant mixte est généralement de 2,0 à 5,0 fois plus élevé que pour le même matériau non stabilisé, selon la teneur en ciment et l'épaisseur stabilisée. L'ajout de ciment améliore aussi significativement les propriétés mécaniques en conditions saturées. Sur la base des résultats des suivis de performance, une teneur en ciment inférieure à 1,5 % en masse de matériaux secs n'entraîne pas de fissuration par retrait de prise et retrait thermique (formation prématurée de fissures transversales).

### **3. Description du site expérimental**

#### 3.1. Caractéristiques locales

Le site expérimental a été construit sur la route nationale 155 à Saint-Célestin, Québec, Canada. Il s'agit d'une route à deux voies contiguës. Le site est localisé dans la plaine du fleuve Saint-Laurent à environ 100 kilomètres au nord-est de Montréal (figure 1). La route 155 a été retenue en raison de l'homogénéité du site, de la présence de sols sensibles au gel (sable silteux reposant sur une argile) et de signes d'endommagement par fatigue sur l'ancienne chaussée. Elle est soumise à un climat rigoureux (indice de gel moyen de 1150 °C-jour) et supporte un trafic lourd important (750 poids lourds/jour/sens). Des études avant-projet ont permis de caractériser la portance du sol support, son niveau de gélivité, les conditions de drainage, les conditions climatiques, l'intensité du trafic prévu ainsi que les propriétés et la composition des enrobés et de la grave-ciment à réaliser (6).

#### 3.2. Sections d'essais

Les planches expérimentales ont été construites par demi-chaussée en maintenant une voie pour la circulation du trafic. L'ancienne chaussée a été excavée jusqu'à la profondeur désirée pour mettre en place les couches constituant les planches expérimentales (figure 2). La couche de roulement de l'ensemble des planches est en enrobés bitumineux de granulométrie 0/10 mm (EB10S). La planche 1 a une couche de base en enrobés bitumineux de granulométrie 0/20 mm (EB 20). De conception québécoise, elle sert de section témoin. La planche 2 a une structure similaire à la planche témoin avec, en plus, un isolant thermique.

Les deux autres planches, de conception française, ont une couche de base en grave-ciment (GC). L'une est isolée thermiquement (planche 3), l'autre non (planche 4). L'isolant thermique a été incorporé pour permettre d'isoler les effets du trafic de ceux liés au gel-dégel du sol d'infrastructure. La couche de base en grave-ciment est fabriquée en centrale de type discontinu par le mélange de ses composants (granulats concassés 0-5 mm et 5-20 mm, 3,5 % en poids de ciment Portland de type 10, 1,9 % du poids de ciment en stabilisateur d'hydratation et 1,5 % en poids d'eau ajoutée). La grave-ciment a été préfissurée transversalement avec un pas de 2,5 m sur 50 à 60 % de son épaisseur afin de contrôler la fissuration de retrait thermique. Les préfissures ont été réalisées après 10 passes de rouleau vibrant (deux tiers de l'énergie de

compactage) au moyen d'un trait de scie et la fente a été remplie d'une émulsion de bitume cationique pour empêcher la prise. Les préfissures remontées à la surface ont fait l'objet d'un scellement sans fraisage au moyen d'un produit à base de bitume modifié posé à chaud dès leur apparition (9).

L'isolant thermique utilisé est composé de deux couches de polystyrène extrudé en plaques de 25 mm d'épaisseur. La couche de fondation de l'ensemble des planches est en matériaux granulaires 0/20 mm (MG 20). Le fond de coupe est constitué de sable de sous-fondation laissé en place reposant sur un massif de sol naturel argileux.

Les constituants des matériaux de chaussée, la fabrication de ceux-ci et leur mise en œuvre ont été contrôlés très rigoureusement (10) et (11). Les contrôles en relation avec le comportement thermique des chaussées ont porté sur :

- la nature minéralogique des granulats et la mesure de leur masse volumique maximale,
- la composition des enrobés EB 10S et EB 20 et en particulier leur teneur en bitume,
- la composition des graves-ciments et en particulier leur teneur en eau, en ciment et en retardateur de prise,
- la mesure des masses volumiques en place et des teneurs en eau de chacune des couches de chaussée (EB 10S, EB 20, grave-ciment, MG 20, sable de sous-fondation) et du fond de coupe,
- la mesure de l'épaisseur des couches de chaussée et des couches sous-jacentes.

L'état initial de l'état des chaussées (point zéro) a été réalisé un mois après leur mise en service (11). Il a comporté l'exécution du carottage des couches de chaussée liées. Les mesures effectuées sur les prélèvements carottés ont permis de valider l'épaisseur des couches et leur composition. Des forages destructifs ont également été faits pour valider l'épaisseur des couches non liées et la position des couches de polystyrène extrudé.

#### **4. Collecte des données**

Lors de la construction, chacune des planches expérimentales a été munie d'un ensemble de capteurs afin de suivre de façon périodique le comportement de la chaussée et de ses différentes couches (17) et (18). Les planches sont équipées de gélomètres pour suivre la progression du front de gel-dégel, de piézomètres pour déterminer la position de la nappe phréatique, de thermistances pour la mesure de la température, de sondes pour mesurer la teneur en eau volumique de type *Time-Domain Reflectometry* (TDR) et de repères de soulèvement. Sur les planches non isolées en grave bitume et en grave-ciment, se sont ajoutés des déflectomètres multiniveaux qui permettent de connaître la déflexion de chacune des couches (19). La planche non isolée en grave bitume a également été équipée de jauges de déformation longitudinale et transversale à la base de la couche liée (20). Des sondes reliées à un système d'acquisition de données en continu ont également été ajoutées sous la planche 1 pour mesurer la teneur en eau dans les différentes couches (Theta-Probe) et les températures (thermistances) jusqu'à grande profondeur (10,5 m). Une station météo et une station de pesage en marche du trafic complètent l'instrumentation du site.

Un programme annuel détaillé de relevés et d'observations du comportement des planches expérimentales est en cours depuis la mise en service. Il comprend des mesures de déformabilité de la structure de chaussée en période estivale, automnale, de dégel et de récupération à l'aide des appareils suivants : *Falling Weight Defletometer* (FWD), inclinomètre, ovalisation, déflectomètres multiniveaux et jauges de déformation. Une cartographie détaillée de la fissuration ainsi que des mesures de profondeur d'ornières, de l'uni longitudinal (indice IRI), de la profondeur de gel et des soulèvements sont également effectuées périodiquement.

## **5. Présentation des résultats expérimentaux**

### 5.1. Fissuration de retrait thermique

Les fissures transversales sont apparues seulement sur les planches en grave-ciment (figure 3). Ces fissures correspondent au retrait thermique de la grave-ciment puisqu'elles font leur apparition en période hivernale. Elles sont localisées uniquement au droit des préfissures (figure 4). Après cinq ans de suivi, il y a 75 % des préfissures qui sont remontées en tout ou en partie à la surface sur la planche 3 et 95 % sur la planche 4. La longueur totale des fissures remontées à la surface représente environ 60 % des 600 m de préfissures de la grave-ciment (planches 3 et 4). Elles apparaissent sur une partie de la chaussée pour se propager ensuite sur toute la largeur.

L'ouverture des préfissures est généralement de 1 à 2 mm. Cela permet l'enchevêtrement des granulats et assure un transfert de charge adéquat entre les parois de la préfissure. Le transfert de charge a été évalué au FWD (21). Les résultats sont présentés sur la figure 5. On note que le transfert de charge est dans la plupart des cas supérieur à 70 % après trois ans. On remarque également une diminution du transfert de charge d'environ 10 % par année.

### 5.2. Fissuration de fatigue

Les fissures de fatigue sont apparues seulement sur les planches en grave-ciment (figure 6). Les fissures se sont développées préalablement sur la planche 4 non isolée et plus rapidement dans la direction 2 qui correspond à la voie la plus chargée. Les fissures de fatigue totalisent 254 m sur la planche 4 alors qu'elles ne font que 48 m sur la planche 3 isolée. Les fissures sont apparues en premier aux endroits où les déflexions étaient les plus élevées (secteurs B et C) lors de la mise en service des planches expérimentales (figure 7).

Le dimensionnement de la planche 1 par le MTQ correspond à celui d'une route nationale urbaine. La conception a pris en compte un trafic de 7,436 millions d'équivalent de charge axiale simple (ÉCAS) et une variation de l'indice d'aptitude au service «*Present Serviceability Index*» (PSI) d'une valeur de 2,0 pour une période de quinze ans (8). Le LCPC a dimensionné les planches non isolées pour que leur endommagement soit apparent après trois ans de circulation (8). Un risque de calcul de 25 % a été retenu, correspondant à l'ordre de grandeur observé lors de l'apparition des premières dégradations en surface, pendant des expérimentations sur le manège de fatigue du LCPC (installation pour essais routiers accélérés en vraie grandeur).

L'étude préalable effectuée par le LCPC s'appuyant sur une perte de portance élevée du sol support gélif au dégel (module divisé par 10) prévoyait que l'endommagement après trois ans de

circulation devait atteindre 1,7 sur la planche 4 et 0,66 sur la planche 1. La valeur d'endommagement de 1 correspondant à l'apparition des premières dégradations devait donc être atteinte après un an et demi à deux ans de circulation sur la planche 4 (GC) et après cinq ans sur la planche 1 (EB). Quant aux planches isolées, l'endommagement correspondant à l'apparition des premières dégradations devait être atteint après quatre ans sur la planche en grave-ciment et après vingt-sept ans sur la planche en enrobé bitumineux.

L'observation des dégradations sur les planches expérimentales montre que les premières dégradations de fatigue sont apparues sur la planche 4 après un an de circulation et qu'elles affectaient toute la longueur de la planche après trois ans et demi. Sur la planche 3, les premières dégradations sont survenues après un an dans la direction 1 et après trois ans dans la direction 2. Elles n'affectent toutefois que 25 % de la longueur de piste de roues après cinq ans. Enfin, aucune dégradation de fatigue n'est apparue sur les planches 1 et 2 après cinq ans.

### 5.3. Qualité de roulement estivale

Le profil longitudinal de la chaussée, représenté par l'indice international de rugosité «*International Roughness Index*» (IRI), permet d'évaluer le degré de confort au roulement et de caractériser l'uni de surface (figure 8). Aucune augmentation notable de l'indice IRI estival n'est noté pour les planches 1 et 2 depuis la mise en service, avec une valeur moyenne de 1,3 m/km. Le comportement est similaire dans les deux directions. L'IRI initial est supérieur sur les sections en grave-ciment par rapport aux sections en enrobé bitumineux. De plus, sur les planches en grave-ciment, l'IRI a augmenté significativement depuis la mise en service.

### 5.4. Ornières

La mesure des ornières est un indicateur du comportement structural de la chaussée. Sur les planches 1 et 2 en enrobé bitumineux, la profondeur des ornières atteint une moyenne de 7 mm sur la planche 1 et de 6 mm sur la planche 2 (figure 9). Cela correspond à une augmentation annuelle de l'ordre de 1,3 mm. Les planches 3 et 4 en grave-ciment montrent de plus faibles augmentations avec une valeur moyenne des ornières après cinq ans de 4 mm, ce qui représente une augmentation annuelle de 0,8 mm.

### 5.5. Module réversible du sol support

Les relevés effectués avec le FWD ont été utilisés pour analyser la variation saisonnière du module réversible du sol d'infrastructure subissant les cycles de gel et de dégel. Ce module a été calculé à rebours (rétrocalcul) à l'aide du programme révisé CHEVLAY2 basé sur la théorie élastique linéaire d'un système multicouche (modèle de Burmister) en faisant correspondre le bassin de déflexion mesuré au bassin calculé (22). La figure 10 fait voir la variation saisonnière du module réversible du sol d'infrastructure pour les planches 1 et 4, pour la première année de suivi (1998-1999). On présente la direction 2 où l'on trouve une couche de sable silteux reposant sur l'argile pour l'ensemble des sections. Par rapport à la valeur mesurée en octobre 1998, les résultats montrent une forte variation du module réversible. Les modules réversibles du sol sont 5 à 12 fois plus élevés en hiver qu'à l'automne. Au printemps, le module réversible du sol dégelé diminue. Dans le cas de l'argile, il correspond à 63 % de la valeur automnale (planche 1) alors

que pour le sable silteux il est à 56 % (planche 1) et à 39 % (planche 4) de la valeur de référence hors période de dégel.

### 5.6. Profondeur de gel, soulèvement et $\Delta$ IRI

Le comportement au gel des chaussées peut être caractérisé par la profondeur de gel, le soulèvement de la chaussée et la différence de qualité de roulement entre l'été et l'hiver. Le tableau 1 présente pour les cinq hivers de suivi, la profondeur de gel maximale mesurée sur les quatre sections à l'aide de gélomètres, le soulèvement maximal mesuré à la surface à l'aide de repères de nivellement et les différences d'IRI entre l'hiver et l'été ( $\Delta$ IRI) mesurées à l'aide d'un profilomètre inertiel (GMR) correspond à la moyenne des deux directions. L'indice de gel annuel est également inclus. En raison des hivers très doux durant les quatre premières années de suivi, le gel a très peu affecté le sol d'infrastructure au cours de ces périodes. Cependant, l'hiver 2002-2003 a été plus froid et par conséquent le gel a pénétré plus profondément à l'intérieur du sol d'infrastructure considéré comme gélif. Pour les planches 1 et 4 non isolées, le sol d'infrastructure a été gelé sur une épaisseur de 55 à 75 cm. Sur les planches 2 et 3 comportant un isolant thermique, le front de gel a traversé l'isolant thermique de 9 à 17 cm tout en demeurant dans la sous-fondation en sable (matériau non gélif). La profondeur de gel sous la planche 4 en grave-ciment est légèrement inférieure de 10 cm en moyenne par rapport à la planche 1 en enrobé bitumineux, pour les cinq années de suivi. Le soulèvement est demeuré faible au cours des cinq années de suivi. Le soulèvement obtenu dans les chaussées non isolées a varié entre 4 et 33 mm alors que les chaussées isolées ont subi des soulèvements variant entre 0 et 5 mm. La planche 4 en grave-ciment présente des soulèvements semblables à ceux de la planche 1 pour les hivers plus doux. Par contre, pour les hivers plus rigoureux (2000-2001 et 2002-2003), le soulèvement est plus élevé sur la planche 1. Les mesures hivernales sont effectuées au mois de mars. Pour les quatre planches d'essai, le  $\Delta$ IRI est demeuré inférieur à 0,50. De façon générale, le  $\Delta$ IRI est plus faible pour les planches isolées.

Tableau 1 – Mesure de la profondeur de gel maximale, des soulèvements maximaux et du  $\Delta$ IRI

Année	Indice de gel (°C-jour) <sup>(1)</sup>	Profondeur de gel (m)				Soulèvements maximaux (mm)				$\Delta$ IRI			
		Planche 1 (EB non isolée)	Planche 2 (EB isolée)	Planche 3 (GC isolée)	Planche 4 (GC non isolée)	Planche 1 (EB non isolée)	Planche 2 (EB isolée)	Planche 3 (GC isolée)	Planche 4 (GC non isolée)	Planche 1 (EB non isolée)	Planche 2 (EB isolée)	Planche 3 (GC isolée)	Planche 4 (GC non isolée)
1998-1999	666	1,30	0,79	0,83	1,17	20	0	5	20	0,45	0,13	0,27	0,27
1999-2000	796	1,45	0,83	0,88	1,35	20	4	3	17	0,52	0,21	0,23	0,18
2000-2001	1114	1,54	0,84	0,90	1,42	33	3	1	24	0,37	0,16	0,02	0,14
2001-2002	659	1,12	0,80	0,86	1,05	4	1	3	7	0,19	0,09	0,01	0,16
2002-2003	1286	1,70	0,95	1,03	1,62	23	0	1	8	0,16	0,02	0,05	0,17

<sup>(1)</sup> La moyenne trentenaire de l'indice de gel (station météo Nicolet) est de 1150 °C-jour

## 6. Discussion

### 6.1. Efficacité de la technique de préfissuration

Les mesures de transfert de charge aux préfissures ont été effectuées sur une période de trois ans, à différentes périodes de l'année et à des températures de l'air différentes (Figure 5). La saison et l'heure de la journée à laquelle l'essai de FWD est effectué influencent significativement le transfert de charge mesuré. Les changements de température entraînent des mouvements horizontaux aux joints et la cambrure des dalles. Il est recommandé de procéder aux essais tôt le matin et par température fraîche lorsque le transfert de charge est à son plus faible et les dommages à leur plus intense (23). La diminution annuelle du transfert de charge de 10 % en moyenne peut être expliquée par la saison et la température à laquelle l'essai FWD a été réalisé. Les préfissures ont en effet été scellées dès leur apparition en surface et on ne note pas de dégradation apparente des parois. Le dispositif de préfissuration aux 2,5 m avec injection d'émulsion bitumineuse a donc fonctionné correctement puisque l'ouverture des préfissures demeure inférieure à 2 mm et que le transfert de charge est suffisant après trois ans dans la majorité des cas. Par contre, trois fissures de la planche 3 présentent un transfert de charge insuffisant après trois ans.

### 6.2. Qualité de roulement à la mise en service

L'IRI initial de mise en service est significativement supérieur sur les sections en grave-ciment (2,1 m/km) par rapport aux sections en enrobé bitumineux (1,3 m/km). On explique cet écart par la différence des techniques de mise en place des deux types de couches de base : utilisation d'une niveleuse pour la grave-ciment et d'une finisseuse pour les enrobés bitumineux.

De plus, sur les planches en grave-ciment, l'IRI estival a augmenté de 0,22 m/km en moyenne depuis le point zéro pour atteindre une valeur moyenne de 2,2m/km sur la planche 3 et de 2,5 m/km sur la planche 4. Cela est directement lié à la présence de fissuration thermique et de fatigue sur ces planches. Les planches en grave-ciment ont été dimensionnées pour que la fissuration en fatigue apparaisse de manière accélérée. Selon les seuils de déficience fixés par le MTQ pour une route nationale, cette dernière devrait faire l'objet d'une intervention légère (rapiéçage mécanisé, couche de resurfaçage) lorsque l'IRI excède 2,5 m/km. L'IRI estival est demeuré à sa valeur initiale sur les planches en enrobé bitumineux qui ne présentent aucune fissuration après cinq ans.

### 6.3. Comportement hivernal

On note des différences significatives de comportement hivernal entre les planches en grave-ciment employées à titre expérimental et les planches en enrobé bitumineux couramment utilisées au Québec. La grave-ciment est affectée par la fissuration de retrait de prise et de retrait thermique, ce qui nécessite de procéder à la préfissuration tous les 2,5 m. Ces préfissures, une fois remontées à la surface, doivent être entretenues périodiquement par scellement pour éviter leur dégradation. La structure de chaussée en enrobé bitumineux ne présentant aucune fissure de retrait thermique après cinq ans, l'entretien par scellement des fissures n'est donc pas nécessaire.

La profondeur de gel de la planche 4 en grave-ciment est légèrement plus faible (environ 10 cm) que celle de la planche 1 en enrobé bitumineux. La conductivité thermique de la grave-ciment est légèrement inférieure à la conductivité thermique de l'enrobé bitumineux (0,92 comparativement à 1,45 W/mK). L'épaisseur de la grave-ciment est également supérieure, ce qui lui donne un pouvoir isolant légèrement plus élevé. Quant aux soulèvements dus au gel, on remarque qu'ils sont généralement un peu plus élevés sur la planche 1 que sur la planche 4.

Les variations saisonnières de l'IRI sont demeurées faibles depuis le début du suivi pour les planches en enrobé et en grave-ciment. Les hivers peu rigoureux et la faible épaisseur de sol gélif affecté peuvent expliquer les faibles valeurs et la variabilité du  $\Delta$ IRI d'une année à l'autre. Les valeurs  $\Delta$ IRI sont plus faibles sur la planche 4 (0,14 à 0,27) que sur la planche 1 (0,37 à 0,52) pour les trois premières années. Par contre, elles sont semblables pour les deux dernières années (0,16 à 0,19). De façon générale, des mesures de  $\Delta$ IRI inférieures à 1,0 m/km dénotent une route peu gélive.

#### 6.4. Comportement au dégel

L'étude de la variation saisonnière du module du sol d'infrastructure soumis au gel pour la première année de suivi a été affectée par un hiver relativement doux - indice de gel de 666 °C-jour - comparativement à l'indice de gel moyen trentenaire (1150 °C-jour). Sur la planche 1, le gel a affecté le sable silteux sur toute son épaisseur (300 mm) et l'argile sous-jacente sur une faible épaisseur de 70 mm. Sur la planche 4, le gel a affecté 140 mm de sable silteux sans atteindre l'argile. Il est à noter que le soulèvement a été du même ordre de grandeur sur les deux planches. L'affaiblissement au dégel du module réversible du sol peut être comparé uniquement pour le sable silteux. Le module réversible du sable silteux correspond à 56 % (planche 1) et 39 % (planche 4). La rigidité plus élevée de la grave-ciment peut expliquer cette différence de 17 % de l'affaiblissement du module réversible puisque les contraintes transmises au sol sont plus faibles.

### **7. Conclusion**

Le MTQ et le LCPC se sont engagés en 1998 dans un projet de coopération ayant pour objectif principal d'optimiser leurs méthodes respectives de dimensionnement des chaussées au gel et au dégel. Ce projet s'est concrétisé par la construction de quatre planches d'essai au Québec. Parmi ces planches d'essai, on a expérimenté une structure de chaussée couramment utilisée en France, la grave-ciment, dans un contexte climatique québécois beaucoup plus rigoureux.

Les hivers doux des dernières années n'ont pas permis de noter des différences significatives de comportement au gel et au dégel entre la chaussée en grave-ciment et la chaussée en enrobé bitumineux. Toutefois, l'analyse prévue des données issues de l'hiver plus rigoureux 2002-2003 permettra peut-être d'accentuer les différences.

Les planches en grave-ciment ont montré dès la première année un endommagement par fatigue caractérisé par des fissures en piste de roues. Cela avait été prévu initialement dans le dimensionnement afin d'observer un endommagement dans un court délai. La planche en enrobé bitumineux ne présente pas de fissures de fatigue après cinq ans. L'épaisseur de la structure en

grave-ciment est pourtant supérieure à la structure en enrobé bitumineux conventionnelle (1060 mm versus 930 mm). La présence d'une couche de base stabilisée très rigide en surface (module élastique 27 000 MPa) ne permet pas de diminuer l'épaisseur de la structure de chaussée. Au contraire, cette épaisseur doit être augmentée pour limiter la contrainte en traction à la base de la couche rigide qui est plus sensible à l'endommagement par fatigue. Dans les conditions du site d'essai, pour un dimensionnement sur quinze ans (25 % de risque), la méthode de dimensionnement française prévoit que l'épaisseur de la grave-ciment devrait être de 275 mm.

La technique de préfissuration de la grave-ciment avec injection d'émulsion bitumineuse à un pas de 2,5 m qui a été utilisée pour localiser et contrôler l'ouverture des fissures s'est avérée efficace, comme le démontrent les mesures de transfert de charge aux préfissures et les ouvertures de fissures inférieures à 2 mm. Toutefois, la remontée très rapide de ces préfissures à la surface du revêtement nécessite un entretien régulier sous la forme d'un scellement au moyen d'un produit bitumineux posé à chaud afin de limiter l'épaufrure des parois et l'infiltration d'eau et de saumure à l'intérieur de la structure de chaussée. En comparaison, la planche 1 en enrobé bitumineux, de conception québécoise, ne présente aucune fissure transversale après cinq ans, ce qui élimine les opérations d'entretien et la diminution du confort de roulement qui accompagne l'augmentation du niveau de sévérité des fissures sous l'action du trafic. L'avènement des classes PG pour les bitumes adaptées aux conditions climatiques des différentes régions du Québec a permis de réduire considérablement la fissuration transversale sur les revêtements en enrobé au Québec.

À la lumière de ces observations et dans le contexte climatique québécois, l'utilisation d'une grave stabilisée avec un fort pourcentage de ciment présente peu d'avantages comparativement à une chaussée souple conventionnelle. Une chaussée souple respectant les critères de dimensionnement structural du MTQ avec une épaisseur de matériaux non gélifs suffisante pour procurer une protection partielle contre le gel permet de limiter les effets du gel sur l'uni (en dehors des zones de soulèvements différentiels majeurs) et de réduire les pertes de capacité de support au dégel des sols d'infrastructure. De plus, la stabilisation de fondations constituées de matériaux neufs ou recyclés avec un liant mixte composé d'une émulsion bitumineuse et d'une faible quantité de ciment présente un fort potentiel d'utilisation sur les chaussées à trafic élevé. L'ajout de ciment améliore significativement les propriétés mécaniques, principalement à court terme (réduction du temps de mûrissement de l'émulsion) et en conditions saturées. Une teneur en ciment inférieure à 1,5 % n'entraîne pas de fissuration transversale de retrait.

## **8. Remerciements**

Les auteurs tiennent à remercier la Commission Permanente France–Québec pour le précieux soutien financier qu'elle a apporté au projet.

## **9. Références**

(1) Corté, J-F., Odéon, H. et Boutonnet, M. (1995) « Vérification au gel des structures de chaussées », *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, vol. 198, p. 13-27.

- (2) White, T.D. and Coree, B.J. (1990) « Threshold Pavement Thickness to Survive Spring Thaw ». *Proceedings of the Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Thronheim, Norway, p. 41-51.
- (3) Janoo, V.C. and Berg, R.L. (1990) « Thaw Weakening of Pavement Structures in Seasonal Frost Areas ». *Journal Research Record*. No 1286, TRB, National Research Council, Washington D.C., p. 217-233.
- (4) Doré, G. and Savard, Y. (1998) « Analysis of Seasonal Pavement Deterioration ». *CD-ROM of the TRB 77<sup>th</sup> Annual Meeting*, Washington D.C.
- (5) Roy, M., St-Laurent, D. and Bergeron, G. (1997) « Seasonal Variation of Pavements : a FWD Study ». *CD-ROM of the 13<sup>th</sup> International Conference of International Road Federation*, Toronto, Canada, June 16-20, 1997.
- (6) Rioux, N., Savard, Y., Corté, J-F. et Boutonnet, M. (1999) « La collaboration scientifique franco-québécoise sur le dimensionnement des chaussées au gel-dégel ». *Revue Générale des Routes et Aéroports*, Hors série 2, p. 105-107.
- (7) Corté, J-F., Boutonnet, M., Savard, Y. et St-Laurent, D. (1999) « Validation de la méthode française de dimensionnement au gel/dégel des chaussées ». *Recueil des communications du Sommet Mondial de la Nordicité*, Québec, Canada, 2-5 février 1999, p. 39-56.
- (8) Savard, Y., Boutonnet, M., Mauduit, C., Pouliot, N. (2004) « Comparison of Design Pavement Methods in France and Quebec ». *Proceedings of the First International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Pavement*, Auburn, Alabama (USA), June 7-9, 2004.
- (9) Boutonnet, M., Savard, Y., Pouliot, N. Hornych, P. (2004) « Pavement damage by cracking under severe conditions ». Fifth RILEM International Conference, Limoges, France, May 5-8 2004.
- (10) Boutonnet, M., Savard, Y., Lerat, P., St-Laurent, D. and Pouliot, N. (2003) « Thermal aspect of frost-thaw pavement dimensionning : in situ measurement and numerical modeling ». *Journal Research Record*, No. 1821, TRB, National Research Council, Washington D.C., 2003, p. 3-12.
- (11) Savard, Y. Boutonnet, M., Hornych, P., Pouliot, N., De Blois, K., Hameury, O. (2004) « Performance prediction of test roads in cold regions ». *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Minneapolis, Minnesota (USA), September 25-29 2004.
- (12) Bonnot J. (1988) « Fissuration de retrait des chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques » (Première et deuxième parties). *Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, n° 156 et n° 157, juillet-août 1988 et septembre-octobre 1988.

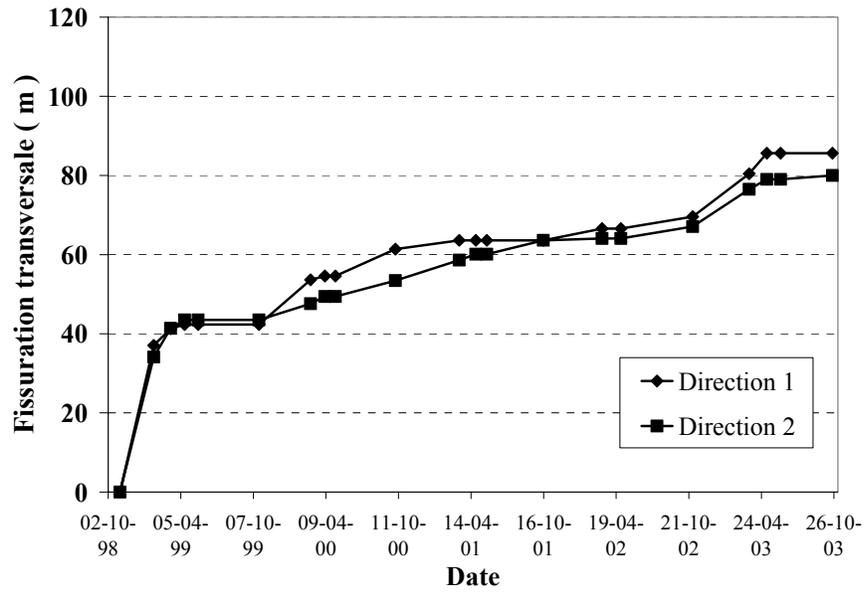
- (13) Colombier, M.G. (1993) « Les procédés utilisés pour maîtriser la remontée des fissures : bilan actuel ». *Reflective Cracking in Pavements, Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liège, Belgium, March 10-12, 1993*, p. 49-74.
- (14) Marchand, J., Boisvert, L., Ouellet, É., Machabée, Y. (1997) « Réalisation d'une section d'essai en utilisant une technique de retraitement à haute performance : Rue Borne, Ville de Québec ». Rapport GSC-97-05, Département de génie civil, Université Laval, 49 p.
- (15) Thébeau, D. (2000) « Retraitement en place de la chaussée et stabilisation au ciment sur le chemin Benoit ». *Revue Routes et Transports, AQTR*, vol. 29, n° 1, hiver 2000, p. 28-30.
- (16) Bergeron, G. (2000) « Bilan du retraitement en place au MTQ de 1991 à 1999 ». *Info DLC, Bulletin d'information technique*, Direction du laboratoire des chaussées, vol. 5, n° 4, avril 2000. <http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/reseau/infodlc/00-04.pdf>, consulté le 5 mai 2004.
- (17) Bourgie, M.-A., Doré, G., Savard, Y. et St-Laurent, D. (1999) « Vérification de la méthode de dimensionnement des chaussées au dégel – Étude préliminaire ». *Compte-rendu du 34<sup>e</sup> congrès annuel de l'Association Québécoise du Transport et des Routes*, Montréal, Canada, 3 au 5 mai 1999.
- (18) Bourgie, M.-A., Doré G., Savard, Y., St-Laurent, D. (2000) « Comportement des chaussées au dégel. Résultats du suivi expérimental de St-Célestin après un cycle annuel ». *Compte-rendu du 35<sup>e</sup> Congrès Annuel de l'Association Québécoise du Transport et des Routes [Cédérom]*, Québec, 3-4 avril 2000.
- (19) Doré, G. and Leboeuf, D. « Monitoring Pavement Response during Spring Thaw ». *81<sup>st</sup> TRB Annual Meeting [CD-ROM]*, Washington D.C., USA, January 13-17, 2002.
- (20) Doré, G. and Duplain, G. « Monitoring Pavement Response during Spring Thaw Fiber-Optic Sensors ». *6<sup>th</sup> international Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields [CD-ROM]*, Lisbonne, Portugal, June 24-26, 2002.
- (21) Pittman, David W. *Development of a Design Procedure for Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavements*, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Technical Report GL-94-6, March 1994.
- (22) Irwin, L.H. (1994) « Instructional Guide for Back-calculation and the Use of MODCOMP3 (version 3.6) ». Cornell University Local Roads Program, CLRP Publication No 94-10, Ithaca (NY), USA, 1994.
- (23) Khazanovich, L., Gotlif, A., (2003) « Evaluation of joint and crack load transfer, final report ». Report No. FHWA-RD-02-088, Federal Highway Administration, October 2003, 118 p. <http://www.fhrc.gov/pavement/ltp/reports/02088/index.htm>



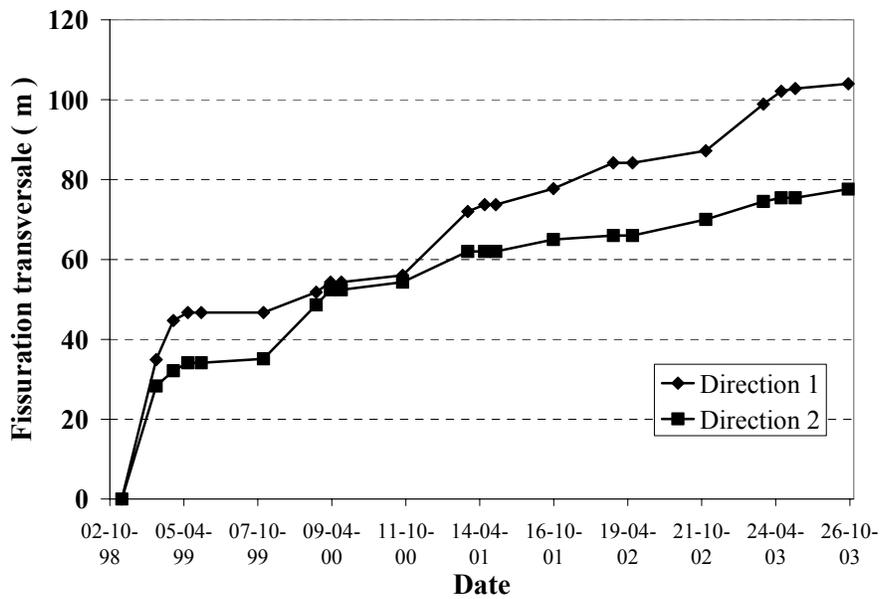
Figure 1 - Localisation du site

Ch. 0 + 800	PLANCHE 1	Ch. 0 + 950	PLANCHE 2	Ch. 1 + 050	PLANCHE 3	Ch. 1 + 150	PLANCHE 4	Ch. 1 + 250
	150 m		100 m		100 m		100 m	
<b>EB-10S: 6 cm</b>								
<b>EB-20: 12 cm</b>			<b>Grave ciment: 25 cm</b>					
<b>MG20 : 25 à 35 cm</b>		<b>MG20 : 35 cm</b>		<b>MG20 : 30 cm</b>				
<b>Sable : 45 cm</b>		<b>Sable : 28 cm</b>		<b>Sable : 20 cm</b>		<b>Sable : 45 cm</b>		
			<b>Polystyrène : 5 cm</b>					
<b>Sable : 5 à 15 cm</b>								
<b>Sable silteux : 25 à 30 cm (inexistant du côté de la rive droite des planches 3 et 4)</b>								
<b>Argile : épaisseur indéterminée</b>								

Figure 2 - Composition des planches expérimentales

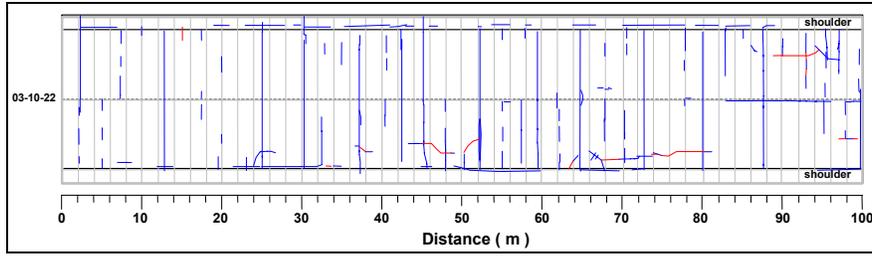


a) Planche 3 (grave-ciment isolée)

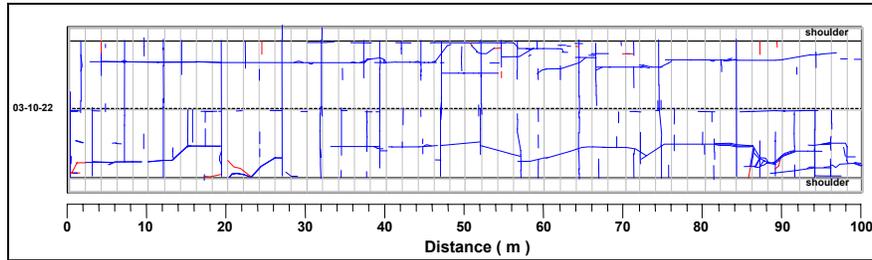


b) Planche 4 (grave-ciment non isolée)

Figure 3 – Évolution de la fissuration de retrait thermique



a) Planche 3 (grave-ciment isolée)



b) Planche 4 (grave-ciment non isolée)

Figure 4 – Cartographie des fissures (2002.31.10)

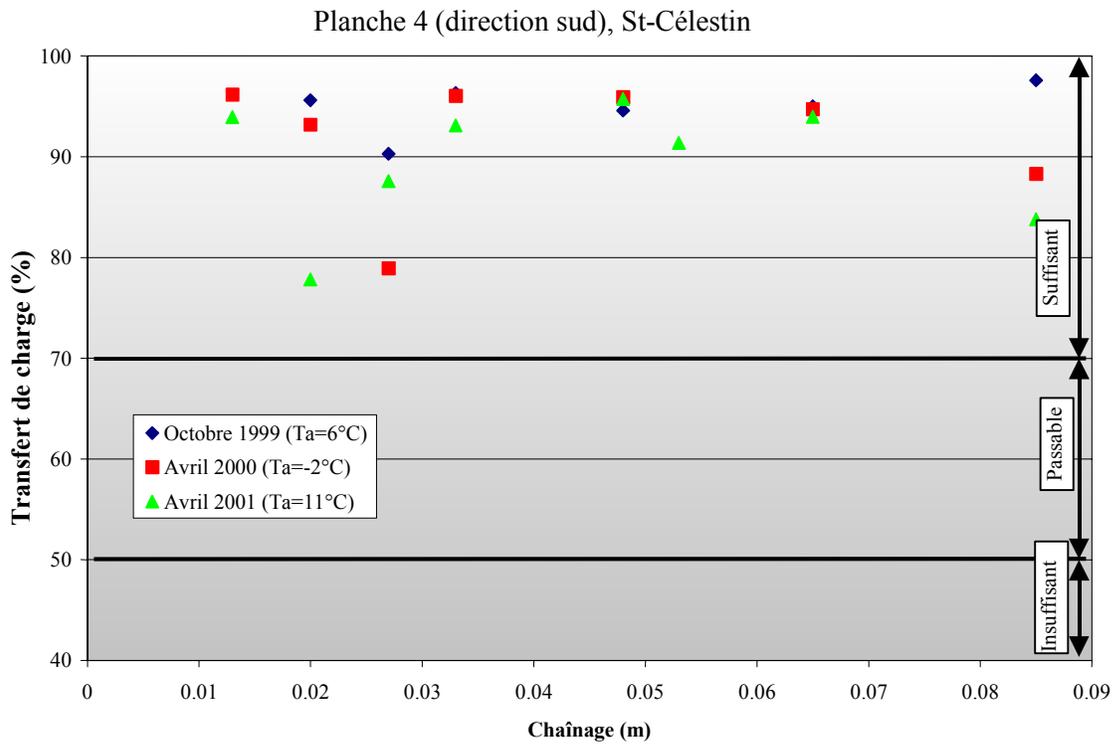
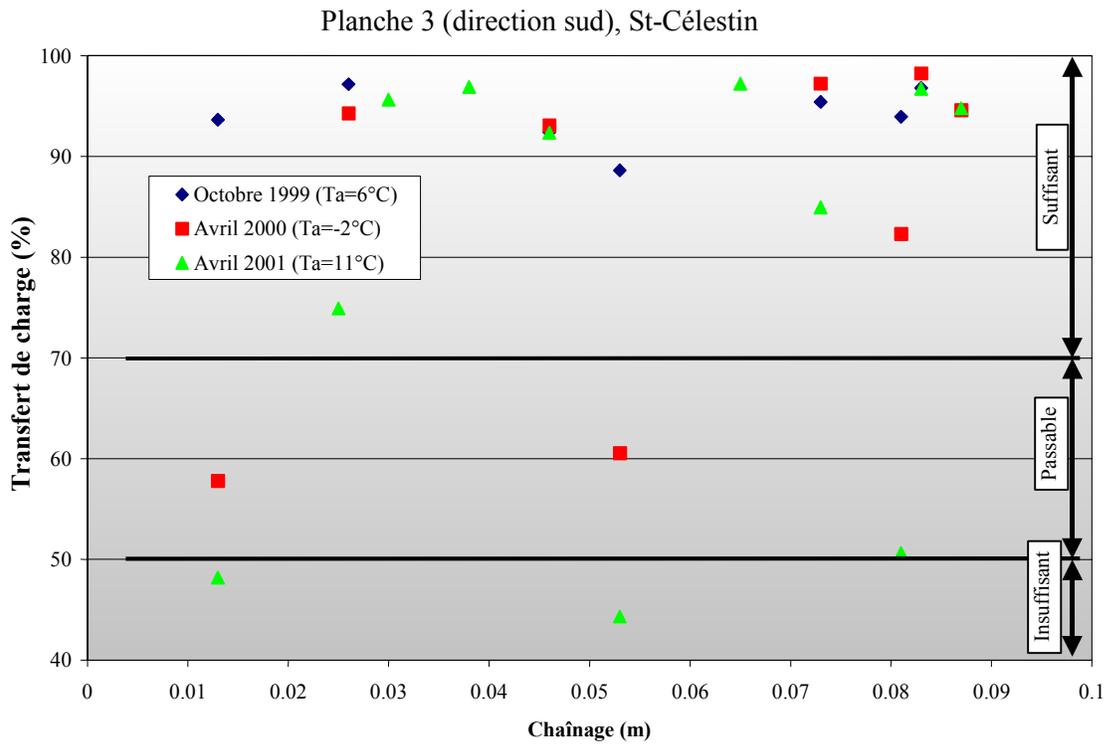
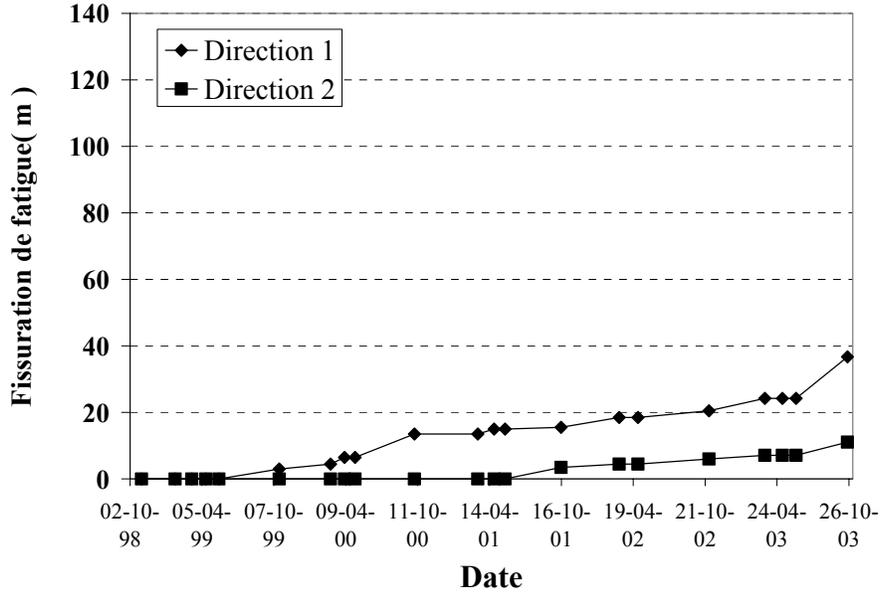
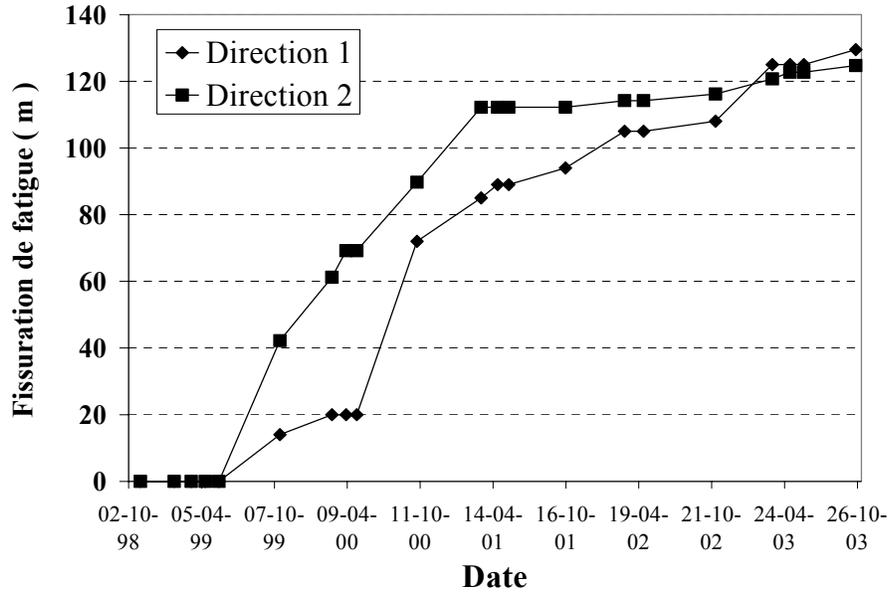


Figure 5 – Pourcentage de transfert de charge aux préfissures de la grave-ciment



a) Planche 3 (grave-ciment isolée)



b) Planche 4 (grave-ciment non isolée)

Figure 6 – Évolution de la fissuration de fatigue

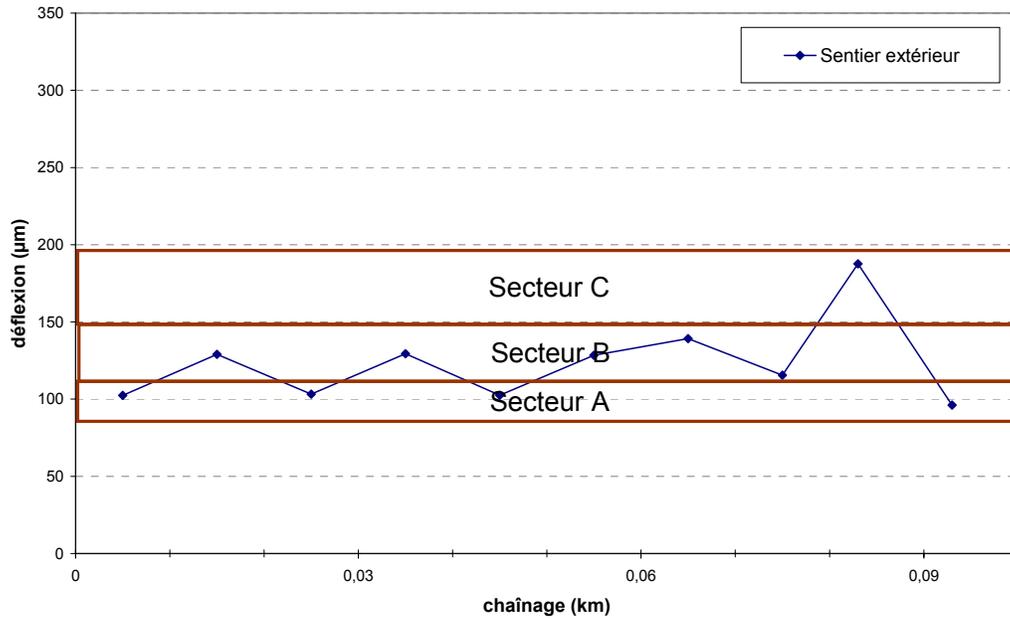


Figure 7 Déflexions (D<sub>0</sub>) mesurées sur la planche 4 (direction 2) lors de la mise en service

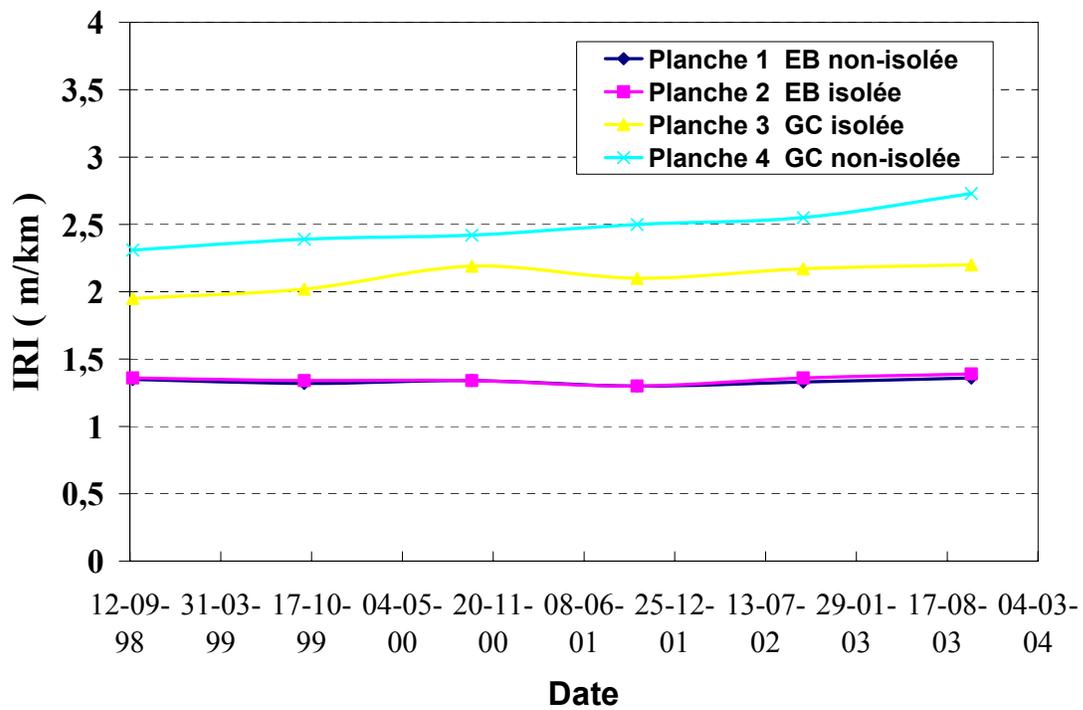


Figure 8 – Évolution de la qualité de roulement en période estivale (direction 1)

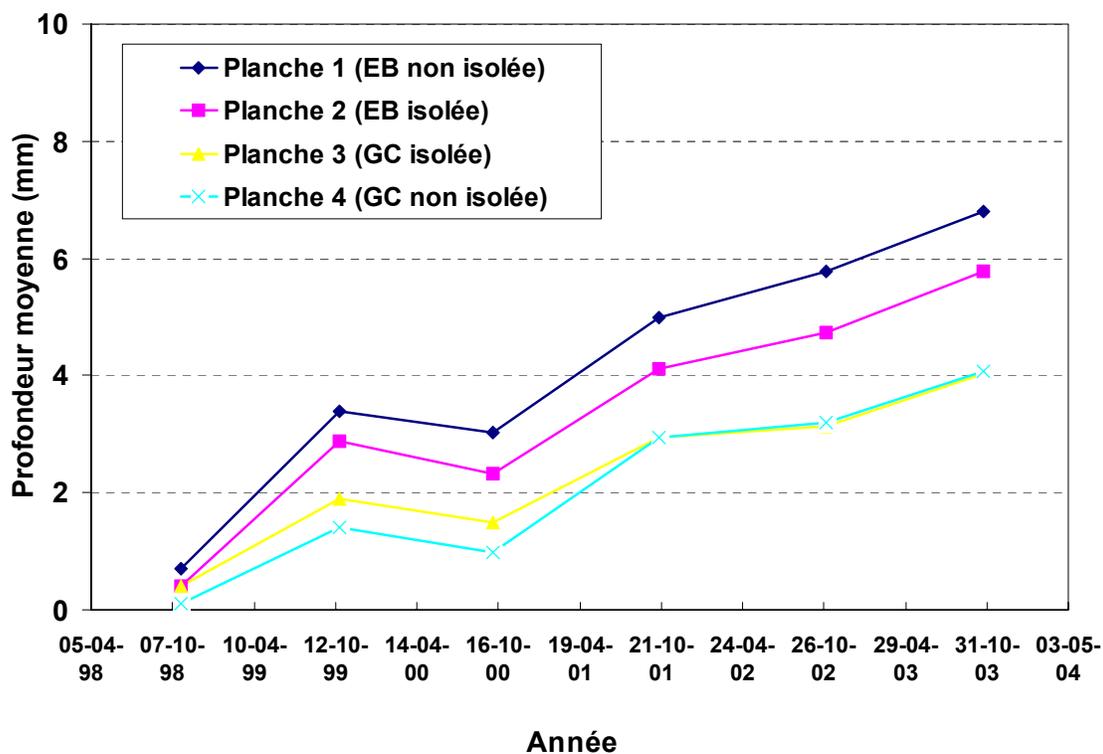


Figure 9 – Évolution de la profondeur moyenne des ornières (deux directions)

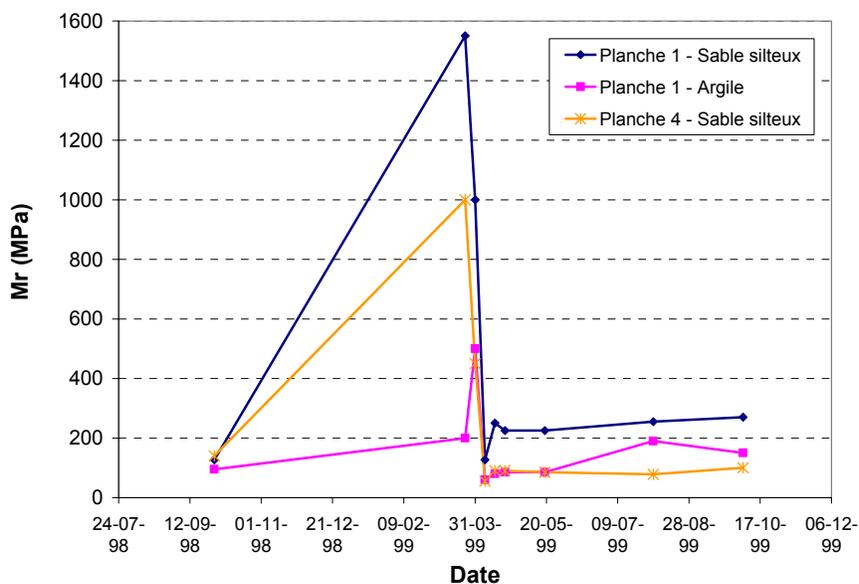


Figure 10 – Variation saisonnière du module réversible du sol d'infrastructure affecté par le gel pour l'année 1998-1999 (sable silteux et argile pour la planche 1 et sable silteux pour la planche 4)