



RAPPORT FINAL

**Projet de recherche sur l'incorporation du verre implosé comme enrobage d'une
conduite d'aqueduc dans une structure de chaussées en enrobées bitumineux dans la ville
de Chandler en Gaspésie**

Période de relevé du 7 octobre 2017 au 16 janvier 2018

Préparé par
Michel Vaillancourt, ing., M. Ing., Ph. D.
Professeur agrégé
Département de génie de la construction
École de Technologie Supérieure

Présenté aux partenaires du projet

Le 6 mars 2019

1.0 MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS

La recherche de nouvelles applications pour le verre postconsommation (VPC) au Québec, principalement liée à la fermeture en 2013 du plus important conditionneur de verre, est à l'origine de nombreux projets pilotes dans le domaine de la gestion des déchets. L'incorporation du VPC dans la chaussée est une application possible au Québec. Incorporer le VPC dans la chaussée est une action écoresponsable, car elle permet de désengorger les sites d'enfouissement. Par ailleurs, cela pourrait dans une certaine mesure permettre d'améliorer les performances des chaussées au Québec. Le VPC peut être incorporé dans les enrobés bitumineux et dans les couches granulaires de la structure des chaussées pour remplacer une partie des matériaux granulaires standard généralement utilisés. En laboratoire, les différents essais de caractérisation des matériaux incorporants du VPC ont donné de bons résultats lorsque les proportions optimales sont bien définies. Les essais thermiques ont montré que les granulats de VPC ou des matériaux granulaires incorporants du VPC avaient des propriétés thermiques plus faibles comparées à un granulats de pierre calcaire (Berraha, 2017; Picard, 2018). D'où l'idée d'une utilisation du VPC comme un matériau pour l'isolation thermique des chaussées. À la suite de plusieurs travaux de recherche sur le VPC en laboratoire, une planche expérimentale a été réalisée avec l'utilisation des granulats de VPC obtenus à partir du verre trié par un des projets pilotes d'expérimentation de ÉEQ. Ce dernier a été utilisé comme matériau d'enrobage d'une conduite d'aqueduc au sein d'une chaussée dans la ville de Chandler en Gaspésie. L'objectif de la planche expérimentale réalisée à Chandler est de valider la capacité isolante du verre imploré étudiée en laboratoire.

2.0 TRAVAUX RÉALISÉS ET INSTRUMENTATION

2.1 Travaux réalisés

La Ville de Chandler procédait à une mise à niveau de son réseau d'aqueduc afin de respecter les normes relatives aux services d'incendies. À cet effet, une conduite d'aqueduc de 150 mm de diamètre et longue de 49 m a été ajoutée au réseau existant du 81, rue des Cèdres jusqu'à l'intersection de l'avenue du Domaine (rues résidentielles). Les travaux de réfection réalisés par la Ville comprenaient donc :

- ✓ l'excavation des matériaux en place (déblai);
- ✓ l'ajout et le branchement de la conduite d'aqueduc au réseau existant;
- ✓ la mise en place et le compactage des matériaux de la chaussée;
- ✓ les travaux liés à la mise en place de l'instrumentation pour les mesures thermiques dans la tranchée;
- ✓ l'installation d'un système d'acquisition pour l'instrumentation de la chaussée.

La planche d'essai comprend deux sections, dont une section élaborée par la méthode de remblai traditionnel (MT) et une seconde section élaborée par la méthode avec remblai incorporant du verre implosé (MIVI). Le matériau (tout-venant) en place a été excavé dans un premier temps pour la réalisation de la tranchée de pose de la conduite d'aqueduc. Dans un second temps, la tranchée a été remblayée en plusieurs couches avec des matériaux de carrière. La première couche de remblayage est un coussin en matériau granulaire (MG) sur laquelle repose la conduite d'aqueduc. La deuxième couche permet l'enrobage de celle-ci et trois autres couches en tout-venant surmontent cette dernière. Après la mise en place du remblai, la chaussée a été reconstruite. La section MT est composée d'un coussin en gravier concassé (GC) de 300 mm d'épaisseur, d'une couche de GC de 0 – 20 mm de diamètre et de 300 mm d'épaisseur pour l'enrobage de la conduite d'aqueduc, d'un remblai de 3 couches en « tout venant » de carrière (TVC) de classe granulaire 0-112 mm de 340 mm d'épaisseur par couche, d'une fondation standard (MG-20) de 300 mm d'épaisseur et d'un revêtement bitumineux (ESG-10) épais de 75 mm. Pour la section MIVI, le lit de pose (coussin) de la conduite d'aqueduc et la couche d'enrobage sont en verre implosé (VI) dont les épaisseurs sont respectivement de 400mm et 300 mm. Trois couches en matériau mixte (50 % TVC et 50 % verre implosé 0 – 6 mm) de 375 mm d'épaisseur par couche surmontent la couche d'enrobage en VI. La structure de chaussée est la même que celle de la section MT. Les caractéristiques des différentes couches de chacune des sections de la planche d'essai sont présentées au Tableau1.

Tableau 1 Caractéristiques des sections MT et MIVI

| Couche | | Matériau | | | | | | | |
|--------|------------|--------------------------|------------------|----------|------|-----------------------------|------------------|------------------|--------|
| No | Nom | Section MT | Épais. (mm) | Origine | Nom | Section MIVI | Épais. (mm) | Origine | Nom |
| 9 | Revêtement | Enrobé bitumineux ESG-10 | 75 | Usine | EB | Enrobé bitumineux ESG-10 | 75 | Usine | EB |
| 8 | Fondation | Gravier concassé 0-20mm | 300 | Carrière | GC | Gravier concassé 0-20mm | 300 | Carrière | GC |
| 7 | Remblai | Tout venant | 340 | Carrière | TVC | Tout venant + Verre implosé | 375 | Carrière + Usine | TVC-VI |
| 6 | Remblai | Tout venant | 340 | Carrière | TVC | Tout venant + Verre implosé | 375 | Carrière + Usine | TVC-VI |
| 5 | Remblai | Tout venant | 340 | Carrière | TVC | Tout venant + Verre implosé | 375 | Carrière + Usine | TVC-VI |
| 4 | Enrobage | Gravier concassé 0-20mm | 300 | Carrière | GC | Verre implosé 0-6mm | 400 | Usine | VI |
| 3 | Coussin | Gravier concassé 0-20mm | 300 | Carrière | GC | Verre implosé 0-6mm | 300 | Usine | VI |
| 2 | Sol | Tout venant | Variable (0 à X) | En place | TVEP | Tout venant | Variable (0 à X) | En place | TVEP |
| 1 | Roc | Roc stratifié | Inconnue | En place | Roc | Roc stratifié | Inconnue | En place | Roc |

2.2 Instrumentation

Les deux sections ainsi réalisées ont été équipées d'instruments de mesure de températures (thermocouples) à des profondeurs variées dans la chaussée et à l'extérieur. Les thermocouples T01 à T05 ont été installés dans la section MT, à différentes profondeurs et différentes positions, dans le matériau en gravier concassé (GC) et dans le matériau en « tout venant » de carrière (TVC). Les thermocouples T07 à T11 ont été installés dans la section MIVI. Un thermocouple T13 a été installé à l'extérieur près de la bordure de la chaussée dans du remblai en GC. Deux thermocouples T14 et T15 ont été raccordés au boîtier d'acquisition à l'extérieur de la chaussée. Ces deux thermocouples permettent de mesurer la température de l'air. La figure 1 et le tableau 2 présentent les positions des différents thermocouples dans la chaussée. Les caractéristiques pour les deux sections sont également montrées sur cette même figure 1 et le tableau 2. Les descriptifs pour la section MIVI au niveau de la figure 1 ont été inscrits entre parenthèses.

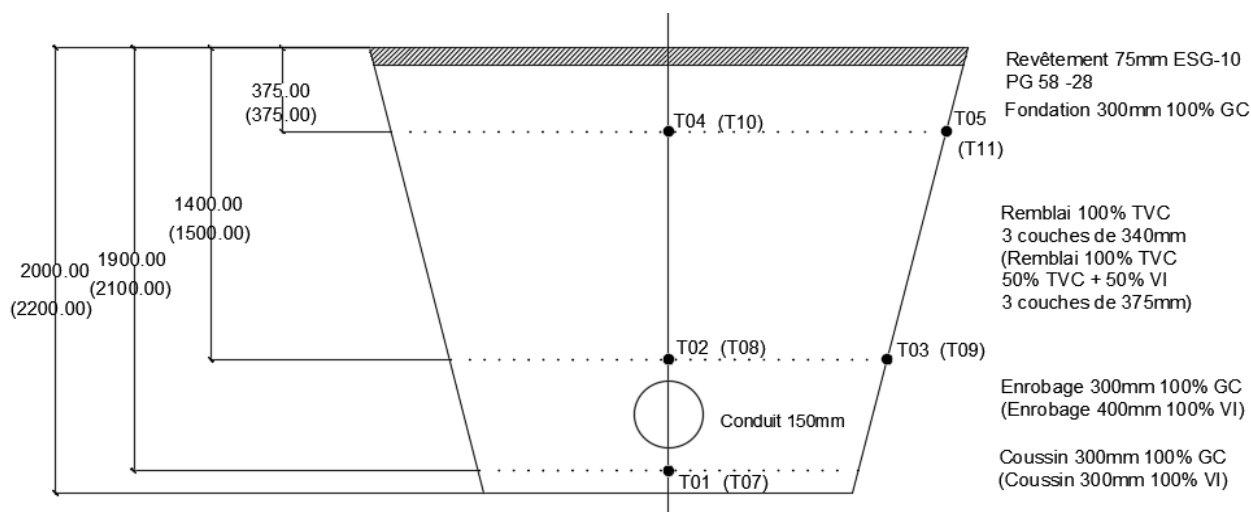


Figure 1 Positions des thermocouples dans les sections MT et MIVI

Tableau 2 Positionnement des thermocouples

| Therm. (#) | Emplacement | | | | | Désignation |
|------------|-------------|------------------|------------|------------|---------|--------------------------------|
| | (section) | (prof. ou élév.) | (couche) | (matériau) | (coté) | |
| T01 | MT | -1,9 m | Coussin | GC | Centre | T01, MT, -1,9m, Cous. GC, C |
| T02 | MT | -1,4 m | Enrobage | GC | Centre | T02, MT, -1,4m, Enrob. GC, C |
| T03 | MT | -1,4 m | Enrobage | GC | Bord | T03, MT, -1,4m, Enrob. GC, B |
| T04 | MT | -0,375 m | Remblai | TVC | Centre | T04, MT, -0,375m, TVC, C |
| T05 | MT | -0,375 m | Remblai | TVC | Bord | T05, MT, -0,375m, TVC, B |
| T07 | MIVI | -2,1 m | Coussin | VI | Centre | T07, MIVI, -2,1m, Cous. VI, C |
| T08 | MIVI | -1,5 m | Enrobage | VI | Centre | T08, MIVI, -1,5m, Enrob. VI, C |
| T09 | MIVI | -1,5 m | Enrobage | VI | Bord | T09, MIVI, -1,5m, Enrob. VI, B |
| T10 | MIVI | -0,375 m | Remblai | TVC-VI | Centre | T10, MIVI, -0,375m, TVC-VI, C |
| T11 | MIVI | -0,375 m | Remblai | TVC-VI | Bord | T11, MIVI, -0,375m, TVC-VI, B |
| T13 | Extérieure | -0,6 m | Remblai | GC | Bordure | T13, Ext., -0,6m, GC, Bordu. |
| T14 | Extérieure | +1,2m | Extérieure | Air | Nord | T14, Ext., +1,2m, Air, Nord |
| T15 | Extérieure | +1,2m | Extérieure | Air | Sud | T15, Ext., +1,2m, Air, Sud |

Les données de températures, recueillies pendant plus d'un an dans les deux sections, sont collectées à l'aide d'un enregistreur de données CR800 installé dans un boîtier d'acquisition. Le CR800 lit directement l'entrée des thermocouples et les données sont enregistrées dans sa base

de données. Les données sont par la suite récupérées à distance chaque mois par l'intermédiaire d'un modem de télécommunication. Le modem permet d'accéder directement par internet aux données enregistrées dans la mémoire de sauvegarde de CR800.

2.3 Matériaux

Les matériaux de remblai de la tranchée de la planche d'essai ont été échantillonnés lors de la réalisation des travaux. Ces échantillons ont été analysés en laboratoire. Les courbes granulométriques montrées à la figure 2 sont celles des matériaux GC, TVC et VI. Le matériau mixte n'ayant pas été échantillonné lors de la réalisation de la planche d'essai n'est pas montré à la figure 2. Cependant, ce matériau est un combiné de GC et de VI dans les proportions de 50% de GC (0-20 mm) et 50% de VI (0-6 mm).

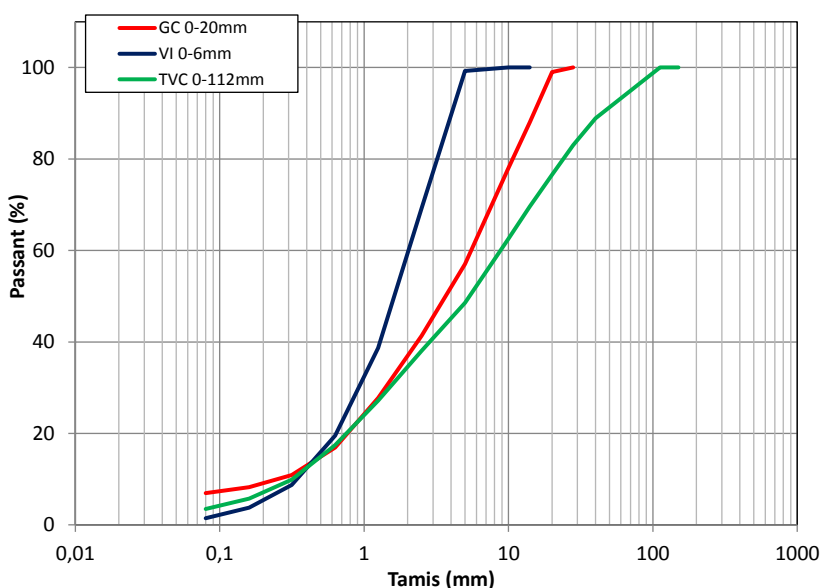


Figure 2 Courbes granulométriques des matériaux de remblai

Les couches d'enrobage qui protègent la conduite d'aqueduc du gel sont en matériau GC (0-20 mm) dans la section MT et en VI (0-6 mm) dans la section MIVI. Les densités sèches maximales (p_d) obtenues à l'essai Proctor modifié sont montrées à la figure 3. On obtient respectivement un p_d de 2,20 pour le matériau GC et un p_d de 1,86 pour le VI. Les porosités de ces deux matériaux ont été déterminées à partir des données de l'essai Proctor modifié. Les valeurs de porosité en place estimées pour une compacité de 90 % du Proctor modifié sont d'environ 29 % pour le GC et environ 33 % pour le VI.

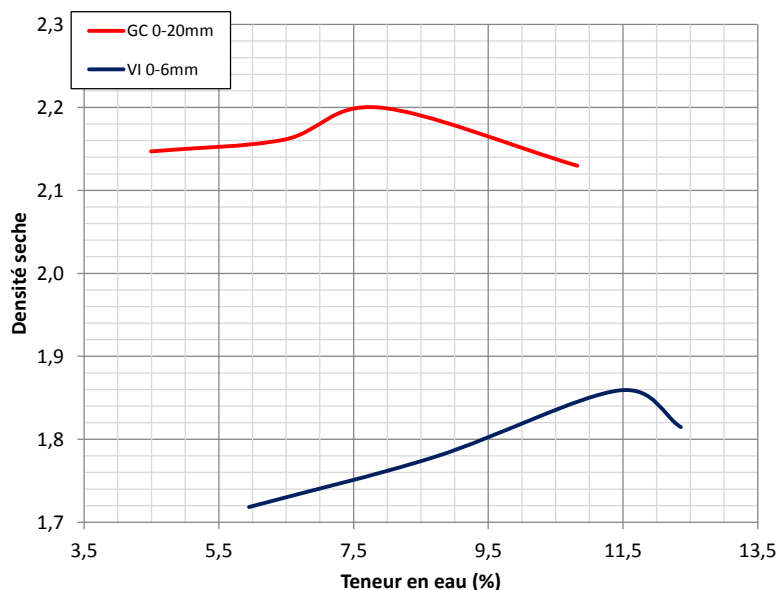


Figure 3 Courbes Proctor des matériaux GC et VI

3.0 RÉSULTATS

3.1 Présentation des données de températures

Les températures ont été mesurées, durant la période allant du 7 octobre 2017 au 16 janvier 2019, à l'aide des différents thermocouples installés dans la chaussée. Les données de températures obtenues au cours de cette période pour l'ensemble des thermocouples sont montrées en annexe de ce rapport. Les températures extrêmes mesurées dans l'air sont comprises entre $-27,2\text{ °C}$ et $35,3\text{ °C}$. Les figures 4 et 5 montrent les données de températures des thermocouples placés au centre de la tranchée dans les deux sections.

La figure 4 présente uniquement les relevés de températures effectués au niveau du thermocouple T04 à la profondeur 0,375 m dans la section MT et les relevés du thermocouple T10 à la même profondeur dans la section MIVI. Les comportements thermiques des deux sections sont assez similaires à cette profondeur. Toutefois, en hiver on observe des écarts entre les températures des deux sections. Au cours des deux périodes hivernales montrées à la figure 4, la plus basse température enregistrée dans la section MIVI est de $-8,9\text{ °C}$. Dans la section MT, cette température est de $-5,1\text{ °C}$. La section MIVI est plus froide à cette profondeur.

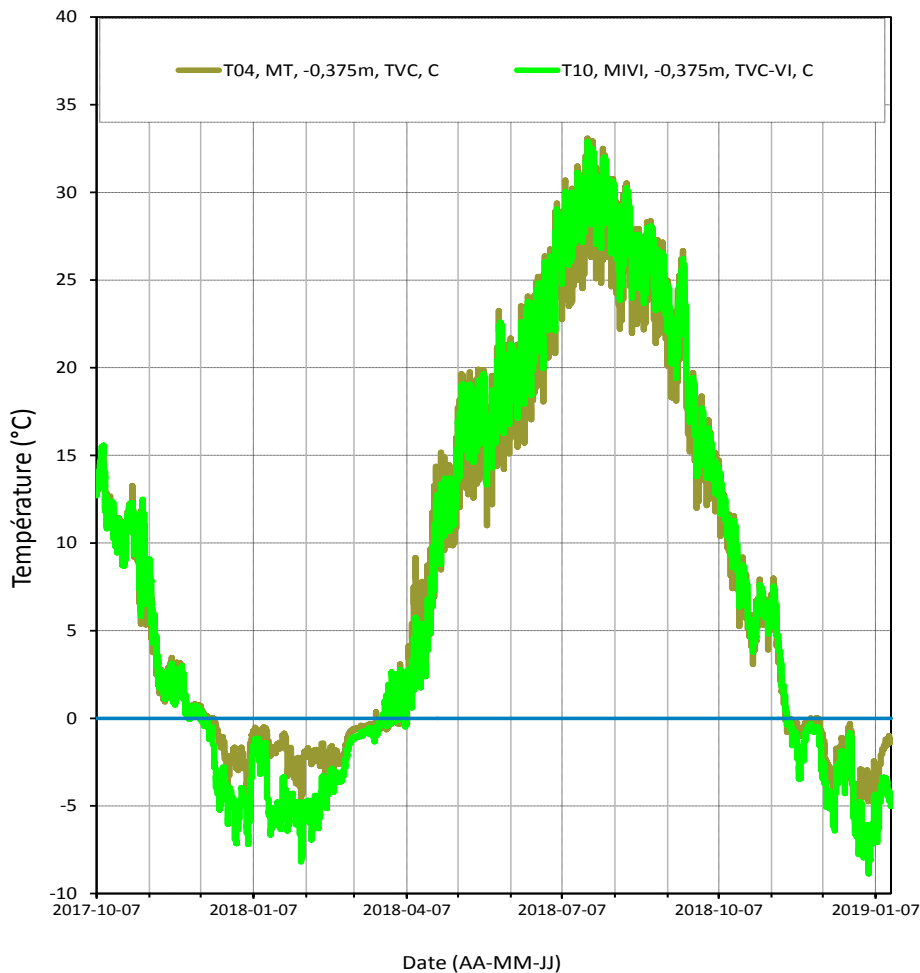


Figure 4 Évolution des températures dans les deux sections à la profondeur 0,375m

À la figure 5, on retrouve l'évolution dans le temps des températures des thermocouples T01 et T02 installés dans la section MT aux profondeurs 1,9 m et 1,4 m respectivement. Cette figure montre également l'évolution des températures des thermocouples T07 et T08 de la section MIVI à des profondeurs 2,1 m et 1,5 m. On observe des écarts entre les différentes mesures de températures des thermocouples à la figure 5.

Au niveau des thermocouples T02 (MT) et T08 (MIVI) aux profondeurs 1,4 m et 1,5 m respectivement, on remarque qu'au cours des périodes froides la section MT est plus chaude et la plus basse température est 1,3 °C à la profondeur 1,4 m pour la section MT. Dans la section MIVI à 1,5 m, la plus basse température enregistrée est d'environ 0 °C. Pendant la période

chaude, le comportement observé est le contraire de celui des périodes froides. La section MIVI est plus chaude que la section MT aux profondeurs mentionnées.

Pour les thermocouples T01 (MT) et T07 (MIVI), la section MIVI est la plus chaude au cours des périodes froides. Durant la période chaude, la section MT est la plus chaude des deux sections.

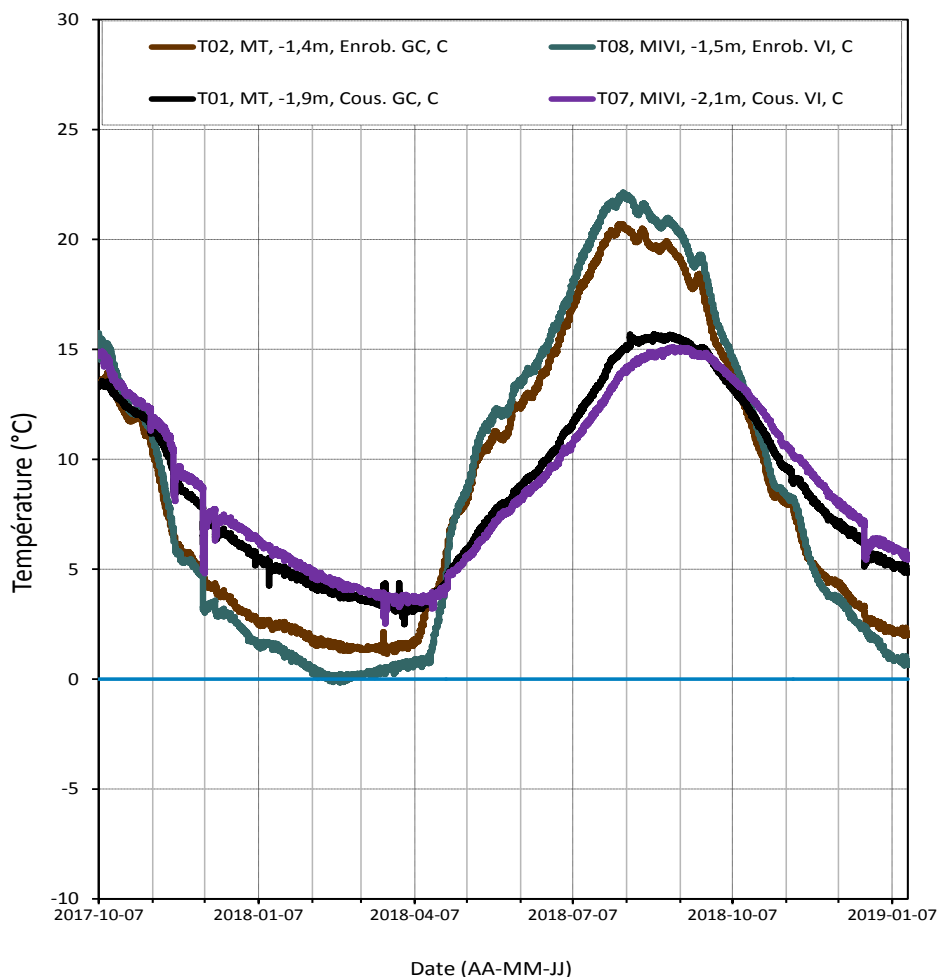


Figure 5 Évolution des températures dans les deux sections à différentes profondeurs

3.2 Analyse du comportement thermique des sections

Les températures maximales et minimales ont été déterminées pour les différents thermocouples des deux sections à partir des données obtenues *in situ* pour les périodes représentant l'automne,

l'hiver et l'été. En outre, les écarts de températures (représentant l'étendue entre la valeur maximale et la valeur minimale des mesures), les écarts-types et les températures moyennes ont également été calculés pour ces périodes et les résultats sont présentés au tableau 3.

Tableau 3 Synthèse des données de températures

| Périodes | Thermocouples | T air | Section MT | | | | | Section MIVI | | | | |
|------------------------------------|----------------|-------|------------|------|------|-------|-------|--------------|------|------|-------|-------|
| | | T14 | T01 | T02 | T03 | T04 | T05 | T07 | T08 | T09 | T10 | T11 |
| | Profondeur (m) | N.A. | 1,9 | 1,4 | 1,4 | 0,375 | 0,375 | 2,1 | 1,5 | 1,5 | 0,375 | 0,375 |
| Automne 2017 7 oct. au 31 déc. | Min. | -20,0 | 5,9 | 2,9 | 2,9 | -4,6 | -7,1 | 4,8 | 2,0 | 1,4 | -7,1 | -8,0 |
| | Max. | 20,6 | 13,6 | 14,0 | 14,2 | 15,0 | 15,3 | 14,9 | 15,7 | 16,0 | 15,6 | 15,8 |
| | Étendu | 40,6 | 7,7 | 11,0 | 11,2 | 19,5 | 22,3 | 10,1 | 13,7 | 14,6 | 22,7 | 23,7 |
| | Écart-type | 8,2 | 2,6 | 3,7 | 3,7 | 5,4 | 6,1 | 2,6 | 4,4 | 4,4 | 6,1 | 6,4 |
| | Moyenne | 0,3 | 9,6 | 7,9 | 8,4 | 4,3 | 3,9 | 10,3 | 7,9 | 8,4 | 3,7 | 4,0 |
| Hiver 2018 1 janv. au 30 avril | Min. | -27,0 | 2,5 | 1,1 | 1,0 | -5,1 | -8,7 | 2,5 | -0,2 | -1,4 | -8,2 | -9,5 |
| | Max. | 17,5 | 6,0 | 7,4 | 6,6 | 15,2 | 13,5 | 6,7 | 7,4 | 6,6 | 13,7 | 12,7 |
| | Étendu | 44,5 | 3,5 | 6,3 | 5,6 | 20,2 | 22,2 | 4,2 | 7,6 | 8,0 | 21,9 | 22,2 |
| | Écart-type | 7,1 | 0,7 | 1,3 | 1,2 | 4,0 | 4,6 | 0,9 | 1,4 | 1,5 | 4,6 | 4,8 |
| | Moyenne | -3,9 | 4,1 | 2,3 | 2,0 | 0,3 | -1,2 | 4,6 | 1,1 | 0,3 | -1,1 | -1,6 |
| Été 2018 1 mai au 31 août | Min. | -2,4 | 5,2 | 7,4 | 6,6 | 9,9 | 10,0 | 4,9 | 7,4 | 6,5 | 10,7 | 9,8 |
| | Max. | 34,2 | 15,7 | 20,7 | 20,7 | 33,1 | 32,3 | 15,1 | 22,2 | 23,1 | 32,9 | 32,1 |
| | Étendu | 36,6 | 10,5 | 13,3 | 14,0 | 23,2 | 22,3 | 10,1 | 14,8 | 16,6 | 22,2 | 22,4 |
| | Écart-type | 7,3 | 3,3 | 4,2 | 4,4 | 5,4 | 5,4 | 3,1 | 4,5 | 4,9 | 5,4 | 5,6 |
| | Moyenne | 15,5 | 11,1 | 15,4 | 15,3 | 22,3 | 22,5 | 10,4 | 16,5 | 17,0 | 23,2 | 22,6 |
| Automne 2018 1 sept. au 31 déc. | Min. | -18,7 | 5,1 | 2,3 | 2,4 | -6,8 | -7,7 | 5,4 | 1,4 | 1,1 | -8,0 | -7,7 |
| | Max. | 31,6 | 15,7 | 19,7 | 19,9 | 27,3 | 26,7 | 15,1 | 20,9 | 22,0 | 26,7 | 26,5 |
| | Étendu | 50,3 | 10,6 | 17,4 | 17,6 | 34,1 | 34,3 | 9,7 | 19,5 | 20,9 | 34,7 | 34,2 |
| | Écart-type | 9,2 | 3,4 | 5,6 | 5,7 | 8,9 | 9,3 | 3,0 | 6,3 | 6,7 | 9,6 | 9,5 |
| | Moyenne | 2,7 | 10,6 | 9,9 | 10,4 | 7,2 | 7,2 | 11,2 | 10,2 | 10,7 | 7,1 | 7,4 |
| Hiver 2019 1 janv. au 16 janv. | Min. | -23,7 | 4,8 | 2,0 | 1,7 | -4,8 | -8,9 | 5,4 | 0,6 | -0,1 | -8,9 | -8,9 |
| | Max. | 8,4 | 5,6 | 2,5 | 2,5 | -1,0 | -2,7 | 6,4 | 1,5 | 1,2 | -3,4 | -2,7 |
| | Étendu | 32,1 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 3,8 | 6,3 | 0,9 | 0,9 | 1,4 | 5,5 | 6,1 |
| | Écart-type | 6,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 1,2 | 1,6 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 1,6 | 1,6 |
| | Moyenne | -7,6 | 5,2 | 2,2 | 2,1 | -2,8 | -5,0 | 6,0 | 1,0 | 0,5 | -5,4 | -5,6 |

Les résultats du tableau 3 montrent qu'en hiver 2018, à la profondeur 0,375 m dans la chaussée, la section MIVI est plus froide que la section MT. L'écart entre les deux sections est de 3,1 °C pour les températures minimales. L'écart moyen au cours de l'hiver 2018 est de 1,4 °C entre les deux sections. La même observation est faite lorsqu'on descend jusqu'à une profondeur

d'environ 1,5 m. À cette profondeur, la section MIVI reste plus froide que la section MT. À une profondeur d'environ 2,0 m, la section MIVI est légèrement plus chaude et l'écart est de 0,5 °C.

Pour rendre compte de l'avancement du front de gel au cours de l'hiver 2018, une analyse approfondie des données de températures des deux sections a été faite. L'évolution du front de gel obtenue est montrée à la figure 6.

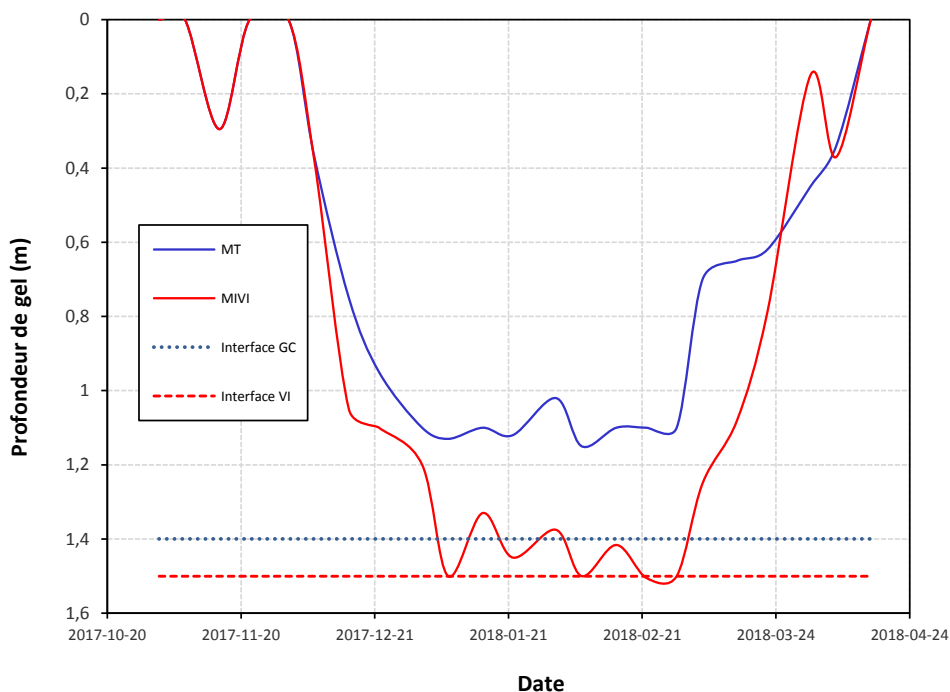


Figure 6 Évolution de la profondeur de gel dans les deux sections

Le gel descend rapidement dans la section MIVI jusqu'à atteindre le niveau de la surface de la couche de VI. Le refroidissement est donc rapide dans la section MIVI. Ce phénomène est lié à une accumulation de froid dans la section MIVI. La couche de VI se comporte comme une barrière thermique dans la section MIVI. Le fait que le gel soit descendu aussi profond dans la section MIVI alors que dans la section MT, le gel n'ait atteint qu'une profondeur de 1,15 m vient confirmer l'hypothèse de la présence d'une barrière thermique dans la section MIVI. En effet, la couche de VI empêche la montée du flux de chaleur fournie par le sous-sol. Ainsi, la descente du froid est favorisée, mais le front de gel est toutefois freiné par la couche de VI lorsqu'il atteint sa surface. Ce comportement est équivalent au comportement des isolants thermiques utilisés

dans les chaussées (Côté et Konrad, 2002). Le refroidissement rapide des couches situées au-dessus de la couche de VI est un avantage pour la chaussée. Dans de telles conditions, la formation de lentille de glace liée à l'avancement du front gel est limitée. En effet, la formation de lentille de glace est un phénomène complexe nécessitant la présence d'eau et un lent régime transitoire au front de gel. Selon les théories du mécanisme de formation des lentilles de glace, l'avancée rapide du front de gel ne permet pas un apport d'eau suffisant pour la formation des lentilles de glace (Konrad et Morgenstern, 1980).

La figure 7 suivante présente un instantané, en date du premier mars 2018, de l'état des températures dans chacune des sections.

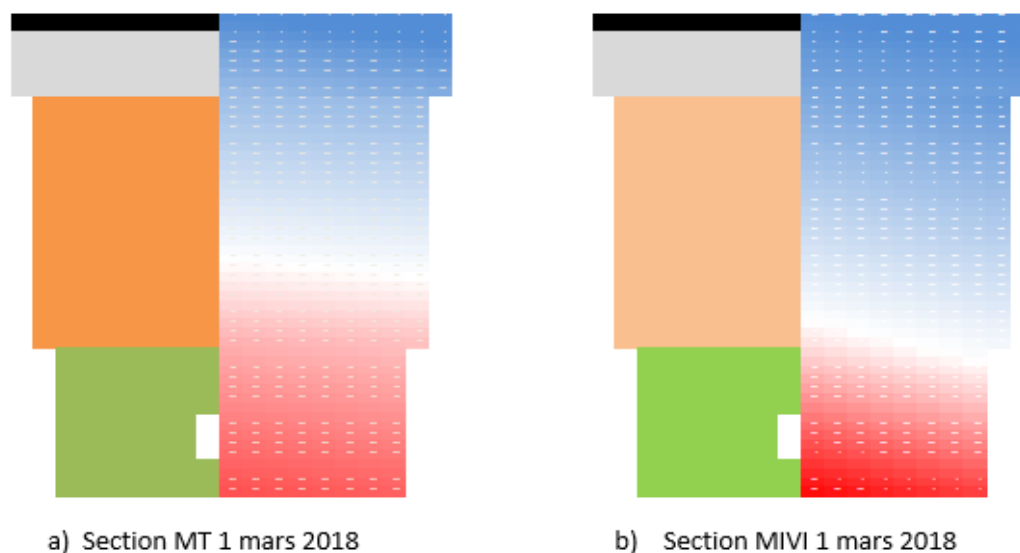


Figure 7 Distribution de la température dans la tranchée

Comme le montre la Figure 7, la distribution de la température dans la section sans verre (a) et dans la section avec verre (b) varie de façon significative. Ces résultats sont conformes aux attentes. En effet, comme il est dit dans la littérature, une chaussée isolée se refroidira davantage au-dessus de l'isolant et sera plus chaude sous l'isolant (Côté, 2001). La variation de température la plus grande se trouve dans la couche isolante. C'est ce qui est observé sur la Figure 7. Dans cette tranchée, le sol sous la conduite ainsi que l'eau dans la conduite génèrent de la chaleur qui est conservée dans le cas de la section avec verre et dissipée dans la section sans verre. Le

refroidissement rapide d'un sol tel qu'observé dans la section b) limite la formation de lentilles de glace (Konrad et Morgenstern, 1980; 1981). De plus, bien que faible, on observe aussi un refroidissement vers les parois de la section «b». Ce phénomène est plus faible dans la section «a». Ce phénomène est dû à la présence de 50% de verre imploré dans la section MIVI.

Selon Konrad et Morgenstern (1980) repris par Picard (2018), la formation de lentille de glace se produit à une température légèrement sous le point de congélation de l'eau pure lorsque le régime transitoire du front de gel est lent. Entre la lentille de glace et le sol non gelé, il existe une frange gelée avec un film d'eau actif qui aspire l'eau du sol non gelé et s'épaissit avec l'accumulation d'eau. L'accumulation d'eau et le faible taux de refroidissement entraînent alors la formation de la lentille de glace. Un taux de refroidissement élevé ne permet pas l'accumulation d'eau au niveau de la frange gelée.

Pour la période chaude (été 2018), à la profondeur 0,375 m, la section MIVI est légèrement plus chaude. L'écart moyen est de 0,9 °C entre les deux sections. À environ 1,5 m de profond, la section MIVI reste encore légèrement plus chaude avec un écart de 1,1 °C entre les sections. Par contre, descendu à environ 2,0 m, la section MT est légèrement plus chaude et l'écart est de 0,7 °C. La présence d'une barrière thermique est bel et bien confirmée au cours de cette période chaude. Avec ce comportement thermique, on s'attend à ce qu'à l'automne, à 2,0 m de profondeur la section MIVI soit légèrement plus chaude et cela est bien confirmé au tableau 3.

3.3 Discussion et recommandations

Les problèmes rencontrés lors de la réalisation de cette planche d'essai sont de différentes natures. Le mélange de VI et TVC dans les proportions de 50 % a été réalisé en chantier avec une chargeuse. Les proportions du mélange obtenues ainsi que la mise en place dans la tranchée ne sont probablement pas uniformes. À ce titre, compte tenu des résultats mitigés obtenus avec le mélange 50-50, il n'est pas recommandé de l'utiliser comme matériaux granulaires de chaussée.

Par ailleurs, tel que mentionné dans le rapport d'étape du 29 novembre 2017, le risque de mélanger le verre servant d'enrobage à la conduite avec les matériaux de remblai et de fondation est présent et peut influencer les résultats. Des précautions doivent être prises à cet effet.

En outre, aucun contrôle de compacité des couches n'a été effectué lors de la réalisation des travaux. Les données de porosité *in situ* des deux sections ne sont donc pas disponibles. De plus, les conditions hydrauliques des couches de la planche d'essai ne sont pas connues. Aucun instrument de mesure de teneur en eau n'est installé dans cette planche et aucune mesure de contrôle de l'humidité des couches n'a été mise en place. Ces paramètres ne sont donc pas disponibles pour étayer l'analyse du comportement thermique de cette planche d'essai. Toutefois, les résultats de laboratoire obtenus dans le cadre de la recherche sur l'incorporation du verre dans les chaussées, présentés au tableau 4, montre que la porosité (n) à moins d'impact que le degré de saturation (S_r) sur la conductivité thermique (λ) et donc le taux d'isolation.

**Tableau 4 Résultats des essais de conductivité thermique en laboratoire
Tiré de Berraha (2017)**

| Pierre calcaire | ρ_d | θ | n | S_r | λ_c | σ_{λ_c} | λ_{hc} | $\sigma_{\lambda_{hc}}$ | VPC | ρ_d | θ | n | S_r | λ_c | σ_{λ_c} | λ_{hc} | $\sigma_{\lambda_{hc}}$ |
|-----------------|----------|----------|------|-------|-------------|----------------------|----------------|-------------------------|--------------|----------|----------|------|-------|-------------|----------------------|----------------|-------------------------|
| | g/cm^3 | % | | | $W/(m.K)$ | | | | | g/cm^3 | % | | | $W/(m.K)$ | | | |
| 0,08-1,25 mm | 1,94 | 0,0 | 30,1 | 0,0 | 0,265 | 0,003 | 0,251 | 0,003 | 0,08-1,25 mm | 1,80 | 0,0 | 28,7 | 0,0 | 0,245 | 0,003 | 0,242 | 0,001 |
| | 1,86 | 9,3 | 33,1 | 28,1 | 1,202 | 0,024 | 1,251 | 0,031 | | 1,73 | 14,3 | 31,6 | 45,4 | 0,598 | 0,013 | 0,583 | 0,010 |
| | 1,86 | 17,7 | 32,8 | 53,9 | 1,508 | 0,052 | 1,519 | 0,015 | | 1,73 | 25,1 | 31,5 | 79,6 | 0,691 | 0,010 | 0,706 | 0,008 |
| | 1,81 | 29,0 | 34,7 | 83,4 | 1,513 | 0,047 | 1,540 | 0,018 | | 1,61 | 31,3 | 36,3 | 86,2 | 0,793 | 0,009 | 0,811 | 0,005 |
| | 1,68 | 35,2 | 39,5 | 89,1 | 1,439 | 0,020 | 1,504 | 0,050 | | 1,41 | 40,4 | 44,3 | 91,2 | 0,778 | 0,004 | 0,799 | 0,003 |
| | 1,50 | 42,4 | 46,1 | 92,0 | 1,359 | 0,015 | 1,281 | 0,010 | | 1,49 | 0,0 | 40,9 | 0,0 | 0,152 | 0,002 | 0,150 | 0,001 |
| 0,630-2,5 mm | 1,71 | 0,0 | 38,3 | 0,0 | 0,166 | 0,001 | 0,156 | 0,001 | 0,630-2,5 mm | 1,50 | 11,9 | 40,4 | 29,4 | 0,418 | 0,007 | 0,434 | 0,003 |
| | 1,65 | 15,5 | 40,6 | 38,1 | 1,158 | 0,017 | 1,217 | 0,010 | | 1,46 | 24,5 | 42,2 | 57,9 | 0,574 | 0,004 | 0,584 | 0,003 |
| | 1,67 | 24,2 | 39,8 | 60,8 | 1,438 | 0,038 | 1,546 | 0,053 | | 1,50 | 34,8 | 40,4 | 86,3 | 0,703 | 0,004 | 0,706 | 0,004 |
| | 1,70 | 33,1 | 38,7 | 85,6 | 1,546 | 0,022 | 1,317 | 0,048 | | 1,43 | 38,7 | 43,1 | 89,8 | 0,729 | 0,011 | 0,766 | 0,004 |
| | 1,63 | 37,6 | 41,0 | 91,6 | 1,328 | 0,020 | 1,301 | 0,006 | | 1,52 | 0,0 | 38,0 | 0,0 | 0,135 | 0,005 | 0,129 | 0,004 |
| 1,25-5 mm | 1,70 | 0,0 | 38,5 | 0,0 | 0,140 | 0,004 | 0,131 | 0,003 | 1,25-5 mm | 1,52 | 11,6 | 37,9 | 30,6 | 0,352 | 0,013 | 0,348 | 0,012 |
| | 1,68 | 12,9 | 39,2 | 33,0 | 0,726 | 0,035 | 0,697 | 0,030 | | 1,54 | 23,9 | 37,2 | 64,3 | 0,512 | 0,004 | 0,515 | 0,004 |
| | 1,70 | 26,6 | 38,4 | 69,3 | 1,067 | 0,052 | 1,058 | 0,033 | | 1,56 | 32,8 | 36,3 | 90,3 | 0,722 | 0,006 | 0,717 | 0,006 |
| | 1,70 | 33,6 | 38,6 | 86,2 | 1,315 | 0,034 | 1,305 | 0,019 | | 1,43 | 38,7 | 41,6 | 93,1 | 0,683 | 0,015 | 0,675 | 0,013 |
| | 1,59 | 38,7 | 42,4 | 91,3 | 1,244 | 0,010 | 1,216 | 0,013 | | | | | | | | | |

On doit donc analyser les résultats de façon globale et non spécifique. De façon globale, le verre se comporte comme un matériau isolant.

Finalement, l'analyse du comportement thermique de la planche d'essai révèle que la couche isolante n'est pas bien positionnée. Compte tenu du faible risque de gel de la conduite d'aqueduc qui « chauffe » son environnement, il eut été plus bénéfique de placer la couche de verre isolante à une plus faible profondeur afin de bénéficier de la chaleur latente du sol et bloquer le front de gel à une profondeur moins grande, limitant ainsi l'effet du gel sur les sols d'infrastructure gélifs. La profondeur de gel dans la section MIVI est en étroite relation avec la position de la couche isolante. Si l'on considère un recouvrement minimum de 450 mm d'épaisseur de granulats standard, tel qu'exigé par le MTQ, et une structure de chaussée de 800 mm d'épaisseur, la couche de VI dans la section MIVI devrait être positionnée à une profondeur comprise entre 450 mm et 800 mm sous le revêtement bitumineux.

Ces derniers points et interrogations devront faire l'objet de recherches et d'essais supplémentaires afin de valider les hypothèses avancées.

4.0 CONCLUSION

Suite à des travaux de recherche en laboratoire, à la réalisation d'une planche d'essais réalisée à Chandler en Gaspésie et au terme d'une année de suivi du comportement thermique de la planche d'essai, les phénomènes thermiques observés montrent que la section avec verre postconsommation et la section sans verre ont des comportements thermiques différents l'une de l'autre au cours des différentes périodes d'analyse. La section avec verre se comporte comme une chaussée isolée. Le sol sous la couche isolante est plus chaud en hiver et plus frais en été. Cette planche vient ainsi confirmer le comportement isolant observé en laboratoire pour le matériau VPC. Comme des études antérieures ont montré la capacité mécanique du verre à supporter des charges, le granulat de verre peut être utilisé au Québec comme matériau d'isolation des chaussées et d'enrobage de conduite dans et sous les fondations granulaires de chaussées.

Michel Vaillancourt, ing., Ph.D.
Professeur – Département de génie de la construction
ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

MV/tk

RÉFÉRENCES

- Berraha, Youness. 2017. « Caractérisation expérimentale des propriétés thermiques de granulats de verre postconsommation et analyse par simulation numérique du comportement thermique d'une structure de chaussée avec couche de verre postconsommation ». École de technologie supérieure.
- Côté, J, et J-M Konrad. 2002. « A field study of hoarfrost formation on insulated pavements ». *Canadian geotechnical journal*, vol. 39, n° 3, p. 547-560.
- Côté, Jean. 2001. *Influence d'un isolant thermique sur la sensibilité au verglas des routes*.
- Konrad, Jean-Marie, et Norbert R Morgenstern. 1980. « A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 17, n° 4, p. 473-486.
- Konrad, Jean-Marie, et Norbert R Morgenstern. 1981. « The segregation potential of a freezing soil ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 18, n° 4, p. 482-491.
- Picard, Laurence. 2018. « Étude du potentiel de ségrégation du granulat de verre post consommation pour des applications comme matériau granulaire de chaussée et barrière granulaire contre le gel ». Montréal (Québec), École de technologie supérieure.

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1.0 | MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS..... | 2 |
| 2.0 | TRAVAUX RÉALISÉS ET INSTRUMENTATION | 2 |
| 2.1 | Travaux réalisés | 2 |
| 2.2 | Instrumentation | 4 |
| 2.3 | Matériaux | 6 |
| 3.0 | RÉSULTATS..... | 7 |
| 3.1 | Présentation des données de température | 7 |
| 3.2 | Analyse du comportement thermique des sections..... | 9 |
| 3.3 | Discussion et recommandations..... | 13 |
| 4.0 | CONCLUSION | 15 |

