

**DURABILITÉ DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES DE  
CHAUSSÉES SOUS L'EFFET DU TRAFIC ET DES CONDITIONS  
CLIMATIQUES – COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX  
BITUMINEUX VIS-À-VIS DES CYCLES DE GEL ET DE DÉGEL  
TOME I DE III**

**Rapport présenté au  
Ministère des Transports du Québec**

**Par  
Jean-Pascal Bilodeau, ing., Ph.D.  
Guy Doré, ing., Ph.D.**

**Février 2018  
Université Laval, Québec**







**DURABILITÉ DES MATÉRIAUX ET DES  
STRUCTURES DE CHAUSSÉES SOUS L'EFFET DU  
TRAFIC ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES –  
COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX BITUMINEUX  
VIS-À-VIS DES CYCLES DE GEL ET DE DÉGEL  
TOME I DE III**



# Table des matières

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Introduction .....   | 1  |
| 2   | Contexte et problématique .....  | 3  |
| 2.1 | Conclusion .....   | 11 |
| 3   | Objectifs .....  | 12 |
| 4   | Laboratoire de recherche sur les chaussées de l'Université Laval .....   | 13 |
| 4.1 | Simulateur routier de l'Université Laval .....   | 15 |
| 4.2 | Fosse expérimentale .....  | 22 |
| 5   | Exemple d'utilisation du simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval pour l'étude des effets du gel et du dégel ..... | 28 |
| 6   | Étapes de la phase expérimentale .....   | 33 |
| 6.1 | Construction et instrumentation .....  | 34 |
| 6.2 | Phase d'essais de type « réponse » .....   | 40 |
| 6.3 | Phase d'essais de type endommagement accéléré .....  | 42 |
| 6.4 | Auscultation et diagnostic .....   | 42 |
| 7   | Conclusion .....   | 44 |
| 8   | Références .....   | 45 |

# Liste des Figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1. Processus de formation des nids-de-poule (site web de la Ville de Québec <a href="https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/travaux_entretien_rues/nids_poule/formation-des-nids-de-poule.aspx">https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/travaux_entretien_rues/nids_poule/formation-des-nids-de-poule.aspx</a> ) ..... | 6  |
| Figure 2. Nids-de-poule sur une chaussée flexible (Ministère des Transports du Québec, 2007) .....   | 7  |
| Figure 3. Pelade sur une chaussée flexible (Ministère des Transports du Québec, 2007).....   | 8  |
| Figure 4. Evolution de la déformation axial de la deuxième éprouvette (Ø50×160mm) avec $n=5.1\%$ et $S_r = 60\%$ à l'essai CTFS (Vu et al. 2017).....  | 9  |
| Figure 5. Contrainte verticale en fonction de la température de l'enrobé sec et saturé ( $S_r = 60\%$ ) à l'essai TSRST (Vu et al. 2017).....  | 9  |
| Figure 6. Représentation schématique des possibilités d'essais pour l'étude des chaussées ainsi que leurs coûts et bénéfices relatifs .....  | 14 |
| Figure 7. Simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval tiré par une remorque .....   | 19 |
| Figure 8. Simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval en mode transport.....  | 20 |
| Figure 9. Simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval en mode essai .....   | 21 |
| Figure 10. Poulie d'entraînement du chariot .....  | 21 |
| Figure 11. Chariot supportant l'essieu, les roues et les pneus.....  | 22 |
| Figure 12. a) Fosse expérimentale et rampe d'accès; b) Vue de dessus de la fosse .....   | 24 |
| Figure 13. Utilisation de pierre nette au fond de la fosse .....   | 25 |
| Figure 14. Unités de conditionnement thermique pour la dalle de béton au bas de la fosse .....   | 26 |
| Figure 15. Séparation de la fosse en deux sous-sections ayant des caractéristiques différentes (épaisseur d'enrobé bitumineux est différente dans le cas présenté) ....  | 27 |
| Figure 16. Exemple de gel de la chaussée et soulèvement associé lors du projet de El youssoufy (2016) .....  | 29 |
| Figure 17. Profils de températures mesurés en conditions de dégel partiel lors du projet de El youssoufy (2016) .....  | 30 |
| Figure 18. Réponse mécanique mesurée en conditions de dégel partiel lors du projet de El youssoufy (2016) .....  | 32 |
| Figure 19. Jauges TML KM HAS (TOKYO SOKKI KENKYUJO) .....  | 37 |
| Figure 20. Schéma d'une carotte d'enrobé bitumineux instrumentée avec des jauges à fibre optique (Grellet 2018) .....  | 38 |
| Figure 21. Montage et préparation d'une carotte d'enrobé bitumineux instrumentée avec des jauges à fibre optique (Grellet 2018) .....  | 38 |

Figure 22. Schéma de l'instrumentation de la fosse expérimentale .....40

# Liste des Tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1. Principales causes de la genèse des nids-de-poule (Ministère des Transports du Québec (2007)..... | 7  |
| Tableau 2. Sommaire des instruments utilisés pour le projet.....   | 39 |



## 1 Introduction

Dans les environnements où soumis au gel saisonnier, comme c'est le cas au Canada, la performance des structures de chaussées flexibles est significativement affectée par les variations climatiques et l'interaction avec l'action des charges lourdes. Les nids-de-poule et les pelades sont des dégradations de chaussées retrouvées sur les chaussées flexibles souvent attribuées à l'action combinée du climat et des charges. En effet, bien que celles-ci soient retrouvées dans plusieurs types d'environnements et qu'elles ne soient pas exclusivement retrouvées en contexte climatique rigoureux, elles sont toutefois typiques des régions climatiques soumises aux cycles de gel et dégel. La genèse de ces dégradations fait l'objet de nombreuses recherches (Ghosh 2018; Komba et al. 2010; Vu 2017).

Ce rapport constitue le premier livrable d'un projet collaboratif entre le Ministère des Transports du Québec (MTQ), l'Université Laval (UL) et l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR). Le projet de recherche s'inscrit dans le contexte où la France et le Québec cherchent à mieux comprendre les effets du gel et du dégel sur les chaussées et à intégrer efficacement la prise en compte de ces phénomènes climatiques dans le dimensionnement des chaussées, ainsi que pour la formulation et les exigences au niveau des matériaux. Plus spécifiquement, suite aux travaux réalisés à l'IFSTTAR, ce projet vise à étudier en conditions réelles et contrôlées les mécanismes conduisant à la formation de cavités dans la partie supérieure d'une chaussée, et à comprendre comment le gel/dégel, l'eau et les charges contribuent à la manifestation de ce type de dégradation.

Ce document présente une mise en contexte, les installations, équipements et principaux instruments qui seront utilisés dans le projet. Par ailleurs, une version préliminaire du plan expérimental est mise en suggérée. Il doit être notée que le plan

expérimental sera précisé en 2019 lors des réunions préliminaires qui auront lieu en vue de la construction de la planche expérimentale. L'arrivée d'un étudiant attiré au projet au cours des prochains mois sera aussi l'occasion de réaliser une revue de littérature complète sur le sujet.

## 2 Contexte et problématique

Les chaussées routières sont soumises à diverses sollicitations liées au trafic et au climat. En particulier, au Québec, les chaussées subissent des variations de température importantes et sont soumises au phénomène de gel/dégel (Doré and Zubeck 2008). Il est également admis que les changements climatiques amènent une augmentation des précipitations (Doré et al. 2014). Ces surplus d'eau combinés à l'augmentation des sollicitations thermiques sont susceptibles d'accélérer l'endommagement des chaussées et des matériaux routiers, notamment les enrobés (Lamothe et al. 2015).

Aux niveaux inférieurs du système de chaussée, le comportement des couches non liées sous l'effet de ces phénomènes est raisonnablement bien compris et intégré dans la conception des chaussées, ce qui permet d'atténuer les désordres structurels qui seraient induits par le gel/dégel de cette partie de la chaussée. Par exemple, les travaux de Richter (2004) ont permis de rassembler une documentation exhaustive sur les variations saisonnières au niveau de la rigidité des couches granulaires de chaussées. L'expérience des dernières décennies a également permis de définir des critères de sélection adaptés permettant de s'assurer un bon comportement face aux particularités des sollicitations des cycles de gel et dégel (BNQ 2002). Au niveau des sols d'infrastructure, qui sont plus sensibles à l'action du gel, l'évolution des approches de prédiction de la pénétration du gel et du soulèvement associé ont notamment permis de mieux prendre en compte l'action du gel et du dégel sur les chaussées, notamment au Québec (St-Laurent 2012).

En revanche, ces dernières années, d'importants problèmes liés au gel en partie haute de chaussées bitumineuses sont apparus. Au niveau des enrobés bitumineux, les études des dernières années ont été axées sur la susceptibilité à l'eau et les effets du nombre de cycles de gel et dégel (Chen and Huang 2008; Lamothe et al. 2015). Selon Vu et al. (2015), les conséquences de l'effet du gel n'ont que peu été

démontrées expérimentalement. Sur les chaussées en service, les dommages associés se manifestent principalement sous forme de départs de matériaux (pelades, nids-de-poule) en surface de chaussée, et peuvent apparaître subitement sur plusieurs kilomètres sans signe précurseur spécifique. Une telle problématique a été observée en France et dans des pays limitrophes lors d'épisodes de gel et dégel (Vu et al. 2017), et elle est typique des régions où les variations saisonnières et les conditions de gel et dégel sont courantes, comme c'est le cas au Québec (Bergeron et al., 2014).

Les nids-de-poule sont des cavités de forme généralement arrondie dont la profondeur peut atteindre la fondation et qui constituent la dernière étape de la détérioration des chaussées (Bergeron et al. 2014). La Figure 2 présente un exemple type d'un nids-de-poule sur une chaussée flexible. Selon Doré et Zubeck (2008), un nids-de-poule n'est pas conceptuellement un type de dégradation de chaussée à proprement dit, mais bien une manifestation extrême de la détérioration d'une zone fissurée, pour diverses origines de fissures. Ils seraient attribuables aux délais et lacunes d'entretien préventif de diverses dégradations dans leur phase initiale de développement (Ghosh et al. 2018). Ces cavités dans les chaussées surviennent typiquement lorsque trois conditions sont réunies : ouvertures ou fissures à la surface de la chaussée, présence d'eau et action du trafic.

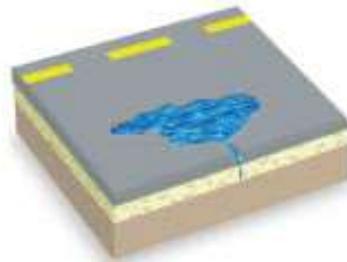
L'eau joue typiquement un rôle important dans l'évolution d'un nids-de-poule. Tel que présenté à la Figure 1, tirée du site web de la Ville de Québec, l'infiltration d'eau par une fissure affaiblie le support de l'enrobé bitumineux près de la zone fissurée. L'action du gel mène également au gonflement de la zone riche en eau/saumure aux abords de la fissure, menant à des déformations au niveau de la zone fissurée. Lors du dégel, la couche de revêtement reprend graduellement sa position, mais le gonflement au gel et l'eau présente près de la fissure contribuent à la diminution de la capacité de support; des pressions interstitielles positives peuvent également se développer dans la fondation. Dans ce contexte, le passage répété des véhicules

lourds sur la section affaiblie de la chaussée provoque la rupture incrémentale localisée du revêtement et la création d'un nids-de-poule.

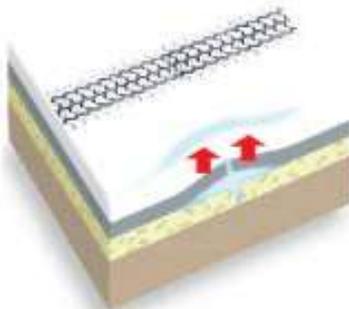
Il doit être noté que les processus et mécanismes menant à la formation des pelades sont relativement similaires, il faut par contre ajouter la qualité de l'adhésion entre deux couches d'enrobés comme cause potentiellement du décollement. Dans le cas des pelades, le fond de la dépression est la couche sous-jacente d'enrobé. Le Tableau 1 présente un résumé des causes probables menant à l'apparition de ces dégradations sur les chaussées flexibles, tel que décrit dans le guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples (Ministère des Transports du Québec, 2007).



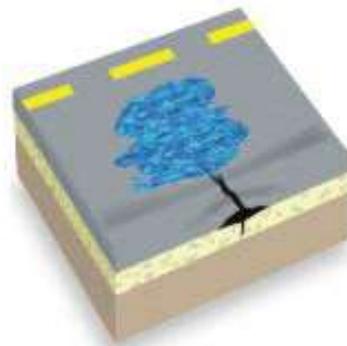
1- Fissures : Des fissures se forment et brisent l'étanchéité de l'asphalte.



2- Eau : L'eau s'infiltré sous la chaussée et fragilise la fondation.



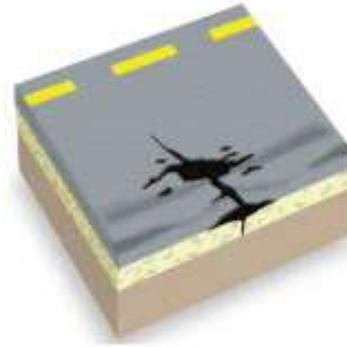
3- Gel : En hiver, l'eau infiltrée gèle et augmente de volume, exerçant une pression sur la couche de revêtement.



4- Dégel : Lorsque l'eau dégage, elle reprend son volume normal. La chaussée se reajuste, mais elle devient moins résistante aux charges.



5- Circulation : La circulation et le poids des véhicules, notamment des camions, affaibliront considérablement la chaussée là où il y a eu infiltration d'eau.



6- Nids-de-poule : Le passage répété des véhicules sur la chaussée affaiblie causera son affaissement, créant des trous qui s'agrandiront tant qu'ils ne seront pas réparés.

Figure 1. Processus de formation des nids-de-poule (site web de la Ville de Québec [https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/travaux\\_entretien\\_rues/nids\\_poule/formation-des-nids-de-poule.aspx](https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/travaux_entretien_rues/nids_poule/formation-des-nids-de-poule.aspx))

Tableau 1. Principales causes de la genèse des nids-de-poule (Ministère des Transports du Québec (2007))

| Dégradations  | Causes   |
|---------------|--|
| Pelade        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mauvaise adhésion de la couche de surface</li> <li>- Épaisseur insuffisante de la couche de surface</li> <li>- Sollicitations élevées par le trafic</li> </ul>  |
| Nids-de-poule | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manifestation finale d'une combinaison de phénomènes : Fissuration, infiltration d'eau, gel/dégel, trafic</li> <li>- Revêtement fortement fissuré ou d'épaisseur insuffisante</li> <li>- Faiblesse ponctuelle de la fondation</li> <li>- Forte sollicitation du trafic</li> </ul> |



Figure 2. Nids-de-poule sur une chaussée flexible (Ministère des Transports du Québec, 2007)



Figure 3. Pelade sur une chaussée flexible (Ministère des Transports du Québec, 2007)

L'opportunité d'étude présentée dans ce rapport fait suite aux travaux réalisés à l'IFSTTAR par Vu (2017), dont des résultats typiques sont présentés à la Figure 4 et à la Figure 5. Cette recherche a d'abord visé la réalisation d'essais expérimentaux sur des éprouvettes à l'état sec et à l'état partiellement saturé. Des essais de gonflement libre (CTFS : Cooling Test in Free Stress condition) et de retrait thermique empêché (TSRST : Thermal Stress Restrained of Specimen Test) ont été effectués. Des travaux de modélisation ont par la suite permis de reproduire les résultats de laboratoire.

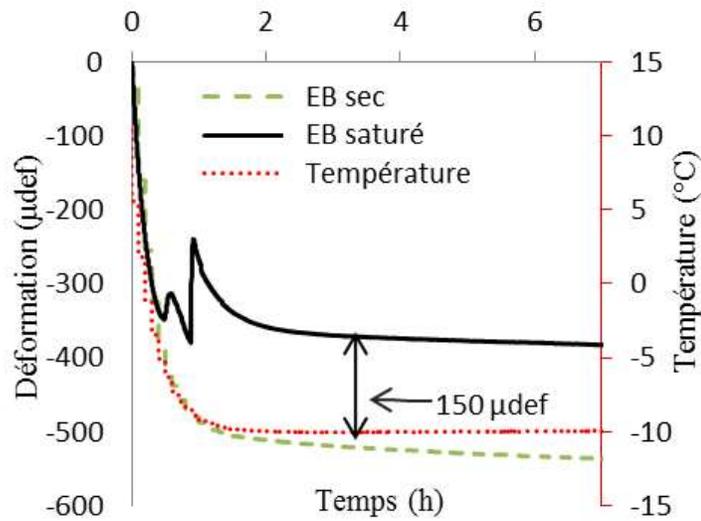


Figure 4. Evolution de la déformation axiale de la deuxième éprouvette ( $\text{Ø}50 \times 160 \text{mm}$ ) avec  $n=5.1\%$  et  $S_r = 60\%$  à l'essai CTFS (Vu et al. 2017).

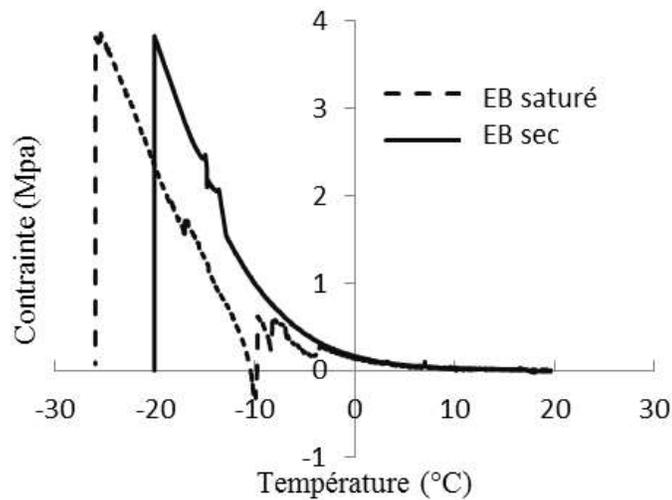


Figure 5. Contrainte verticale en fonction de la température de l'enrobé sec et saturé ( $S_r = 60\%$ ) à l'essai TSRST (Vu et al. 2017).

Dans le cas de l'essai CTFS, la mesure des déformations radiales et verticales montrent une divergence de comportement significative entre une éprouvette sèche

et une autre partiellement saturée. Suite au refroidissement thermique, une contraction de l'éprouvette se produit. Par contre, avec la diminution des températures, l'éprouvette partiellement saturée montre un comportement chaotique contraction-dilatation menant à une différence de déformation (dilatation) au gel entre l'état sec et partiellement saturé d'environ 150 microdéformation. Cette déformation est non récupérée et est entièrement attribuable au gel de l'éprouvette. Dans le cas de l'essai TSRST (Figure 5), en imposant une déformation nulle sous une diminution de la température, une contrainte thermique se développe dans les éprouvettes. Une différence notable est encore notée entre les deux conditions de saturation. Une contrainte de gonflement de 1,4 MPa est identifiée lors du gel de l'eau. Le cheminement dans l'espace contraint en fonction de la température pour le développement de cette contrainte est chaotique et mène à une rupture à une température plus froide. Cette contrainte de gonflement est associée à la déformation de gonflement. L'effet de diminution de la température de rupture peut sembler un avantage a priori. Cependant, dans une structure de chaussée, la conséquence pourrait être négative dû à la redistribution de la contrainte induite par la formation de glace.

L'application de ces principes expérimentaux à des systèmes bi-couches d'enrobés a également permis de montrer un endommagement de l'interface lorsque le système est soumis à des cycles de gel et dégel. En effet, pour un enrobé de surface partiellement saturé collé sur un enrobé de base sec, Vu (2017) interprète cet endommagement par l'apparition de contraintes d'arrachement importantes au niveau de l'interface. Ce phénomène est une cause probable pouvant expliquer l'initiation de nids de poule sur la chaussée et son développement dans les bandes de roulement sous l'effet du trafic.

## 2.1 Conclusion

Comme les nids-de-poule et les pelades nécessitent parfois la fermeture de voies et de routes, ainsi que des interventions en urgence, et de par les caractéristiques physiques de ces dégradations, leur présence sur une chaussée pose des problèmes de sécurité majeurs et peut engendrer des bris matériels significatifs. L'intervention, souvent urgente et effectuée typiquement dans des conditions non optimales (gel, dégel, eau, etc.), la rend essentiellement temporaire (TAC 1997). Bien que certains facteurs communs à l'apparition de ces désordres puissent être recensés, les raisons expliquant ceux-ci restent mal comprises, ce qui pose un certain nombre de questions aux gestionnaires de chaussées : Quels sont les mécanismes en cause ? Comment réparer efficacement les chaussées endommagées ? Comment éviter que de tels phénomènes se reproduisent à l'avenir ? Quels sont les sections de chaussée les plus vulnérables vis-à-vis de ces agressions climatiques ? Dans ce contexte, les travaux proposés ont pour objectifs de comprendre les phénomènes et mécanismes associés à ces dégradations à l'échelle d'une structure de chaussée et d'analyser comment les cycles de gel et de dégel, l'eau et l'action des charges roulantes influencent leur manifestation.

### 3 Objectifs

Afin de travailler sur la problématique identifiée, l'objectif principal du projet de recherche est :

- Augmenter la durabilité des revêtements de chaussée en enrobé bitumineux sous l'effet combiné de l'eau, des cycles de gel-dégel et du trafic.

Par ailleurs, les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

- Vérifier et quantifier le comportement des revêtements bitumineux et de leurs interfaces en conditions partiellement saturées, à l'aide d'un essai de simulation de trafic en conditions contrôlées (température / humidité);
- Identifier les variables importantes et proposer ou valider un modèle de prévision de la durabilité des revêtements dans ces conditions;
- Proposer une méthode d'analyse et des recommandations pour augmenter la durabilité des enrobés soumis aux actions combinés de l'eau, du gel et du trafic.

## 4 Laboratoire de recherche sur les chaussées de l'Université Laval

En 2009, un groupe de chercheurs du département de génie civil de l'Université Laval a obtenu une subvention de 18 millions de dollars pour la construction d'infrastructures de recherches axées sur les infrastructures. La subvention a été obtenue de la Fondation Canadienne pour l'Innovation et du Ministère de l'éducation, de l'Enseignement Supérieur de la Recherche du Québec. Les nouveaux laboratoires incluent des installations de recherche sur les structures et matériaux, le traitement des eaux et les chaussées.

Les infrastructures construites pour la recherche sur les chaussées ont mobilisé environ la moitié du budget de la subvention. Les investissements principaux dans cet axe de recherche ont été faits pour le développement et la construction d'un simulateur climatique et de véhicules lourds, pour la construction d'un garage de recherche et d'une fosse expérimentale pleine grandeur, ainsi que pour la construction de laboratoire de géotechnique routière selon l'état de l'art.

L'acquisition de ces équipements de recherche vise à répondre à plusieurs problématiques. En effet, les études typiques dans le domaine des chaussées sont généralement réalisées soit au niveau 'matériau', soit sur des modèles réduits reproduisant le système multicouche de la chaussée ou à partir d'observations sur chaussées en service. Ces activités font ressortir soit d'importants effets d'échelle ou requièrent plusieurs années d'observations et de suivi afin d'arriver à des conclusions significatives. Les simulateurs de véhicules lourds permettent de reproduire plusieurs années de trafic lourd dans une courte période, de contrôler précisément les conditions expérimentales et permettent de mesurer la performance et la réponse des structures de chaussées. Ils permettent aussi d'étudier le comportement de chaussées pleine grandeur au niveau 'système'. La Figure 6 présente schématiquement les différentes options disponibles pour effectuer des recherches sur les chaussées. Il est possible de constater que l'utilisation de simulateur de

véhicules lourds (accelerated pavement testing) permet d'obtenir une information ayant une fiabilité/représentativité de moyenne à élevée, pour des coûts moyens à élevés.

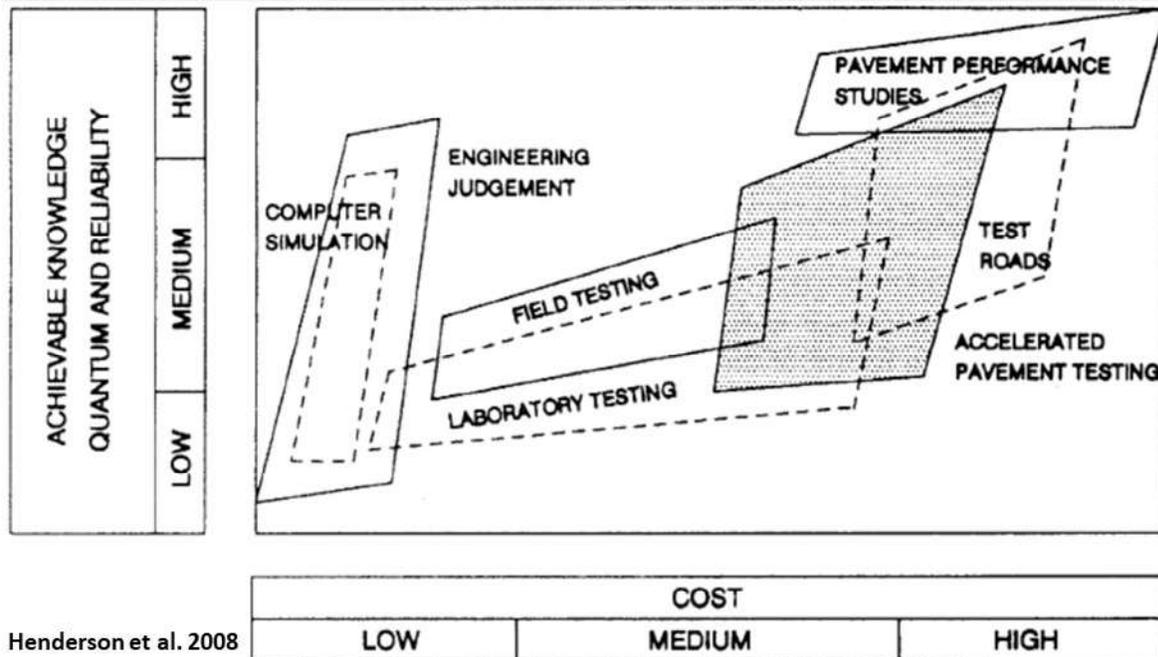


Figure 6. Représentation schématique des possibilités d'essais pour l'étude des chaussées ainsi que leurs coûts et bénéfices relatifs

Le garage expérimental, la fosse de laboratoire, ainsi que le simulateur, seront les principales infrastructures utilisées dans le cadre de ce projet. La présente section du rapport est un sommaire des principales caractéristiques des équipements et de leur mode de fonctionnement.

## 4.1 Simulateur routier de l'Université Laval

Le simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval est une remorque aux dimensions légales pouvant être déplacée par un tracteur remorque (Figure 7). Cet équipement est conçu pour une utilisation dans le garage de recherche, au-dessus de la fosse expérimentale, ou pour une utilisation sur des sites expérimentaux. Il permet de contrôler précisément les conditions thermiques de la chambre d'essai sous le simulateur ainsi que les conditions de chargement.

Le simulateur de l'Université Laval est un simulateur linéaire. Un chariot, sur lequel sont montées les roues et les pneus, appuyé sur des rails est entraîné sur la section d'essai en faisant des aller-retour sous le simulateur sur la majeure partie de sa longueur. Lorsque le simulateur n'est pas attaché à un tracteur remorque, il repose soit sur son essieu tandem et deux appuis (Figure 8), ou soit sur quatre vérins hydrauliques positionnés aux quatre coins de la machine (Figure 9).

Les principales caractéristiques du simulateur sont les suivantes :

- Véhicule légal pouvant circuler sur les routes sans contrainte particulière.

Cette caractéristique permet au simulateur d'être déplacé sur le réseau routier sans besoin spécifique en termes de permis au niveau des charges et des dimensions.

- Dimensions : 2,5 m x 16,1 m x 4,1 m (largeur x longueur x hauteur);
- Peut être utilisé dans le garage prévu à cette fin ou sur des sites expérimentaux.

Cette caractéristique rend le simulateur très polyvalent en comparaison avec d'autres machines de même catégorie dans le monde. Plus typiquement, les simulateurs de véhicules lourds sont soit fixes ou ont une mobilité limitée sur site.

- Poids total : 29400 kg
- Configuration des essieux : tandem catégorie B.21 (Ministère des Transports 2013)

Le tandem arrière du simulateur (Figure 8) est assemblé et désassemblé pour déplacer la machine ou pour faire des essais.

- Fonctionne soit par alimentation électrique ou par génératrice (40 kW).

Cette fonctionnalité du simulateur est prévue afin de permettre son alimentation électrique autant dans les endroits où le réseau électrique est disponible que dans les endroits plus isolés.

- Système d'entraînement par poulie motorisée de 22,4 kW.

Le système d'entraînement par poulie permet de déplacer le chariot sur lequel sont fixés l'essieu, les roues, les pneus et le système de contrôle pneumatique de la charge axiale (Figure 10) (Figure 11).

- Longueur maximale d'essai à vitesse constante de 6 m.

La longueur maximale sur laquelle le simulateur peut garder constante la vitesse du chariot est de 6 m. Néanmoins, celle-ci peut être diminuée en fonction des caractéristiques de la planche expérimentale, ce qui

peut affecter la productivité, dû à la distance qui doit être parcourue par le chariot.

- Jusqu'à 10 000 (unidirectionnel) à 20 000 (bidirectionnel) passages de charges par jour.

La charge roulante peut être appliquée sur l'échantillon de chaussée soit seulement lors de l'aller, ou soit durant l'aller-retour complet. Dans le premier cas, le retour du chariot est effectué avec la roue soulevée. Ce mode de sollicitation est plus représentatif du chargement des structures de chaussées en conditions réelles. La productivité est affectée par la longueur de la planche d'essai sélectionnée.

- Vitesse du chariot : 0 à 10 km h<sup>-1</sup>.
- Déplacement latéral de +/- 0,25 m.

Cette fonctionnalité permet de contrôler la position des pneus dans l'axe perpendiculaire à la direction de roulement. Elle est utile afin que les sollicitations soient davantage réalistes, puisque dans la réalité, les véhicules ne circulent pas tous exactement au même endroit dans le sentier de roue. Il est possible d'appliquer une loi normale, définie par un écart-type et une moyenne, qui permet de paramétrer automatiquement la position transversale de passage.

- Charge de 5 à 100 kN sur un demi-essieu.

La charge minimale du simulateur est la charge inertielle du chariot et de ses composantes (essieu, roues, pneus, etc.), soit environ 500 kg. Un système de pneumatique contrôlé par le logiciel permet d'appliquer une force verticale sur l'essieu par l'application d'une pression d'air. La

charge peut atteindre jusqu'à 100 kN, ou 10 000 kg, sur le demi-essieu, ce qui représente deux fois la charge légale sur un demi-essieu simple (5000 kg) selon les normes en vigueur dans la Province de Québec.

- Permet de contrôler la pression des pneus et de tester plusieurs types ou dimensions de pneus;
- Équipé d'un système de chauffage (6 kW) et de climatisation (4 kW) permettant d'imposer et de contrôler la température de la surface de la section d'essai entre 40°C et -20°C.

Le simulateur est mis en place avec des panneaux isolants sur le pourtour de la machine afin de restreindre et contrôler l'accès, mais surtout dans l'objectif de contrôler la température. Cette configuration crée une chambre d'essai dont la température est mesurée à l'aide d'une sonde et régulée avec le système thermique. Ce système permet notamment de geler ou dégeler l'échantillon de chaussée lorsque la température ambiante est près de la température pièce hors de la chambre d'essai.



Figure 7. Simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval tiré par une remorque



Figure 8. Simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval en mode transport



Figure 9. Simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval en mode essai



Figure 10. Poulie d'entraînement du chariot



Figure 11. Chariot supportant l'essieu, les roues et les pneus

#### 4.2 Fosse expérimentale

La fosse expérimentale est située dans le garage de recherche du département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval (Figure 12). La configuration du garage est prévue de façon à ce que le simulateur climatique et de véhicules lourds soit positionné directement au-dessus de la fosse. Les systèmes de chaussées expérimentales sont construits dans la fosse, lorsque le simulateur est déplacé temporairement.

La fosse expérimentale possède les caractéristiques suivantes :

- Dimensions : 2 m x 6 m x 2 m (Largeur x Longueur x Profondeur).

Les dimensions de la fosse sont adaptées aux caractéristiques techniques et aux dimensions du simulateur. Par exemple, la longueur de la fosse (6 m) a été établie à partir de la capacité maximale du simulateur en termes de longueur de planche d'essai.

- Rampe d'approche de 6 m de longueur pour faciliter l'accès de la machinerie (Figure 12);
- Drainage et injection d'eau au bas de la fosse.

Cette caractéristique permet de notamment contrôler la hauteur d'eau dans le système de chaussée. Le point d'injection et de drainage est situé à une extrémité de la fosse. Afin de s'assurer de la distribution uniforme de l'eau dans la fosse, une couche de pierre nette 10-14 mm d'environ 200 à 250 mm est typiquement mise en place au fond de la fosse (Figure 13). Le niveau d'eau est contrôlé automatiquement par un capteur de pression électronique.

- Possibilité de collecte indépendante des eaux de percolation dans la chaussée.

L'eau drainée peut être recueillie de façon indépendante dans un bassin de sédimentation situé en dessous du niveau inférieur de la fosse. Cette caractéristique présente un intérêt spécifique pour, par exemple, l'étude de la migration de contaminants aux travers des couches du système de chaussées ou de la composition chimique des lixiviats ayant migrés dans la structure.

- Circuit fermé de liquide de conditionnement thermique dans la dalle de béton du bas de la fosse pour le contrôle de la température et du gradient thermique.

Le simulateur permet de contrôler la température appliquée en surface du système de chaussée, alors que la fosse est équipée pour effectuer le contrôle de la température en base. Pour ce faire, deux compresseurs de contrôle thermique -1 à -10 °C de 7,46 kW sont utilisés. Un circuit fermé de tuyauterie préalablement encastré dans le béton lors de la coulée. Ces outils permettent d'assurer un contrôle de température en base de la fosse variant entre près de 30 °C (chauffage du système par frottement) à -10 °C.

- Zone d'accès à la façade latérale de la fosse pour faciliter l'instrumentation et le contrôle.
- Fosse divisible en deux sur la longueur pour augmenter la productivité et diminuer les coûts (Figure 15);

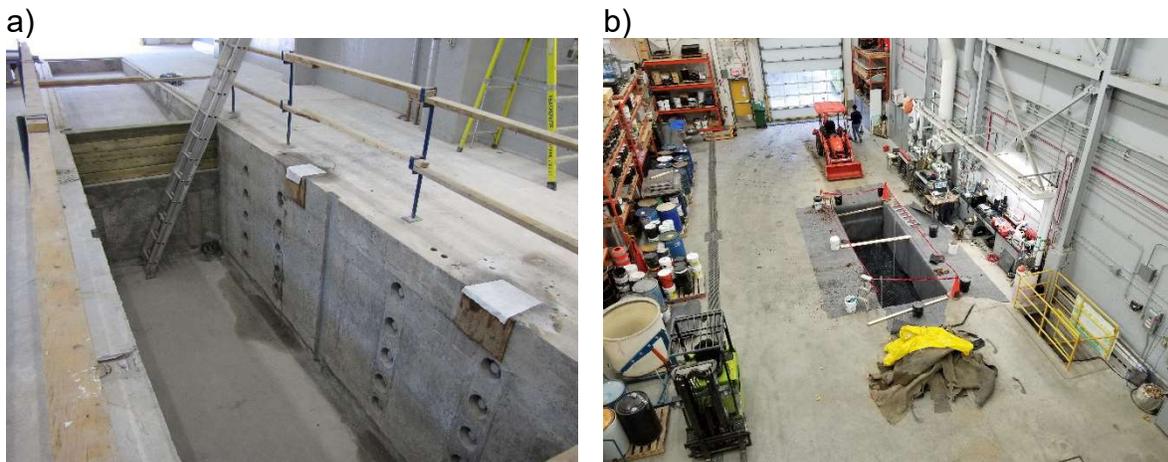


Figure 12. a) Fosse expérimentale et rampe d'accès; b) Vue de dessus de la fosse



Figure 13. Utilisation de pierre nette au fond de la fosse



Figure 14. Unités de conditionnement thermique pour la dalle de béton au bas de la fosse



Figure 15. Séparation de la fosse en deux sous-sections ayant des caractéristiques différentes (épaisseur d'enrobé bitumineux est différente dans le cas présenté)

## 5 Exemple d'utilisation du simulateur climatique et de véhicules lourds de l'Université Laval pour l'étude des effets du gel et du dégel

Dans le contexte de ce projet portant sur l'action du gel sur les structures de chaussées, et de l'interaction avec l'action des charges, les installations de recherche présentes à l'Université Laval sont particulièrement adaptées à répondre aux objectifs formulés. Afin d'illustrer un exemple de la capacité des installations de recherche à simuler les cycles de gel et dégel sur une chaussée, une partie des travaux de El youssoufy (2016), menés en collaboration avec le Ministère des Transports du Québec, sont brièvement introduits dans cette section.

Parmi les objectifs du projet mené entre 2013 et 2016, l'effet des cycles de gel et dégel devait être documenté. Plus spécifiquement, des informations sur comment la réponse d'une chaussée gelée change en fonction de la profondeur de dégel, pour différentes températures, ont été recueillies. Par exemple, tel qu'illustré à la Figure 16, la chaussée devait d'abord être gelée. Il est possible d'effectuer cette opération sur une longue période et pour des valeurs ciblées de température afin d'obtenir une grande profondeur de gel. Dans l'exemple présenté, pour une structure de chaussée de 750 mm reposant sur un sol silteux, une profondeur de gel de 1,5 m est atteinte et un soulèvement de 13 mm, attribuable au sol d'infrastructure, est observé.

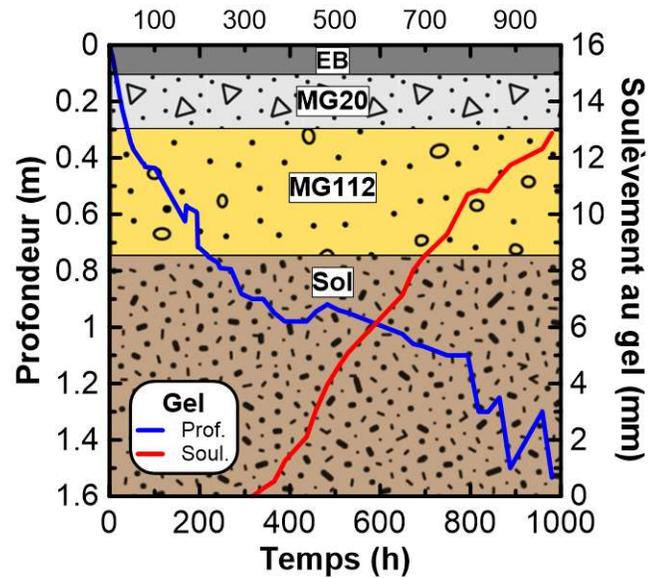


Figure 16. Exemple de gel de la chaussée et soulèvement associé lors du projet de El youssoufy (2016)

Suite à l'atteinte de la profondeur de gel de 1,5 m, le dégel de la chaussée a été initié. Le dégel a été effectué à 20 °C dans la chambre d'essai. La Figure 17 montre les différents profils thermiques mesurés dans la chaussée lors du dégel. Le comportement mécanique de la chaussée (contraintes et déformations dans les couches) a été mesuré pour des profondeurs de dégel (TD à la Figure 17) de 300, 600, 900 et 1200 mm. Dans chacun de ces quatre cas, au moment où la profondeur de dégel ciblée a été atteinte, la température dans la chambre d'essai a été momentanément diminuée à -10 °C et la réponse de la chaussée a été mesurée lorsque la température à la mi-couche de l'enrobé était de 10, 0 et -5 °C.

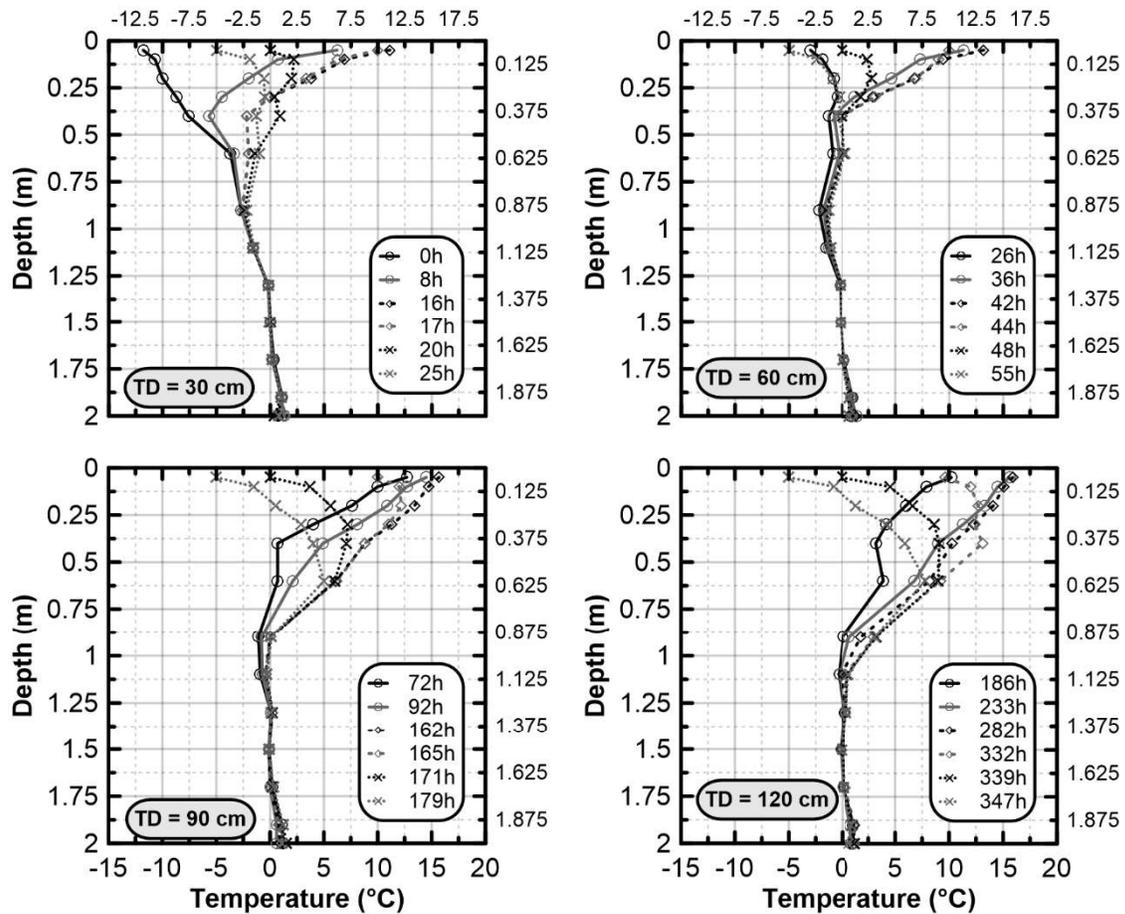


Figure 17. Profils de températures mesurés en conditions de dégel partiel lors du projet de El youssoufy (2016)

La Figure 18 présente un sommaire des résultats collectés dans les différentes conditions de dégel partiel imposées lors de cet essai. À des fins de documentation, l'évolution de la profondeur de dégel et du module dynamique de l'enrobé bitumineux, estimés à partir de la température et de la fréquence de sollicitation, sont présentés. Les résultats de contrainte et de déformation sont exprimés en valeur relative par rapport aux valeurs de contrainte ou de déformation mesurées avant le gel de la chaussée, soit en condition optimale (température pièce). Les contraintes ( $\sigma$ ) verticales dans les sols et matériaux granulaires, ainsi que les déformations ( $\varepsilon$ ) dans

les sols, matériaux granulaires et l'enrobé, sont rapportées en termes de % de la valeur avant gel ( $\sigma_n$  et  $\varepsilon_n$ ). Dans le cas de cette chaussée expérimentale, il est possible d'observer que l'affaiblissement (par exemple  $\varepsilon_n > 100\%$ ) se produit essentiellement dans le sol d'infrastructure lorsque la profondeur de dégel excède 900 mm. Dans ce cas-ci, l'essai n'a pas été effectué sur une longue période afin de suivre la récupération de la chaussée et du sol.

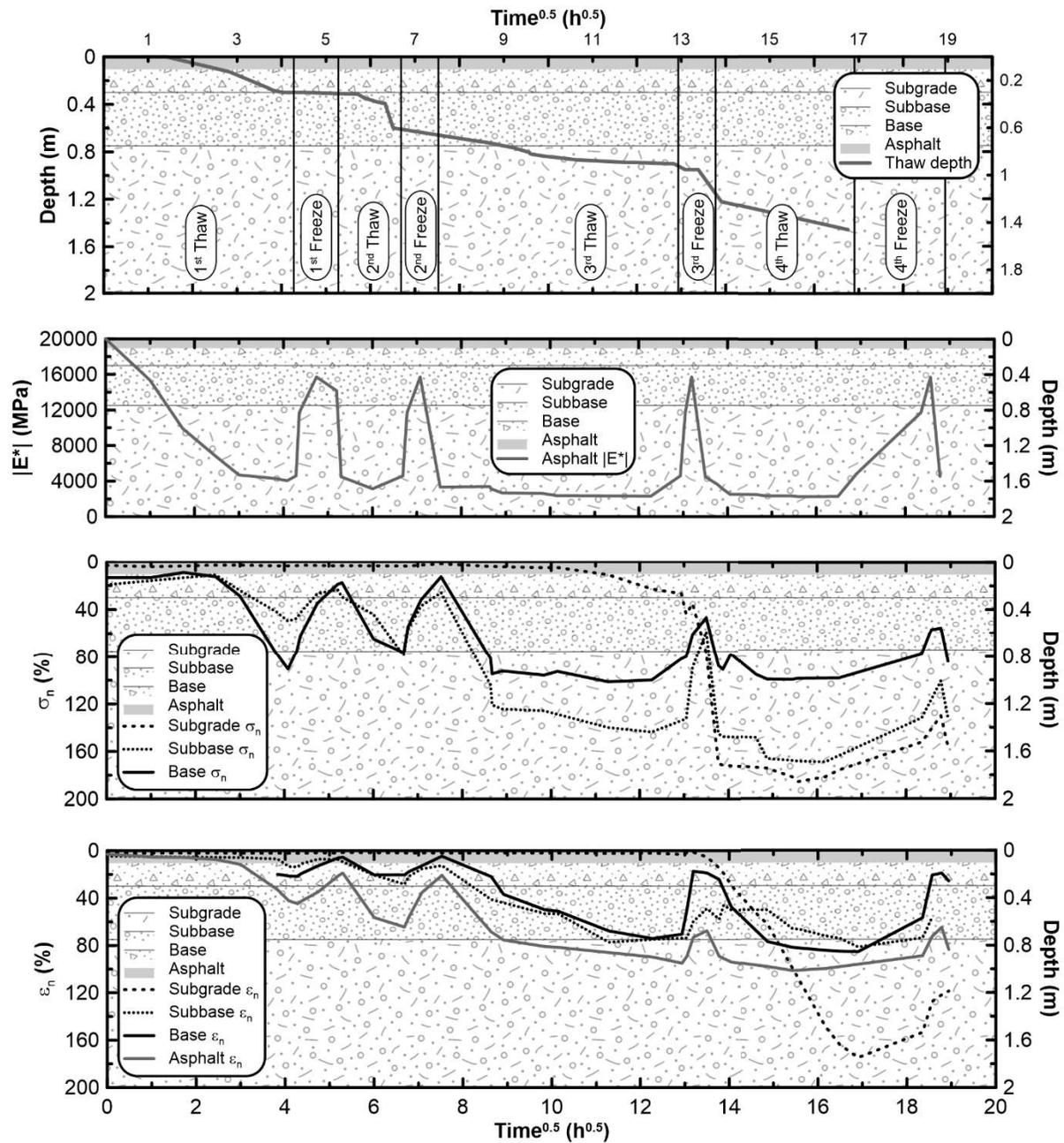


Figure 18. Réponse mécanique mesurée en conditions de dégel partiel lors du projet de El youssoufy (2016)

## 6 Étapes de la phase expérimentale

Au courant de l'année 2019, un protocole expérimental sera défini précisément pour caractériser la réponse et la performance d'un revêtement bitumineux (bicouche). La phase expérimentale de laboratoire du projet comportera essentiellement quatre principales étapes : 1. Construction et instrumentation, 2. essai de réponse, 3. essai de chargement accéléré et 4. auscultation/diagnostic. Il doit être précisé que, lors des essais de réponse, trois principaux cas de chargement seront considérés, soit le passage d'une charge roulante en conditions standard dites de « référence », ainsi qu'en conditions partiellement saturées et au cours de cycles de gel et dégel. Plus spécifiquement, le protocole établi devra permettre de :

- a) Mesurer les déformations horizontales (longitudinale et transversale) différentielles se produisant au sommet de la couche de base ainsi qu'en bas de la couche de surface au passage d'une charge roulante;
- b) Mesurer l'effet des variations environnementales (saturation, gel et dégel) sur les mesures considérées en a) par des essais de type « réponse », correspondant au passage d'une charge; les conditions testées incluront notamment des états de température et d'humidité typiques;
- c) Mesurer la performance de la section d'essai par un test de chargement accéléré avec répétition de charges;
- d) Étudier a posteriori, par carottage, la condition de l'interface du système d'enrobés bicouche, par la réalisation d'essais à l'IFSTTAR.

La présente section détaille les principes préliminaires suggérés pour le phasage expérimental. Ceux-ci seront définis plus en détails en 2019 en vue d'une construction de la chaussée à l'automne 2019.

## 6.1 Construction et instrumentation

La structure de chaussée sera construite sur un sol à déterminer par le comité de suivi. Des couches granulaires conformes aux exigences pour les MG112 et MG20 seront employées en sous-fondation et fondation granulaires non liées, respectivement. La stratigraphie sera également établie lors des réunions de préparation du projet de construction de la chaussée. Afin de connaître le comportement mécanique des matériaux de chaussées, des essais de module réversible et de déformation permanente seront effectués. Par ailleurs, la caractérisation routinière des matériaux utilisés sera effectuée.

L'équipe de l'Université Laval met en œuvre les couches de sols et de matériaux granulaires en utilisant une plaque vibrante. Les couches sont typiquement mises en place sur environ 150 mm d'épaisseur.

Des formules de matériaux bitumineux typiques des couches de base et de roulement utilisées au Québec seront utilisées et mises en place dans la fosse. La mise en œuvre des couches d'enrobés et de collage sera sous-contractée à un entrepreneur, étant donné l'expertise particulière nécessaire pour mettre en œuvre ce matériau. Comme pour les matériaux granulaires et les sols, des essais TSRST, gonflement libre, module complexe et fatigue seront réalisés à partir d'échantillons foisonnés recueillis en boîte. En référence aux travaux de Vu (2017), la mise en œuvre de la couche de surface devra permettre d'obtenir une teneur en vides d'au moins 6% afin de permettre la saturation partielle de la couche de surface. Des essais sont

actuellement en cours à l'IFSTTAR sur des plaques d'enrobés ESG-10 et EG-10 préparés au Ministère des Transports du Québec afin de définir les conditions optimales pour la mise en œuvre. Cet aspect est primordial afin de s'assurer de pouvoir imposer une saturation partielle suffisamment élevée qui pourrait permettre de reproduire les conditions expérimentales étudiées par Vu (2017) qui ont conduit aux observations sur le décollement d'un système bi-couche d'enrobés. Suite aux travaux réalisés à l'IFSTTAR, l'équipe de recherche prendra la décision sur le type d'enrobé de surface à utiliser ainsi que la teneur en vides. Il est suggéré d'utiliser un GB-20 en couche de base et un liant d'accrochage à prise rapide entre les deux couches d'enrobés.

Lors de la mise en œuvre, un suivi sera effectué au nucléodensimètre pour s'assurer que les conditions expérimentales souhaitées sont rencontrées. Ce suivi au nucléodensimètre est notamment primordial pour la couche de surface d'enrobé.

Des essais au FWD et de pénétromètre dynamique seront effectués sur la section d'essais suite à la construction.

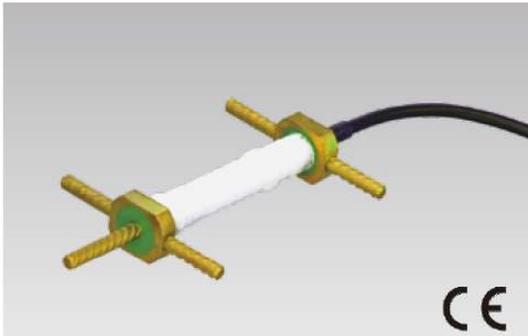
L'instrumentation de la chaussée sera effectuée par l'équipe de l'Université Laval. L'instrumentation sera installée dans le 3 m central dans la fosse. L'instrumentation permettra notamment de mesurer le profil de température et de teneur en eau dans la chaussée. Des capteurs de température seront aussi installés dans le bicouche d'enrobé bitumineux afin de définir de façon précise les conditions thermiques, telles notamment le passage de fronts de gel. Les couches de sols et de matériaux granulaires seront instrumentées pour permettre de mesurer les contraintes et déformations verticales.

Les couches d'enrobé bitumineux sont instrumentées pour mesurer la déformation à plusieurs horizons. Des jauges de mesure d'extension de type TML seront utilisées (Figure 19). Celles-ci seront installées dans les directions longitudinales et transversales sous la position centrale de chaque pneu du jumelage. Chaque jauge

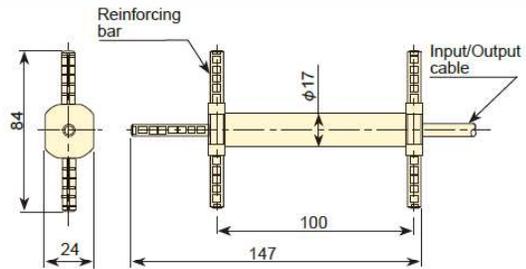
TML pour une direction et profondeur donnée sera doublée pour pallier les risques d'endommagement des capteurs lors de leur mise en place. Les jauges sont positionnées en bas et au sommet de la couche de base et en bas de la couche de surface. Un total de douze jauges TML sera ainsi mis en place; elles seront distancées de 0,4 m à chaque niveau dans l'axe longitudinal. Les jauges TML sont des jauges en H constituées d'un tube étanche à faible module, dans lequel une poutre fine sert de support aux jauges de déformation qui y sont collées. Ils sont résistants à la chaleur (180 °C maximum) et peuvent fonctionner sur une grande plage de déformation (5000 microdéformation); elles sont donc adaptées pour résister aux sollicitations (compactage et trafic) dans une chaussée. Elles ont un ancrage de type cylindrique de faible diamètre. Il est aussi suggéré d'utiliser en parallèle une carotte à fibre optique bi-niveau afin d'évaluer le potentiel comparatif de la technique pour l'étude du cas spécifique des déformations de part et d'autre de l'interface (Figure 20 et Figure 21). Cette technologie est basée sur l'installation de la jauge dans l'enrobé a posteriori. Tel qu'expliqué par Grellet (2018), une carotte d'enrobé est usinée afin de permettre le collage d'un corps de plastique sur lequel sont montées deux jauges à fibre optique (directions transversale et longitudinale). La carotte peut être instrumentée à plus d'un niveau. La technologie de mesure est basée sur l'interférométrie de Fabry-Perrot.

## KM-HAS Strain Transducers

Civil engineering design



The KM-HAS transducers are embedded into asphalt for measurement of internal strain. The transducers have reinforcing bar flanges at its both ends for good fixation to asphalt pavement materials, and provide for fully waterproof construction. The operating temperature range is -20 to +180°C.



### ■ SPECIFICATIONS

| TYPE                         | KM-100HAS                          |
|------------------------------|------------------------------------|
| Capacity                     | $\pm 5000 \times 10^{-6}$ strain   |
| Gauge length                 | 100mm                              |
| Rated output (Approximately) | 2.5mV/V (5000 $\mu\epsilon$ )      |
| Non-linearity                | 1%RO                               |
| Apparent elastic modulus     | Approx. 40N/mm <sup>2</sup>        |
| Strain measurement           | 350 $\Omega$ Full bridge           |
| Temperature measurement      | 350 $\Omega$ Quarter bridge 3-wire |
| Allowable temperature range  | -20 ~ +180°C                       |
| Bridge excitation            | Recommended 1-2V, Allowable 10V    |

Tokyo Sokki Kenkyujo

81

Figure 19. Jauges TML KM HAS (TOKYO SOKKI KENKYUJO)

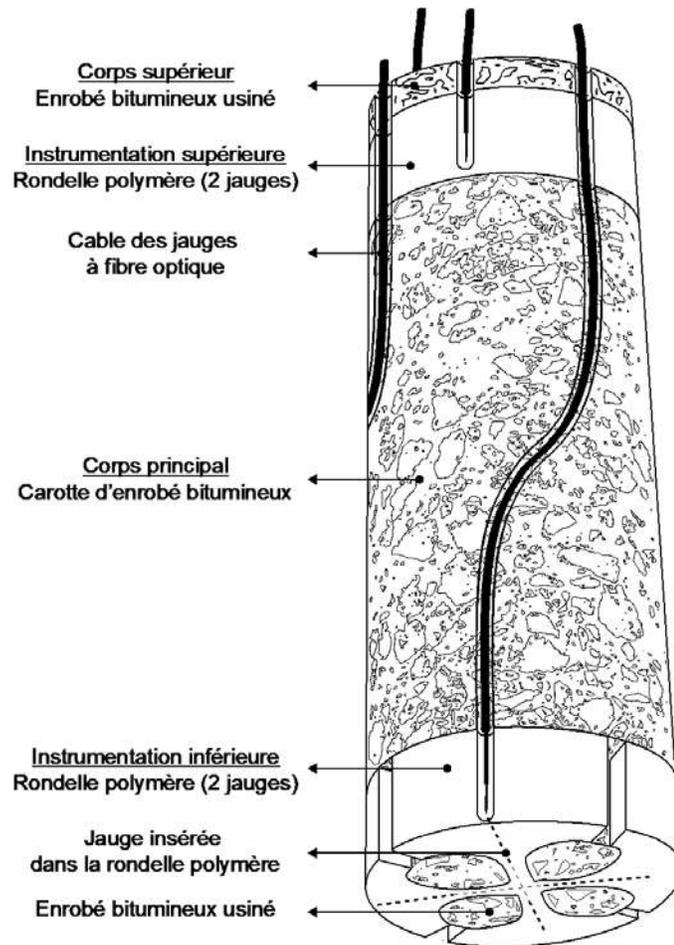


Figure 20. Schéma d'une carotte d'enrobé bitumineux instrumentée avec des jauges à fibre optique (Grellet 2018)



Figure 21. Montage et préparation d'une carotte d'enrobé bitumineux instrumentée avec des jauges à fibre optique (Grellet 2018)

Le Tableau 2 présente un résumé des principaux instruments prévus pour la réalisation du projet et de la rencontre des objectifs. Le schéma préliminaire de l'instrumentation est présenté à la Figure 22.

Tableau 2. Sommaire des instruments utilisés pour le projet

| <b>Couches</b>     | <b>Paramètre</b>                          | <b>Position</b>  | <b>Capteurs</b>   |
|--------------------|---|--|---|
| Enrobé bitumineux  | Déformation transversale et longitudinale | - Base de la couche de base<br>- Sommet de la couche de base<br>- Base de la couche de roulement | - 12 Jauge TML<br>- 1 Jauges à fibre optique  |
| Fondation          | Déformation et Contrainte verticale       | Milieu de couche   | - Haltère de déformation de l'Université Laval<br>- Cellule de pression de RocTest  |
| Sous-fondation     | Déformation et Contrainte verticale       | Milieu de couche   | - Haltère de déformation de l'Université Laval<br>- Cellule de pression de RocTest  |
| Sol                | Déformation et Contrainte verticale       | Sommet de la couche  | - Haltère de déformation de l'Université Laval<br>- Cellule de pression de RocTest  |
| Toutes les couches | Température<br>Teneur en eau              | Profondeur multiples   | - 1 chapelets de 10 thermistances<br>- 2 thermistances spécifiques insérées dans l'EB<br>- 1 sonde multiniveaux pour la mesure du profil de la teneur en eau (ProfileProbe de DeltaT Devices) |

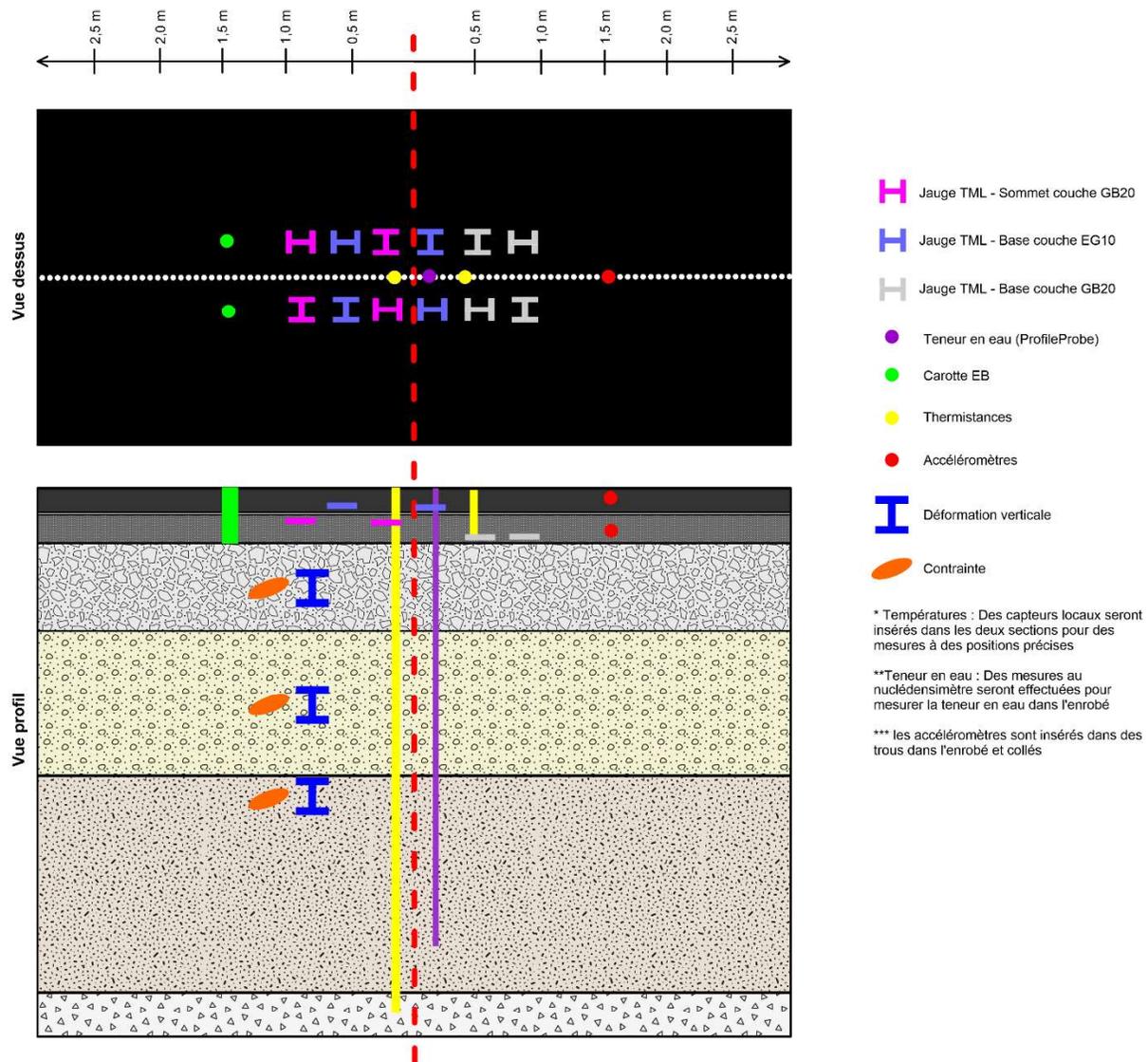


Figure 22. Schéma de l'instrumentation de la fosse expérimentale

## 6.2 Phase d'essais de type « réponse »

Cette phase d'essais permettra d'étudier l'effet des conditions environnementales sur le comportement mécanique (contraintes et déformations) du système bicouche d'enrobé bitumineux. Le simulateur de véhicules lourds sera utilisé avec une charge

de 5000 kg sur le demi-essieu. Des pneus jumelés seront utilisés à une pression de gonflage standard (700 kPa). La séquence suivante est proposée :

- Essais de type réponse pour les conditions de « référence », définis par un état sec des enrobés bitumineux et des températures d'environ 5 °C et 20 °C;
- Essais de type réponse à l'état sec à des températures d'environ 5 °C et 20 °C suite à l'application d'un cycle de gel-dégel;
- Essais de type réponse en conditions partiellement saturées à des températures d'environ 5 °C et 20 °C;
- Essais de type réponse en conditions partiellement saturées à des températures d'environ 5 °C et 20 °C suite à l'application d'un cycle de gel-dégel.

Durant la phase d'essais de type réponse avec le simulateur, des essais au déflectomètre à masse tombante seront également réalisés périodiquement pour mesurer la réponse des capteurs sous ce type de sollicitations.

Le gel sera imposé par une température de la chambre d'essai maintenue à -10 °C jusqu'à l'atteinte d'une profondeur de gel égale ou supérieure à l'épaisseur de la bicouche d'enrobé. Le dégel sera effectué à 20 °C.

Pour les phases d'essai envisagées avec saturation (partielle) des enrobés bitumineux, la saturation sera effectuée à l'aide d'un caisson rempli d'eau installé au-dessus de la section d'essai. Il sera laissé en place jusqu'à obtention d'une saturation partielle satisfaisante pour la réalisation des essais nécessitant cette condition. Le niveau de saturation sera mesuré au nucléodensimètre et au percomètre, calibrés pour les caractéristiques de l'enrobé mis en place. Des essais préliminaires sont

actuellement en cours pour valider un protocole d'utilisation d'un percomètre pour la mesure du niveau de saturation dans la couche de surface.

### 6.3 Phase d'essais de type endommagement accéléré

La chaussée expérimentale sera soumise à  $3 \times 10^5$  cycles unidirectionnels à 5000 kg sur le demi-essieu simple avec variation transversale de la charge suivant une distribution normale. Cette sollicitation permettra de solliciter la chaussée avec 614 181 Équivalent de Charges Axiales Simples. L'essai sera réalisé à une température ambiante de 20 °C. Néanmoins, durant l'essai d'endommagement accéléré, des cycles de gel-dégel seront également appliqués simultanément avec les charges. Les cycles de gel seront appliqués à une température de -10 °C jusqu'à l'atteinte d'une profondeur de gel égale ou supérieure à l'épaisseur du bicouche d'enrobé. Ces sollicitations climatiques seront appliquées tous les 50000 cycles suite à un épisode de saturation partielle de la couche de surface en enrobé.

L'orniérage et la fissuration, ainsi que la réponse de l'ensemble des capteurs, seront mesurés sur une base périodique durant l'essai afin d'étudier l'endommagement.

### 6.4 Auscultation et diagnostic

Suite à la réalisation de l'essai, il est suggéré d'effectuer différents essais afin de documenter la condition finale de la chaussée et des matériaux. La liste d'activités suivante est proposées :

- Réalisation d'essais de déflexion au FWD pour documenter l'évolution de la condition structurale suite à l'essai, si la condition de la chaussée le permet;
- Réalisation d'essais au pénétromètre dynamique pour documenter les modules finaux;
- Carottage de l'enrobé et expédition des carottes à l'IFSTTAR et au MTQ pour expertise approfondie;

## 7 Conclusion

Un projet de collaboration entre l'IFSTTAR, l'Université Laval et le Ministère des Transports portant sur les effets des cycles de gel et dégel sur les systèmes bicouches d'enrobés bitumineux a été initié en 2018. Il fait suite aux travaux de thèse de Vu (2017) réalisés à l'IFSTTAR. Ce projet prévoit notamment la réalisation d'une phase expérimentale avec un simulateur climatique et de véhicules lourds qui permet d'appliquer des cycles de gel et dégel à l'enrobé, tout en effectuant des sollicitations de charge roulante. Une analyse approfondie des mesures expérimentales sera confiée à un étudiant rattaché à l'IFSTTAR.

Ce rapport d'étape présente la problématique identifiée pour le projet, les installations et la capacité de recherche de l'Université Laval pour la réalisation de la phase expérimentale, ainsi que les éléments principaux de la méthodologie et de la séquence d'actions qui seront utilisées pour la réalisation expérimentale du projet. Il doit être noté que la méthodologie sera raffinée et réorientée, au besoin, lors des rencontres préparatoires qui auront lieu au courant de 2019, notamment en fonction des résultats d'essais sur enrobés réalisés à l'IFSTTAR. La construction de la section expérimentale est prévue à l'automne 2019.

## 8 Références

Badiane, M., El youssoufy, A., Doré, G. et Bilodeau, J.-P. 2016. Effet des charges sur la chaussée en période de restriction de charges. Rapport final GCT-2016-01 remis au Ministère des Transports du Québec, 102 p.

Bergeron, G., Paradis, M. et Tourangeau, G. 2014. Réparation des nids-de-poule. Info DLC, Vol. 19, no. 1, 3 p.

BNQ. 2002. Granulats – Travaux de génie civil. Bureau de normalisation du Québec (Québec, Que.), BNQ 2560-114.

Chen, X., Huang, B., 2008. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Constr. Build. Mater. 22, 1950–1962.

Doré, G., and Zubeck, H. 2008. Cold regions pavement engineering, McGraw-Hill, New York.

Doré, G., Bilodeau, J.-P., Thiam, P. M. et Drolet, F. P. 2014. Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers québécois. Rapport final 551010-111, Consortium Ouranos, 75 p.

El youssoufy, A. 2016. Effet des charges sur les chaussées en période de restriction des charges-volet laboratoire. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada.

Ghosh, D., Turos, M., Hartman, Marcella, H. and Milavitz, R., Le, J.L. and Marasteanu, M. 2018. Pothole Prevention and Innovative Repair. Final Report CTS #2016007, Minnesota Local Road Research Board, Minnesota Department of Transportation, St-Paul, Minnesota, 129 p.

Grellet, D. 2018. Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement viscoélastique des couches bitumineuses et de leur interface. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.

Komba, J., Maharaj, A., Paige-Green, P. 2010. Potholes: Technical Guide to their Causes, Identification, and Repair. CSIR Built Environment, Stellenbosch, South Africa, 52 p.

Lamothe, S., Perraton, D., Di Benedetto, H., 2015. Contraction and expansion of partially saturated hot mix asphalt samples exposed to freeze–thaw cycles. *Road Mater. Pavement Des.* 16, 277–299.

Ministère des Transports du Québec, 2007. Guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples. Bibliothèque et archives nationales du Québec, 71 p.

Richter, C.A. 2006. Seasonal variations in the moduli of unbound pavement layers. Federal Highway Administration, report FHWA-HRT-04-079, 283 p.

St-Laurent, D. 2012. Routine Mechanistic Pavement Design against Frost Heave. *Cold Regions Engineering* , 144-154.

Vu, V.T. 2017. Étude expérimentale et numérique du comportement au gel et dégel des enrobés bitumineux partiellement saturés. Thèse de doctorat, IFSTTAR, France.

Vu, V. T., Chupin, O., Piau, J.-M. et Hammoum, F. 2017. Étude expérimentale et numérique du comportement de l'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau à température variable. Compte-rendu du 23<sup>ème</sup> congrès français de mécanique, Lille, 28 août au 1<sup>er</sup> septembre 2019, 10 p.

Xu, H., Guo, W., Tan, Y., 2015. Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze–thaw cycles. Mater. Des. 86, 436–446.