



## PARTENAIRES

## ACTUALITÉS

### CHAIRE i3C FAIT BONNE FIGURE À LA CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES CHAUSSÉES SOUPLES À NAGOYA (JAPON)



Cérémonie d'ouverture de la 11<sup>e</sup> conférence internationale sur les chaussées souples (Nagoya, Japon)

La 11<sup>e</sup> « International Conference on Asphalt Pavements » a été tenue du 1<sup>er</sup> au 6 août 2010 à Nagoya au Japon. Rappelons que la 10<sup>e</sup> conférence de cette prestigieuse série, organisée conjointement par Transports Québec et l'Université Laval, a été tenue à Québec en août 2006. La Chaire de recherche industrielle du CRSNG i3C a très bien figuré lors de cet événement d'envergure avec les trois présentations suivantes :

La première faisait état des résultats des travaux de Claudia Mellizo sur la prédiction des modules réversibles des matériaux granulaires de chaussée. La présentation faisait la synthèse du projet incluant la méthode utilisée pour le développement des modèles et pour évaluer leur fiabilité.

La seconde présentation décrivait les principes utilisés ainsi que les modèles développés pour la conception des chaussées urbaines en prenant en considération les effets de la vitesse des véhicules sur les différentes couches de la chaussée. Rappelons que ce projet faisait l'objet du travail de maîtrise d'Alejandro Quijano.

La troisième présentation portait sur une analyse des résultats recueillis lors des essais réalisés à l'été 2009 sur l'action des pneus simples à bandes larges et des pneus jumelés conventionnels sur la chaussée. Les données ont été recueillies et analysées par Damien Grellet dans le cadre de son projet de doctorat.

Les trois présentations ont été faites par le titulaire de la Chaire i3C. Elles ont suscité beaucoup d'intérêt de la part de l'auditoire et ont certainement contribué à donner une notoriété internationale à la Chaire i3C. Soulignons que Guy Doré fait partie du Comité exécutif de la « International Society for Asphalt Pavements » qui parraine cette série de conférences. Les articles et les présentations peuvent être consultés sur le site de la Chaire.

### UNE VISITE DE CHANTIER FORT CAPTIVANTE

Le 21 septembre dernier, les étudiant(e)s et professionnels de la Chaire i3C ont pu apprécier les travaux de l'un des plus importants chantiers routiers du Québec soit le projet de l'axe routier 73/175 de la Réserve faunique des Laurentides.

Avec la collaboration du chargé de projet du ministère de Transports du Québec, M. Francis Gauvin, la visite a permis de constater l'ampleur de différents travaux notamment la construction des infrastructures de la route, du pont en arc près de Stoneham ainsi que les nouveaux échangeurs routiers à l'entrée du Parc national de la Vallée de la Jacques-Cartier.



Le chargé de projet du MTQ, Francis Gauvin, avec quelques uns de l'équipe de la Chaire i3C



Construction d'échangeurs routiers à l'entrée du Parc national de la Vallée de la Jacques-Cartier



Pont d'étagement en arc (arcs en béton armé) intégré au projet de la route 175 dans Stoneham et Tewkesbury

RESPONSABLE  
Guy Doré, ing. PhD

ÉDITION  
Pierre Perron, ing.

COLLABORATEURS INGÉNIEURS :  
Jean-Pascal Bilodeau, Jérôme Fachon,  
Jonas Depatie, Damien Grellet,  
Joannie Poupart, Louis Gagnon

POUR NOUS JOINDRE :

Département de génie civil  
Université Laval, Québec  
(Québec) G1K 7P4

Téléphone : 418 656-2203  
Télécopieur : 418 656-2928

<http://i3C.gci.ulaval.ca>





Chaire de recherche industrielle  
du CRSNG sur l'interaction  
Charges lourdes - Climat - Chaussées

AIRE DE  
CONTACT



BULLETIN **AIRE DE CONTACT**

En route vers des solutions durables !

NUMÉRO 4 • AUTOMNE 2010

## DANS CE NUMÉRO

### ÉVOLUTION DES PROJETS DE RECHERCHE

#### PROJET 1A-3

Développement de matériaux  
recyclés performants

P2

#### PROJET 2A-2

Caractéristiques des pneus  
et endommagement des chaussées

P3

#### PROJET 3.1

Développement et validation d'un  
modèle dynamique et quantification  
de l'influence du profil de la route  
sur un véhicule

P4

#### PROJET 1A-1

Comportement mécanique des  
matériaux routiers sous sollicitation  
mécanique et effets climatiques  
saisonniers

P5

### ACTUALITÉS

Une visite de chantier  
fort captivante

Chaire i3C fait bonne figure  
à la Conférence internationale  
sur les chaussées souples  
à Nagoya (Japon)

P6



## MISSION AU CENTRE DE RECHERCHE CAPTIF DE LA NOUVELLE-ZÉLANDE

Guy Doré, Titulaire de la Chaire i3C

Dans le cadre des activités prévues pendant mon année d'étude et de recherche, j'ai passé quelques mois à Christchurch en Nouvelle-Zélande pour établir des liens de collaboration avec l'Université de Canterbury et surtout avec le Centre de recherche CAPTIF (Canterbury Accelerated Pavement Testing Facility). Cette mission était particulièrement importante dans le contexte où l'Université Laval se dotera, dans les prochains mois, d'un système accéléré de chargement des chaussées. La visite avait donc pour but de documenter la gestion d'un équipement majeur d'essais sur les chaussées. Elle a également permis d'assister à des essais très intéressants sur la durabilité des traitements de surface exposés en conditions de surface mouillée. Le sujet de cette étude était donc d'un intérêt certain pour une chaire portant sur l'interaction Charges lourdes - Climat - Chaussées.

Le CAPTIF est un système de chargement accéléré de type « manège » construit dans une enceinte permettant un certain contrôle des conditions climatiques. Le système permet de simuler des charges circulant jusqu'à 50 km/h sur cinq sections d'essai d'environ 10 mètres construites dans une cuve circulaire de béton. Par rapport au manège du LCPC de Nantes, le manège CAPTIF est plus économique à opérer mais il pose certains problèmes en raison du rayon de courbure relativement petit du système de chargement. Cette particularité du manège CAPTIF tend à induire des forces tangentielles à l'interface pneu-chaussée ce qui expose les revêtements à des conditions sévères de sollicitation qui représentent d'ailleurs les courbes serrées (aux intersections par exemple) que les portions linéaires de chaussées.

Les essais réalisés lors de mon séjour ont été particulièrement intéressants pour illustrer l'effet des variations d'eau sur le comportement des fondations granulaires. Certaines sections étaient conçues pour permettre l'infiltration d'eau dans les fondations alors que d'autres avaient des surfaces imperméables. Par ailleurs, certaines sections



Le manège CAPTIF dans son enceinte.



Ruine d'une section par orniérage et début de désintégration du traitement de surface



avaient des fondations qualifiées de drainantes alors que d'autres avaient des fondations granulaires riches en particules fines et donc sensibles à l'eau. Il était intéressant d'observer que dès que l'eau pénétrait dans la fondation des chaussées, la défaillance de la section survenait en moins d'une heure de circulation du manège et en à peine quelques minutes pour les sections construites avec des matériaux granulaires marginaux. Le revêtement était alors enlevé immédiatement après l'arrêt du manège et la coïncidence entre les secteurs endommagés (généralement par orniérage et/ou par désintégration) et les secteurs de fondation à haute teneur en eau était remarquable.

Une autre expérience intéressante non-planifiée qui a marqué mon séjour à Christchurch a été de vivre un tremblement de terre de magnitude 7,1. Le tremblement de terre, qui n'a heureusement fait aucune victime, a tout de même causé pour \$4 milliards de dommage à la ville de Christchurch incluant la destruction de plusieurs édifices et ponts.



Mesure de la profondeur des ornières après un nombre déterminé de passages

## ÉVOLUTION DES PROJETS DE RECHERCHE

### PROJET 1A-3

#### Développement de matériaux recyclés performants

CHARGÉ DE PROJET : Jonas Depatie, étudiant à la maîtrise

Comme une forte proportion du réseau routier québécois a été construite dans les années 60-70, un important travail de réhabilitation est aujourd'hui requis pour remettre à niveau cette infrastructure vieillissante. Toutefois, la réfection d'une route selon les méthodes traditionnelles engendre une quantité énorme de déchets ainsi qu'une grande consommation de ressources minérales. Afin de réduire l'utilisation de ressources non-renouvelables et les coûts associés à la gestion des déchets, plusieurs méthodes de recyclages ont été mises au point pour le domaine des chaussées. À ce jour, le recyclage permet au Québec de récupérer près de 3 millions de tonnes de résidus d'asphalte, béton et autres pierres dont une très forte proportion est constituée de béton bitumineux.

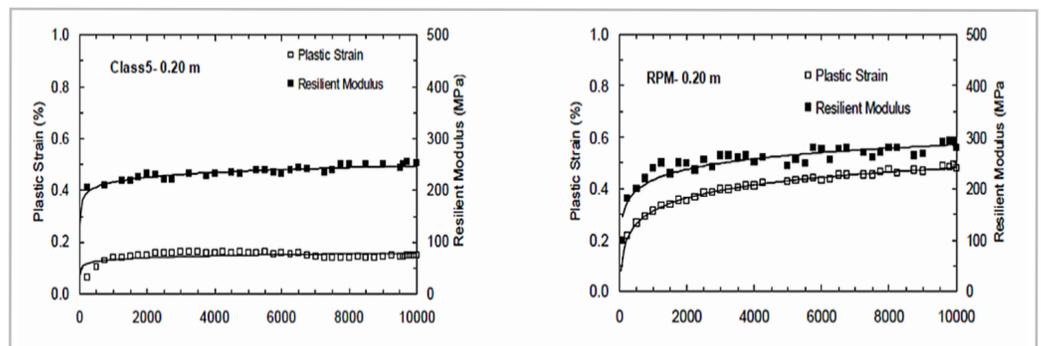
Malgré une réutilisation importante de granulats de béton bitumineux concassés dans les fondations, il existe toujours une certaine réticence vis-à-vis l'utilisation de ce type de matériau en raison de leur comportement assez mal connu et compris, plus particulièrement face aux déformations permanentes. En effet le comportement plastique des matériaux recyclés contenant des granulats bitumineux, qui est le résultat de la répétition de la charge induite par les véhicules lourds, est différent pour un mélange contenant des résidus de béton bitumineux comparativement à un matériau traditionnel. La *figure 1* illustre cette différence et montre que les matériaux recyclés accumulent plus facilement les déformations permanentes que les matériaux conventionnels.

Face à cette situation, le projet 1A-3 tentera, avant tout, de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine des matériaux recyclés dans les chaussées. Ainsi, l'effet du pourcentage de granulats bitumineux concassés au sein d'un matériau recyclé (0, 25, 50, 75 et 100%) sera mesuré, pour une courbe granulométrique constante, pour trois principaux aspects : (1) la susceptibilité à la déformation permanente, (2) l'effet du degré de compaction lors de la mise en œuvre et son impact sur la déformation permanente, (3) la capacité de drainage et de rétention d'eau. Les travaux prévus auront lieu au laboratoire et sur le terrain. De façon générale, ceux-ci permettront d'obtenir de précieuses informations sur le comportement face aux sollicitations mécaniques et environnementales de ce type de matériau.

Dans le but d'obtenir les résultats escomptés, une série d'essais en laboratoire et une étude sur chantier seront réalisés sur ce type de matériau. Ces études permettront de caractériser les matériaux et valider les résultats obtenus au cours des différentes études antérieures, tout en fournissant une comparaison des performances dans la pratique. Ultimement, les résultats de ce projet contribueront à améliorer les pratiques favorisant une bonne gestion de ces matériaux sur le chantier afin d'obtenir une performance optimale.

Figure 1)

Graphiques présentant la relation entre le taux de déformation en fonction du nombre de cycles de chargement pour les matériaux vierges (1) et les matériaux recyclés (2) (kootstra et coll. 2010)



## PROJET 2A-2

## Caractéristiques des pneus et endommagement des chaussées

CHARGÉ DE PROJET : Damien Grellet, étudiant au doctorat

## ÉTAT D'AVANCEMENT

L'étude de l'endommagement par fatigue d'une chaussée requière la connaissance de la répartition des déformations dans sa structure sous une sollicitation donnée. Cette répartition varie dépendamment du type de véhicule, de son chargement, de sa vitesse de roulement ainsi que du type de pneu et des pressions de gonflage l'équipant. Au cours de ce projet, deux types d'instrumentation, basés sur des capteurs à fibres optiques, ont été développés.

Afin d'évaluer l'impact des différents paramètres énoncés précédemment, plusieurs campagnes de mesure ont été effectuées sur un réseau routier et sous plusieurs conditions climatiques. Les deux premières, en 2008, ont été conduites sous des conditions printanière et estivale pour des structures de chaussées épaisses de 50mm et 100 mm et équipées de carottes instrumentées permettant l'acquisition des déformations longitudinalement et transversalement au sens de roulement. La suivante, à l'été 2009, a vu l'installation sur la section de 100 mm d'une plaque en polyphénylène, munie de vingt quatre jauges à fibres optiques permettant l'acquisition transversale et verticale des déformations, toujours au bas de la couche et proche de la surface de roulement. Finalement, au cours de l'été 2010, une seconde plaque du même type, a été mise en place sur la section de 200 mm. Ces derniers essais ont été réalisés à la fois pour des pneus à bandes larges et des pneus jumelés sous deux pressions différentes (100 Psi et 80 Psi). Une pression de 100 Psi pour le pneu extérieur du jumelé et de 80 Psi pour le pneu intérieur a aussi été testé. Comme pour les résultats des précédents essais, la valeur maximale de la déformation est relevée pour chaque essieu et des bassins de déformation ont été réalisés. La figure 2 présente un exemple de résultat pour les pneus jumelés.

Les travaux à venir s'orientent vers la détermination de critères d'endommagement basés sur une approche énergétique afin de tenir compte de l'ensemble des sollicitations rencontrées dans la couche d'enrobée bitumineux. Au cours des derniers essais, l'acquisition des données a été réalisée simultanément entre les capteurs équipant la plaque et ceux des carottes. L'analyse détaillée des signaux permettra donc la comparaison entre les types d'instrumentation. Ces résultats seront complétés par les travaux qui seront réalisés lors du partenariat avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France.

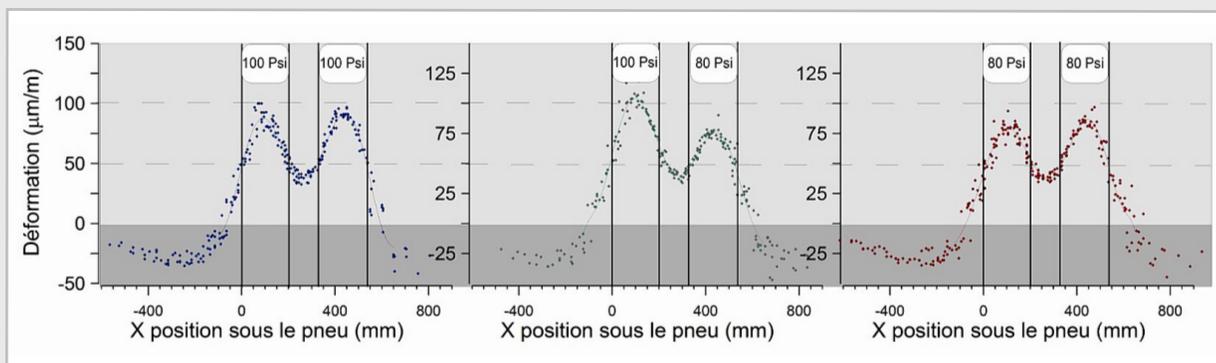
## COLLABORATION AVEC LE LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES EN FRANCE

L'instrumentation développée au cours de ce projet a permis une avancée des connaissances concernant les déformations s'exerçant dans la chaussée au passage d'une charge. Les déformations au bas de la couche et proche de la surface peuvent être évaluées selon trois directions (longitudinalement au roulement, transversalement, et verticalement) ce qui offre une nouvelle approche aux différents problèmes de fissurations et d'ornièrage observés sur un réseau routier. La caractérisation du type de pneu (jumelé ou à bandes larges) et de la pression de gonflage sur la résistance en fatigue de la chaussée requière la connaissance des déformations sous l'ensemble du pneu. Plusieurs phénomènes très dommageables pour la route, tel le cisaillement, ont été identifiés aux abords des arêtes du pneu. Phénomènes plus ou moins amplifiés, dépendamment de la pression de gonflage, de la structure de chaussée et des conditions climatiques. C'est pourquoi l'impact du type de pneu sur la chaussée doit être évalué au cours des différentes saisons, pour plusieurs chargements et ce, sur l'ensemble d'un réseau routier. Plusieurs essais ont été réalisés au SERUL sur des sections de 100 mm et de 200 mm d'épaisseur d'enrobé bitumineux, en conditions printanière et estivale, pour un chargement normalisé.

Le projet testera prochainement deux nouvelles sections en collaboration avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Cette entente va permettre d'analyser une section épaisse de 120 mm et de 80 mm sur le manège de fatigue à Nantes. Cette infrastructure offre la possibilité de tester une chaussée, de sa construction jusqu'à sa rupture en seulement quelques mois. Le LCPC aimerait, au cours de cette collaboration, pouvoir caractériser le surplus d'endommagement engendré par un chargement de 46.75 KN/roue par rapport à un chargement de 42.5 KN/roue (pour un tridem) et en particulier l'endommagement s'exerçant proche de la surface de la chaussée. Ce projet va donc permettre d'effectuer des essais sous différentes vitesses de roulement (compris entre 2 et 50 Km/h) pour des températures de revêtement variables, tout en contrôlant parfaitement la distance de passage des roues par rapport aux capteurs à fibres optiques. Capteurs, qui de plus, seront comparés à des jauges classiques d'extensiométrie puisque les deux types d'instrumentation seront installés.

Cette collaboration va débuter dès le mois de janvier 2011, avec la construction des sections d'essais, se poursuivre par les essais à proprement parlés, pour se terminer par l'interprétation des résultats à l'aide d'outils de calcul (Viscoroute, alizé, et module de calcul Cesar par éléments finis). Un comité de suivi composé entre autres de J.P. Kerzrého, A.Chabot, J.-M. Piau, et P.Hornych permettra de faire régulièrement le point sur l'avancement des travaux à Nantes. Avancements qui seront communiqués aux membres de la Chaire i3C.

Figure 2)  
Bassin de déformation-  
jauge transversales  
basses-section 200 mm



## PROJET 3.1

## Développement et validation d'un modèle dynamique et quantification de l'influence du profil de la route sur un véhicule

CHARGÉ DE PROJET : Louis Gagnon, étudiant au doctorat

Le projet 3.1 consiste à évaluer l'influence d'un profil de route sur différents aspects de l'opération d'un véhicule à l'aide d'un modèle dynamique développé et validé dans le cadre d'une thèse de doctorat. Les aspects à évaluer sont la consommation d'essence et l'usure des composantes d'un véhicule ainsi que la santé et la sécurité de ses usagers. Le modèle permettra de proposer des seuils d'intervention sur les routes d'un réseau routier sur la base de l'Indice de Rugosité International (IRI) et des caractéristiques du profil de la surface. Le comité de suivi industriel est composé de représentants du Ministère du Transport du Québec (MTQ), de l'Association du camionnage du Québec, de FPInnovations, et du groupe Qualitas. Le directeur de recherche est le professeur Marc J. Richard et le codirecteur est le professeur Guy Doré.

La première réunion avec le comité de suivi a permis de connaître les besoins des entreprises impliquées et les défis qui sont à venir. Le plus grand de ces défis sera de bien calculer l'influence de l'IRI sur la consommation d'essence d'un véhicule lourd.

Le modèle développé sera un modèle dynamique comportant le plus de degrés de liberté possible et modélisant avec autant de précision que possible toutes les composantes d'un camion semi-remorque standard. Des combinaisons de ressorts et d'amortisseurs serviront à modéliser les suspensions et peut-être les pneus du véhicule. Les différents amortisseurs présents dans un camion seront inclus dans le modèle et les masses seront réparties de façon à reproduire autant que possible un camion standard. Les pneus seront modélisés avec un modèle décrit par Pacejka [4] pour sa simplicité et sa validité pour une large gamme de conditions d'opération. Le logiciel de modélisation dynamique *MBDyn* à code source ouvert sera utilisé pour la solution du modèle de camion. Le logiciel *OpenFOAM* à code source ouvert sera utilisé pour quantifier l'influence sur les effets aérodynamiques du véhicule qui oscille sous l'influence du profil.

À partir de ce modèle il sera possible d'obtenir les accélérations et frottements de différentes composantes afin de mesurer l'usure, les pertes d'énergie, les réductions des forces de contact au sol, et les impacts sur la santé. Les vibrations au siège du chauffeur seront comparées à la norme de santé ISO-2631. L'usure par fatigue des différentes composantes sera calculée par l'algorithme de comptage *rainbow* de Rychlik [6] et les formules de Basquin et Palmgren-Miner. Afin d'évaluer la sécurité du véhicule, les temps de freinage requis par le véhicule seront analysés sur différents profils de route et comparés aux temps de freinage d'un véhicule de référence. Il sera ainsi possible d'évaluer la réduction d'adhérence à la route d'un camion semi-remorque.

Finalement, une simulation aérodynamique utilisant les équations RANS et modélisant la turbulence avec le modèle  $k_{\omega}$ -SST servira à évaluer la contribution des changements d'élévation et d'angles de tangage de la cabine et de la remorque aux forces aérodynamiques en action sur le camion. Cela sera probablement effectué de manière indépendante à la résolution du modèle dynamique multicorps.

Afin de tester différents types de profils, un script a été développé. Il utilise le programme de calcul de l'IRI mis à la disposition du public par le UMTRI [3]. C'est vraisemblablement la méthode de calcul de l'IRI la plus fiable. Le script utilise ce programme afin de générer différents types de profils qui peuvent ensuite être ajustés selon l'IRI requis. Ce script sera utilisé afin de générer des profils de route à soumettre au modèle dynamique qui sera développé et au logiciel *TruckSim*. Le logiciel *TruckSim* sera utilisé pour valider la dynamique du modèle développé.

Ensuite, un processus de validation du modèle dynamique sera conduit à l'aide du simulateur de route du MTQ. Il sera nécessaire de faire les essais sur un modèle de camion de plus petite taille et un deuxième modèle dynamique comprenant seulement le tracteur sera donc développé à cette fin. Des essais sont aussi envisagés sur la piste d'essais à Blainville et cela permettra de valider l'influence du profil sur la consommation d'essence d'un camion semi-remorque standard.

Suite à la validation du modèle, celui-ci sera utilisé pour conduire une étude paramétrique de profils synthétiques de routes afin d'identifier les caractéristiques d'un profil qui influent les différents paramètres qui nous concernent, soit la consommation d'essence, le coût d'opération, la santé, et la sécurité. Il sera ainsi possible de prédéterminer quels profils sont plus suspects.

Des essais du modèle sur des pseudo-profil de routes réelles seront ensuite effectués. Ces essais permettront de cerner les caractéristiques du spectre de fréquences d'un profil qui sont susceptibles de poser problème. Des critères d'identification des profils suspects seront ensuite établis et les profils de route pourront alors être analysés avec une approche plus sensible aux détails d'un profil que l'IRI à lui seul.

La première étape de modélisation a été de valider les logiciels à l'aide de cas étalons. Le logiciel *CarSim*, qui est le jumeau de *TruckSim*, a été utilisé en combinaison avec le script de génération de profils synthétiques pour évaluer l'influence sur la consommation d'essence de différents profils de route [2]. Les résultats obtenus sont acceptables mais l'influence du profil de route n'est pas aussi importante que dans la littérature. Le logiciel *MBDyn* a reproduit parfaitement la réponse du quart de véhicule de référence et cela est montré à la **figure 6** (voir page 5) où sont comparées les réponses de la littérature [7] et de *MBDyn* pour différentes fréquences d'excitation sinusoïdales. Le logiciel d'aérodynamique *OpenFOAM* a été validé pour le corps Ahmed [1]. Un modèle numérique tel que celui décrit plus haut a été utilisé et les propriétés générales de l'écoulement ont été reproduites avec succès. Cela est montré à la **figure 7** (voir page 5) où les résultats expérimentaux sont ceux rapportés par Franck et al. [5]. Le coefficient de traînée du véhicule a aussi été reproduit adéquatement.

Suite à cette validation encourageante, c'est maintenant le temps de commencer le développement du modèle dynamique. La prochaine étape est d'imbriquer un module de calcul d'énergie au quart de véhicule afin de pouvoir ensuite plus facilement l'appliquer au modèle de camion semi-remorque.

- [1] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Falin. Some salient features of the time averaged ground vehicle wake. Technical Report TP-840300, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1984.
- [2] V. Drouot. Étude de l'effet des chaussées dégradées sur la consommation de carburant des véhicules et la sécurité des usagers de la route. Technical report, INSA Strasbourg, 2010.
- [3] IRI and RN source code. <http://www.umtri.umich.edu/content/IRIMain.f>.
- [4] H. B. Pacejka. Tire and vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers, 2006.
- [5] G. Franck, N. Nigro, M. Storti, et J. D'Elia. Numerical simulation of the Ahmed vehicle model near wake. Technical report, Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, Argentina, 2007.
- [6] I. Rychlik. A new definition of the rainflow cycle counting method. *Int. J. Fatigue*, 9(2):119-121, 1987.
- [7] M. Sayers. Development, implementation, and application of the reference quarter-car simulation. In *Measuring road roughness and its effects on user cost and comfort*, pages 25-47, 1985.

## PROJET 1A-1

### Comportement mécanique des matériaux routiers sous sollicitation mécanique et effets climatiques saisonniers

CHARGÉE DE PROJET : Joannie Poupart, étudiante à la maîtrise

Le Québec est soumis à un contexte climatique rigoureux rendant complexe la conception des chaussées. Les nombreux cycles de gel et dégel saisonniers affectent grandement les matériaux granulaires (MG) de chaussées, susceptibles de changer de volume et de se saturer lorsque soumis à l'action du gel. Lors des périodes de dégel, les effets néfastes du gel combinés à la fonte des neiges entraînent la saturation des matériaux granulaires et diminuent la capacité portante. Ces phénomènes amplifient l'accumulation des déformations plastiques (permanentes) dans les couches granulaires, ce qui diminue la performance des chaussées. Afin de maximiser la performance, il est important de bien comprendre les phénomènes et mécanismes associés à la plasticité des assemblages granulaires et d'identifier les caractéristiques physiques et mécaniques liées à un bon comportement. Quatre granulats typiques du Québec, un gneiss granitique, un calcaire, un basalte et un grauwacke seront étudiés dans le cadre du projet, qui poursuit les travaux réalisés par Schwarz (2009). La recherche veut quantifier l'effet des cycles environnementaux, et plus particulièrement des cycles de gel et dégel, sur la plasticité des divers assemblages granulaires. Lors d'un cycle de chargement-déchargement, la déformation totale se produisant à l'intérieur des couches de matériaux granulaires comprend deux composantes : la déformation résiliente (élastique), qui est davantage associée à la conception, et la déformation plastique, qui est davantage associée à la performance du matériau. C'est sur cette deuxième composante que porte le projet.

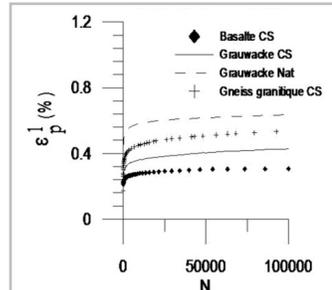


Figure 3)  
Modélisation par le modèle  
de Dresden  
Teneur en eau optimale

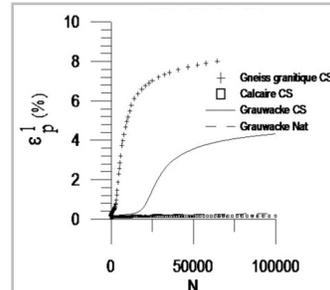


Figure 4)  
Modélisation par le modèle  
de Dresden  
Condition saturée

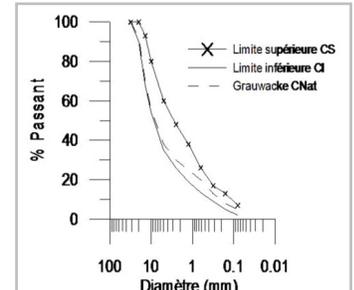


Figure 5)  
Courbes granulométriques

Afin de comprendre le comportement plastique d'un MG, plusieurs essais de déformation permanente sont réalisés en laboratoire à l'aide d'une presse hydraulique à chargements répétés. Les essais consistent à appliquer aux échantillons 100 000 répétitions de chargement avec une contrainte déviatorique de 100 kPa. Les essais sont réalisés pour simuler différentes conditions environnementales (teneur en eau optimale, saturée, condition saturée en milieu drainé et soumis au cycle de gel et de dégel et condition saturée en milieu non drainé soumis au cycle de gel et dégel). La modélisation des données expérimentales se fait à l'aide du modèle de Dresden :

$$\epsilon^1_p = A(N/1000)^B + C(e^{D(N/1000)} - 1) \quad (1)$$

où A, B, C et D sont des paramètres spécifiques au matériau et N, le nombre d'applications de charge. Les figures 1 et 2 illustrent les premiers résultats obtenus jusqu'à présent dans ce projet. Il est connu que l'augmentation de la teneur en eau d'un matériau granulaire influence grandement sa stabilité interne. Il est possible d'observer que pour une même condition, soit la saturation d'un MG par exemple (figure 4), les déformations permanentes obtenues, suite à l'application des cycles de charge, peuvent se comporter différemment pour divers matériaux granulaires. Les caractéristiques mécaniques que possèdent les différentes sources granulaires sont en grande partie responsables de ces variations. Les matériaux granulaires suivant la courbe supérieure (CS) du fuseau granulométrique exigée par les normes de transports Québec possèdent un plus grand pourcentage de particules fines comparativement à la granulométrie du grauwacke suivant sa courbe naturelle (figure 5). Selon Bilodeau (2009) la fraction fine de la granulométrie influence grandement les paramètres reliés à la performance d'un matériau granulaire de fondation, ce qui pourrait expliquer le phénomène de rupture pour le grauwacke CS et le gneiss granitique CS. Contrairement à ces derniers, le calcaire CS adopte une réponse en déformation permanente qui tend à se stabiliser sans rencontrer la phase de rupture. Bilodeau (2009) a démontré que le module réversible du calcaire pouvait être significativement plus élevé que celui du gneiss granitique, ce qui pourrait expliquer le faible taux de déformation du calcaire en condition saturée. De plus, le fait que le gneiss granitique ne soit concassé qu'à 72% contrairement aux autres MG testés qui eux, sont fracturés à 100%, pourrait également expliquer le fort taux de déformation permanente et la rupture rapide de ce matériau. Dans le cas des matériaux à teneur en eau optimale (figure 3), il est possible d'observer que le taux de déformation diminue de façon continue au cours des essais. Ceci prouve que les MG performant bien lorsqu'ils sont soumis aux chargements répétés, en conditions optimales (teneur en eau, masse volumique sèche).

La période automnale sera, en grande partie, réservée à compléter la réalisation des autres essais en laboratoire en faisant intervenir le conditionnement des échantillons par cycles de gel/dégel.

#### FIGURES PROJET 3.1

Figure 6)

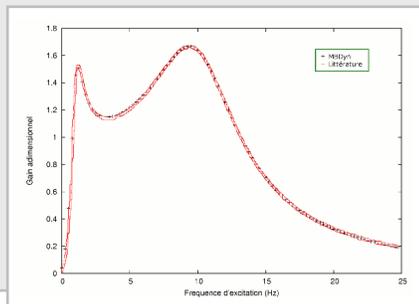


Figure 7)

