



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



## DANS CE NUMÉRO

### ÉVOLUTION DES PROJETS DE RECHERCHE

#### PROJET 1A-1

Comportement mécanique des matériaux routiers sous sollicitation mécanique et effets climatiques saisonniers : Étude du comportement en déformation permanente des matériaux granulaires de fondation

P3

#### PROJET 1B-1

Étude de l'effet du drainage sur la récupération mécanique des chaussées

P4

#### PROJET 1A-3

Développement de matériaux recyclés performants pour les matériaux de fondations de chaussées

P5

#### PROJET 3.1

Le contact avec la route se fait d'abord aux pneus

P6

#### PROJET 1A-2

Mise au point d'essais simples pour évaluer les propriétés mécaniques et la sensibilité à l'eau des sols en matériaux de chaussée

P7

#### PROJET 2A-3

Développement de lois de comportement des chaussées sous l'action combinée des charges lourdes et du climat

P7

### ACTUALITÉS

Remise de prix lors du congrès annuel de Bitume Québec

Force-Laval : un réseau fort entre l'Université Laval et ses partenaires de chaires de recherche et de création

Congrès annuel de l'AQTR 2011

P8



## DE BEAUX EXEMPLES DE RECHERCHE EN PARTENARIAT DANS LE CADRE DE PROJETS D'ENVERGURE INTERNATIONALE

Guy Doré, Titulaire de la Chaire i3C

À mi-chemin de son mandat de 5 ans, la Chaire de recherche industrielle du CRSNG sur l'interaction charges lourdes - climat - chaussées (i3C) a atteint sa pleine vitesse de croisière. Des 11 projets prévus au programme de la Chaire, deux projets ont été complétés, huit sont présentement en cours de réalisation et un reste à démarrer. 9 étudiants travaillent présentement à la réalisation de projets de la Chaire dans le cadre de leur projet de fin d'études (1), de leur projet de maîtrise (5) ou de leur projet de doctorat (3). De ces projets, trois ont évolué pour devenir des projets d'envergure internationale grâce notamment à l'implication de partenaires industriels de la Chaire i3C et de partenaires de recherche internationaux.

Le projet 1B-1 portant sur le « Drainage et réduction de la sensibilité aux effets mécaniques et climatiques » s'est donné des envergures de projet majeur lors de la construction de 5 planches d'essai dans une des cuves du site expérimental routier de l'Université Laval au cours du mois de mai 2011. Le site permettra de quantifier, en conditions réelles d'exploitation mais dans un environnement contrôlé, l'efficacité des systèmes de drainage géocomposites dans la chaussée. Ce montage de recherche sans précédent a été rendu possible par la participation directe de plusieurs partenaires industriels de la Chaire i3C soit : BPR (plans et devis), Colas Canada (construction des planches expérimentales), Texel Géosol (fourniture des géocomposites drainants et assistance technique), Groupe CTT (assistance technique) et Transports Québec (forages pour instrumentation). Les travaux de réalisation du site expérimental ont été planifiés et coordonnés par Jérôme Fachon, professionnel de recherche et Catherine Savoie étudiante à la maîtrise à la Chaire i3C. Deux séquences d'essais sont prévues pour quantifier le gain de portance des sections après saturation de la cuve. La première aura lieu au mois de septembre 2011 et la seconde au printemps 2012.



Travaux de préparation de la fosse d'essai pour la construction de 5 planches expérimentales visant à évaluer l'efficacité de systèmes de drainage de la chaussée.



Le projet 2A-2, portant sur l'étude des caractéristiques des pneus et leurs effets sur l'endommagement des chaussées, a pour sa part évolué considérablement depuis le début du programme de la Chaire i3C. Prévu pour être réalisé dans le cadre d'un projet de maîtrise, le projet fait maintenant l'objet du doctorat de Damien Grellet et est réalisé en collaboration avec le prestigieux Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (maintenant l'IFSTTAR, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux). La troisième session d'essais de ce projet est en voie de réalisation au manège de fatigue de Nantes en France. En plus des chercheurs du LCPC de Nantes, le projet a grandement bénéficié de la collaboration de Transports Québec (construction des sections d'essai à la Forêt Montmorency), de Michelin Canada (fourniture de pneus et le soutien technique), de l'École de conduite de Charlesbourg et de l'Association du camionnage du Québec (fourniture d'un véhicule et d'un opérateur pour les essais) ainsi que de la compagnie Opsens (mise au point des instruments avant-gardistes de mesure des déformations dans la chaussée par la technologie des fibres optiques). Les travaux réalisés jusqu'à maintenant feront l'objet de deux publications dans des conférences scientifiques internationales au cours de l'année 2012.

Le projet 3-1 portant sur l'étude de l'incidence de l'état des chaussées sur le comportement des véhicules et efficacité du transport routier est un projet qui mise sur le développement d'un outil de modélisation de haut niveau pour quantifier l'effet des chaussées dégradées sur l'efficacité et la sécurité du transport commercial. La modélisation du pneu constituait l'élément clé d'un modèle performant. Une collaboration a donc été établie avec les chercheurs de la *Politecnico di Milano*, en Italie où Louis Gagnon, étudiant au doctorat responsable du projet, a passé près de six mois pour établir les bases du modèle. Enfin, un modèle multicorps de camion a été développé et le modèle de pneus a pu y être incorporé afin de vérifier le bon fonctionnement de la simulation. Le développement de ce modèle fera l'objet d'une conférence à la conférence internationale « *Multibody Dynamics 2011* » qui aura lieu en Belgique en Juillet 2011.

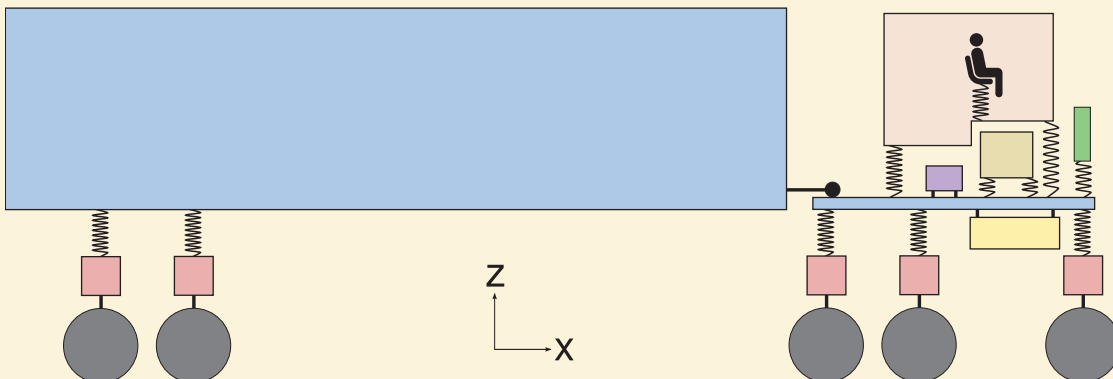


*Jauges de mesures de déformation à fibres optiques de l'université Laval installées dans le sentier de roue du manège de fatigue à Nantes (France) pour l'évaluation de l'effet des pneus sur la chaussée.*

Ce projet a de plus été l'occasion de renforcer une collaboration déjà établie avec Marc J. Richard, professeur au département de génie mécanique de l'Université Laval. Encore ici, la collaboration de plusieurs partenaires est un des facteurs clés du succès du projet jusqu'à maintenant. Pour les besoins de la modélisation, Michelin Canada (données sur les pneus) et Freightliner (données sur les camions semi-remorque) ont gracieusement accepté de fournir des données essentielles au projet. La validation du modèle sera faite à partir d'essais sur le simulateur routier du MTQ et sur la piste d'essai de Blainville. Transports Québec, Transports Canada et FPIInnovations joueront un rôle important dans la concrétisation de ces projets.

Ces trois projets constituent de très beaux exemples de recherche en partenariat impliquant les partenaires industriels de la Chaire i3C et des partenaires chercheurs internationaux. Ces succès démontrent clairement la pertinence et la productivité de la recherche en collaboration. Fort de ces expériences positives, l'équipe de la Chaire i3C entrevoit avec enthousiasme la deuxième moitié du mandat.

*Figure 1) Représentation schématique du modèle-camion qui servira à la réalisation de l'étude paramétrique sur l'effet de la condition des chaussées.*



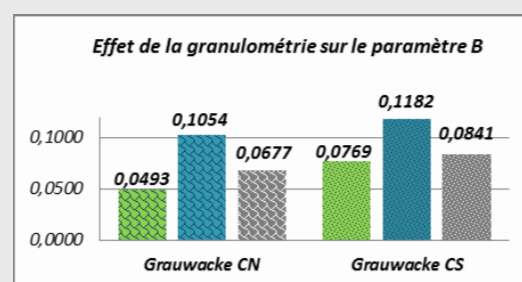
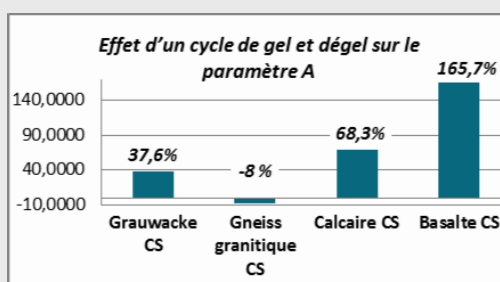
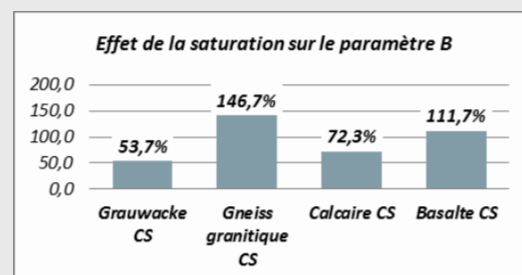
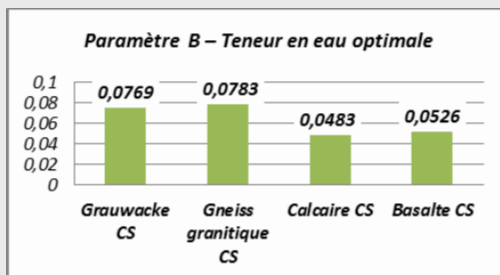
## PROJET 1A-1

**Comportement mécanique des matériaux routiers sous sollicitation mécanique et effets climatiques saisonniers : Étude du comportement en déformation permanente des matériaux granulaires de fondation.**

CHARGÉE DE PROJET : Joannie Poupart

La déformation permanente accumulée dans les couches granulaires de la fondation et de la sous-fondation, suite aux passages répétés des véhicules lourds, contribue à l'endommagement par orniérage structural des chaussées flexibles. En plus de nuire à la qualité de roulement, l'orniérage peut poser un risque important pour la sécurité des usagers de la route. Les conditions climatiques difficiles qui caractérisent le Québec jouent également un rôle important dans le développement de l'orniérage structural. Pour diminuer les risques d'accumulation de déformation permanente à l'intérieur des couches granulaires de fondation, une meilleure compréhension du comportement plastique des matériaux granulaires en fonction des conditions de chargement et des conditions climatiques est nécessaire. Pour atteindre cet objectif, quatre sources de matériaux granulaires (grauwacke, calcaire, gneiss granitique, basalte) ont été étudiées dans le cadre du projet 1A-1. Le projet impliquait des essais en laboratoire, à l'aide d'une presse hydraulique à chargement vertical cyclique, afin d'observer leur comportement plastique. Ces essais ont été réalisés pour quatre conditions environnementales différentes (teneur en eau optimale, saturée, gel dégel drainé et gel dégel non drainé).

Les essais de caractérisation ainsi que les essais de déformation permanente ont été complétés durant la période hivernale. Les résultats ont été modélisés à l'aide du modèle mathématique de Dresden, dont les variables A et B sont le plus d'intérêt. Ces paramètres correspondent respectivement à la déformation accumulée durant la phase de post compaction et au taux de déformation permanente à long terme. L'analyse et l'interprétation des données restent pour l'instant préliminaires. Toutefois, l'analyse préliminaire des données permet de faire plusieurs constats intéressants. Le matériau ayant le plus faible taux de déformation à long terme, en condition de teneur en eau optimale, est le calcaire avec un paramètre B de 0,0483. Il est reconnu qu'une augmentation de la teneur en eau à l'intérieur d'un matériau granulaire réduit la capacité mécanique du matériau. En effet, les résultats démontrent que la déformation permanente d'un matériau saturé soumis à 100 000 cycles sous une contrainte déviatorique de 100 kPa et à une pression de confinement de 20 kPa peut augmenter de 146,7 % par rapport à un matériau à teneur en eau optimale. Les cycles de gel et de dégel constituent un autre facteur important de modification du comportement en déformation permanente. Les résultats obtenus démontrent que l'effet d'un cycle de gel et de dégel peut causer une augmentation de 165,7 % du paramètre A comparativement à un matériau n'ayant pas subi de gel. Les prochaines étapes du projet comportent la validation des résultats à l'aide d'un simulateur de charge de laboratoire puis l'établissement de relations mathématiques afin de déterminer des corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux granulaires et les paramètres A et B du modèle de Dresden. Ceci permettra de développer des critères pour identifier les matériaux sensibles aux déformations permanentes. Le projet devrait être complété à la fin de l'été 2011.



Afin d'évaluer le comportement en déformation permanente à l'aide de sollicitations s'approchant davantage de la réalité, une évaluation par palier à l'aide d'un simulateur à charge roulante est prévue pour le mois de juin prochain (Photo 1). Un seul matériau, le grauwacke, sera testé pour les mêmes conditions environnementales imposées à l'essai triaxial cyclique. Ceci permettra de valider les paramètres empiriques obtenus à l'aide de la presse avec ceux obtenus par le simulateur à charge roulante.

Les travaux effectués dans le cadre de ce projet de recherche contribueront à la création d'un modèle d'endommagement saisonnier de la chaussée pouvant être éventuellement appliqué en conception.

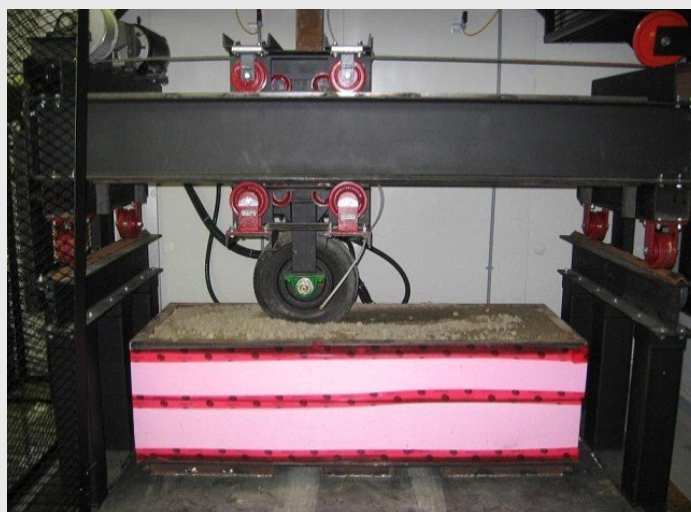


Photo 1) Simulateur à charge roulante

## PROJET 1B-1

### Étude de l'effet du drainage sur la récupération mécanique des chaussées

CHARGÉE DE PROJET : Catherine Savoie

Le projet 1B-1 présente deux phases expérimentales. La première, présentée dans le numéro 3 du bulletin Aire de Contact, avait pour but d'étudier l'effet de l'ajout de géocomposites drainants dans une section de route reproduite en laboratoire. La deuxième se déroule sur le terrain et permet de reproduire en grandeur nature les configurations étudiées en laboratoire

#### TRAVAUX DE LABORATOIRE

La caractérisation des matériaux et la réalisation de 4 cuves expérimentales sont complétées. Chacune des cuves réalisées présentait une structure de chaussée identique, mais un système de drainage différent (voir **figure 2**). Chacune de ces configurations a été reproduite dans la route expérimentale construite au SERUL au cours du printemps 2011.

Chacune des structures construites a nécessité l'inondation complète du système jusqu'à la couche d'enrobé bitumineux suivi du drainage de ce dernier en incluant la prise de mesure au déflectomètre à masse tombante portable (LWD). L'analyse porte sur la récupération relative du module de surface afin de permettre la comparaison des données enregistrées pour chacune des cuves. La valeur initiale ( $E_0$ ) est la valeur du module réversible du système enregistré à l'état saturé. Grâce à la relation suivante, il est possible d'obtenir des données de récupérations relatives des modules à différents temps  $t$  :

$$R_t = \frac{E_t}{E_0} \quad \text{Où} \quad E_0 \text{ est la valeur du module à l'état saturé}$$

$$E_t \text{ est la valeur du module à un temps } t$$

L'analyse des régressions (**figure 3**) calculées à partir des données de récupération relative des modules réversibles permet de rendre compte d'une nette amélioration dans le temps de récupération du module réversible du système lorsque des systèmes de drainage sont utilisés. Le LWD rend des valeurs moyennes de déflexion de l'ensemble de la structure et ne permet pas, dans ce cas, de connaître la déformation élastique aux interfaces critiques. Malgré qu'elle ne soit pas mesurée, cette déflexion aux interfaces critiques peut être reliée à la déflexion totale mesurée. Bien que les résultats obtenus ne permettent pas d'obtenir les valeurs nécessaires afin de réaliser un calcul d'endommagement, ils sont toutefois intéressants dans notre analyse. Puisque la déflexion globale de la chaussée est directement liée à la performance de la chaussée, une diminution rapide de la teneur en eau entraînera une diminution plus rapide des déflexions et donc une augmentation du module réversible. Cette reprise plus rapide des propriétés mécaniques des couches de matériaux granulaires est susceptible d'engendrer une diminution des taux de dégradation de l'ouvrage routier qui se reflèteront en gain de durée de vie.

#### TRAVAUX DE TERRAIN

Pour faire suite aux travaux de laboratoire, des essais in situ seront réalisés sur une chaussée réelle en vraie grandeur au Site expérimental routier de l'Université Laval (SERUL). La construction de la section expérimentale a été réalisée pendant la deuxième semaine de mai 2011. À l'intérieur de la fosse de béton de 30 m qui a été utilisée pour cette étude de terrain, cinq sections de 6 m de longueur chacune ont été construites. Chacune

des sections a été séparée par une membrane étanche fixée aux murs afin de minimiser l'interaction hydrique et le transfert d'eau d'une section à l'autre. Des sorties d'eau ont aussi été percées dans la paroi de béton afin de mesurer et comparer les débits d'eau évacués par les différents systèmes de drainage. Des capteurs de teneur en eau ainsi que des thermistances ont été placés à même la structure. Des déflectomètres multಿನiveaux ainsi que d'autres capteurs de teneur en eau (de type profileprobe) seront ajoutés à la structure de chaussée avant la réalisation des essais. Les photos ci-dessous montrent l'ampleur des travaux de préparation des 5 sections pour les essais in situ.

La réalisation des essais au SERUL est prévue au début du mois d'août prochain. Tout comme en laboratoire, suite à une inondation de la fosse de béton, des mesures ponctuelles au déflectomètre à masse tombante (FWD) ainsi que des relevés des déflectomètres multiniveaux (DMN) seront réalisées lors d'une phase de drainage afin de faire le suivi de la réponse mécanique de la chaussée.

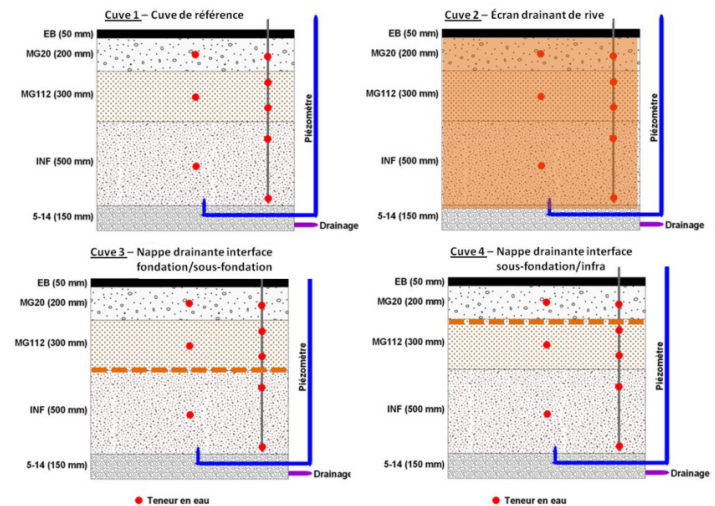


Figure 2) Structures de chaussées des sections de route reproduites en laboratoire



Vue d'ensemble des différentes sections en construction et des membranes étanches utilisées pour séparer et isoler les sections



Installation de la nappe drainante placée dans 3 des 5 sections

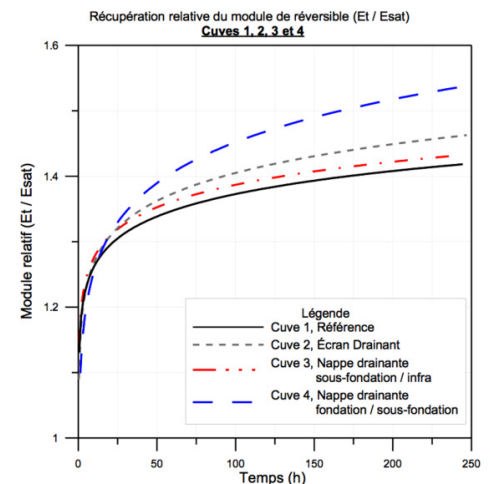


Figure 3) Régression de la récupération relative des cuves 1, 2, 3 et 4

## PROJET 1A-3

### Développement de matériaux recyclés performants pour les matériaux de fondations de chaussées

CHARGÉ DE PROJET : Jonas Depatie

L'utilisation de granulats bitumineux recyclés (GBR) en tant que matériaux de fondation est une pratique qui devient de plus en plus courante, tant au ministère des Transports du Québec que dans les municipalités. Cette pratique permet notamment d'atteindre les objectifs de développement durable de ces administrations en réduisant l'utilisation de ressources non renouvelables et les coûts associés à la gestion des déchets ainsi qu'au transport. Toutefois, l'utilisation de GBR dans les fondations de chaussées au Québec suscite encore des doutes en raison du manque de connaissance associée à la capacité portante de ces matériaux et à leur comportement face à la déformation permanente. Il existe donc un besoin d'évaluer l'effet de la teneur en granulat bitumineux sur ces propriétés mécaniques, car elles demeurent essentielles lors du dimensionnement des chaussées, notamment par une approche mécaniste-empirique.

Dans le but de répondre à ce besoin, des essais en laboratoire ont été réalisés dans le cadre du projet 1A-3 de la Chaire de recherche i3C. L'évaluation du module réversible ( $E_r$ ) a été réalisée dans les laboratoires du ministère des Transports à l'aide de la méthode d'essai LC 22-400 et l'évaluation de la résistance à la déformation permanente s'est déroulée à l'Université Laval en suivant une méthode par palier inspirée de la norme européenne. De plus, l'effet de la vitesse (fréquence) sur le module réversible de ces matériaux a été mesuré, mais sera présenté dans un bulletin ultérieur. Ces essais ont été réalisés sur cinq matériaux ayant des teneurs en GBR différentes (0, 30, 50, 60 et 70%).

La **figure 4** illustre la relation entre le module réversible obtenu pour un niveau de contrainte faible (100 kPa), moyen (400 kPa) et élevé (700 kPa) et la teneur en GBR en condition saturée. Il est possible d'observer qu'à faible niveau de contrainte, l'augmentation de GBR dans un matériau n'influence pas le module, tandis que pour un niveau de contrainte plus élevé, le module tend à diminuer avec l'augmentation de la teneur en GBR. Pour un niveau de contrainte moyen et élevé, un mélange de 50% GBR voit son module réduit d'environ 20% relativement à un matériau vierge. Toutefois, pour les chaussées typiques du Québec, les niveaux de contrainte moyens et élevés dans la fondation sont rencontrés en grande partie dans les chaussées non revêtues ou très endommagées. Dans le cas des chaussées adéquatement dimensionnées, la fondation est plutôt soumise à un état de contrainte relativement faible. Ces résultats indiquent donc que l'ajout de GBR dans les matériaux de fondation ne devrait pas affecter significativement le module réversible des matériaux de cette couche si

le dimensionnement de la couche de revêtement enrobé est adéquat. Une analyse plus approfondie des résultats se fera au cours des prochains mois.

La **figure 5** illustre la déformation permanente enregistrée pour les cinq teneurs en GBR et ce, pour différents états de contrainte. Il est possible de voir que pour un état de contrainte de 50 kPa, la déformation induite après 100 000 cycles de chargement est très similaire d'un matériau à l'autre soit environ 0,25%. Pour les niveaux de contraintes plus élevés, il semble y avoir deux tendances qui distinguent les matériaux avec moins de 50% de GBR de ceux avec plus de 50%. Les matériaux avec moins de 50% de GBR semblent montrer la même déformation au bout des cycles 200 000 et 300 000 soit des déformations respectives d'environ 1,75 et 2,15 fois la déformation subie par le matériau vierge (0-100). Ces résultats montrent que le comportement face à la déformation permanente pour les matériaux composés de moins de 50% de GBR ne semble pas être affecté par la teneur en GBR. Dans le cas des matériaux composés de plus de 50% de GBR, leur réponse à la déformation permanente est beaucoup plus importante. Le mélange à 60% de GBR (60-40), montre une déformation finale 2,80 et 6,20 fois plus importante que le matériau vierge pour des contraintes respectives de 100 kPa et 150 kPa tandis que le mélange à 70% de GBR montre, pour les mêmes états de contrainte, des déformations finales 3,80 et 10,60 fois plus élevée que le matériau vierge. Cette tendance laisse donc croire que l'utilisation de matériaux à plus de 50% de GBR dans les chaussées pourrait accentuer les problèmes d'ornièrages si aucun changement aux méthodes de conception traditionnelles n'est effectué afin de diminuer la contrainte au sein de la couche de fondation. À l'opposé, les matériaux composés de moins de 50% de GBR présentent sensiblement le même comportement que les matériaux vierges, mais où l'écart augmente avec l'augmentation de la contrainte. L'effet de la teneur en GBR devient donc particulièrement important à contrainte élevée. Encore là, une analyse plus poussée sera nécessaire afin d'en être convaincu.

Finalement, la période estivale sera en grande partie réservée à la réalisation des travaux sur des chantiers de retraitement en place et au traitement/analyse des données recueillies jusqu'à maintenant sur les propriétés mécaniques et hydriques de ces matériaux afin de permettre la validation des résultats obtenus en laboratoire avec ceux de terrain et simulateur.

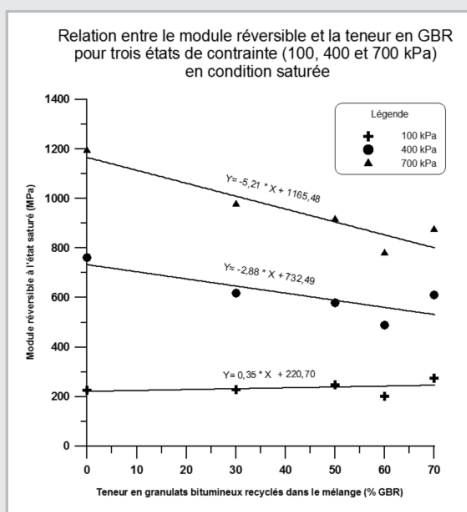


Figure 4)

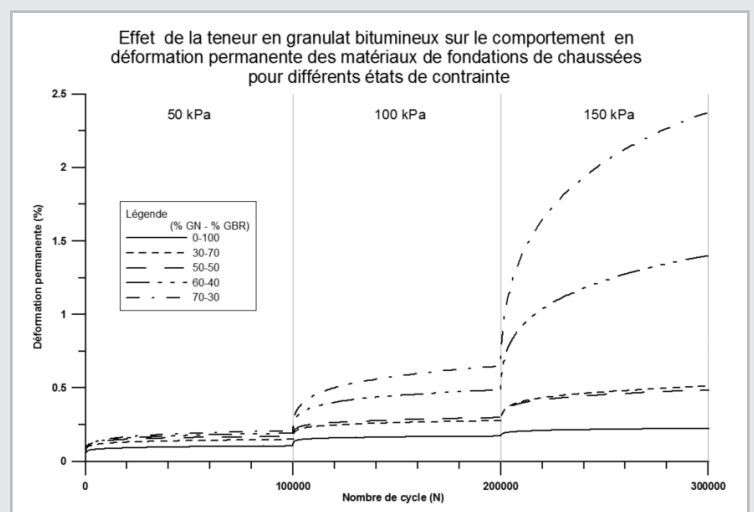


Figure 5)

## PROJET 3.1

## Le contact avec la route se fait d'abord aux pneus

CHARGÉ DE PROJET : Louis Gagnon

Lorsqu'on souhaite évaluer l'influence du profil de la route sur un camion et qu'on accorde une importance à la consommation d'essence il faut examiner l'énergie qui est dissipée par les pneus, car ils absorbent une grande partie des déformations de la route ayant de petites longueurs d'ondes. Depuis l'automne dernier, un modèle de pneu adapté à cette fin a été développé en collaboration avec les chercheurs de la Politecnico di Milano, en Italie. De plus, notre partenaire Michelin a accepté de fournir des données qui permettent de calibrer et de valider ce nouveau modèle. Enfin, un modèle multicorps de camion a été monté et les pneus ont pu y être incorporés afin de vérifier le bon fonctionnement de la simulation.

## PNEUS

Le modèle de pneu développé s'apparente grandement aux modèles à anneau rigide décrits et utilisés par Pacejka [4], Schmeitz [5], Zeeglaar [6], Maurice [3], et Besselink [1]. Il est une combinaison entre un calcul empirique des forces de frottement au sol entre le pneu et la chaussée et un calcul plutôt analytique qui représente le pneu par trois nœuds liés entre eux par des ressorts et des amortisseurs. Ces trois nœuds sont la roue, l'anneau rigide et la plaque de contact. Physiquement, le nœud de la roue représente le moyeu, la jante et une partie de la masse du pneu, l'anneau rigide représente la ceinture du pneu, et la plaque de contact représente la partie de la bande de roulement qui est en contact avec la chaussée. L'utilisation d'un anneau rigide permet de représenter de manière adéquate le comportement dynamique de la ceinture du pneu lorsqu'elle est soumise à des excitations ayant des fréquences qui peuvent atteindre 100 Hz. La plaque de contact, quant à elle, sert à modéliser la dynamique de la masse en contact avec le sol et les délais de réponse de la bande de roulement du pneu. Entre les nœuds de la roue et de l'anneau on retrouve six ressorts et six amortisseurs, un pour chaque degré de liberté. Ceux-ci permettent de reproduire le comportement viscoélastique de la paroi latérale du pneu. Ensuite, l'anneau et la plaque de contact sont unis par trois ressorts et trois amortisseurs et ils agissent dans chacun des degrés de liberté linéaires. La **figure 6** montre un schéma simplifié de ce modèle de pneu. Une description détaillée du modèle de pneu est donnée par Gagnon [2].

## SEMI-REMORQUE

Suite au développement du modèle de pneu, un camion semi-remorque a été assemblé avec le logiciel MBDyn et le comportement du modèle a été observé. Le modèle de camion est montré à la **figure 1 (Voir page 2)** où les éléments en zigzag représentent la combinaison d'un ressort et d'un amortisseur. Les données techniques nécessaires ont été gracieusement fournies par Freightliner. Une distribution des masses aussi détaillée que possible y est utilisée car l'usure

des pièces sera étudiée par l'analyse des forces qu'elles subissent. Pour l'instant, ce modèle de camion est fonctionnel, mais encore en cour de développement. Enfin, le comportement de celui-ci est testé par une procédure abrupte de changement de voie. Les résultats des accélérations de l'angle de lacet du tracteur, de la remorque et de l'essieu central du tracteur ainsi que de la force latérale de frottement entre un pneu avant du tracteur et la chaussée sont montrés à la **figure 7**. Le comportement attendu et les oscillations engendrées par le caractère dynamique d'un modèle à anneau rigide sont obtenus. Il est donc raisonnable d'espérer que l'influence des déformations de la route sur la dynamique et l'énergie seront bien prises en compte par le modèle de pneu.

## ÉVOLUTION FUTURE

Il est tout d'abord prévu de finaliser les modèles de pneu et de semi-remorque au début de l'été. Ensuite la validation avec le logiciel TruckSim et les analyses aérodynamiques qui avaient été mentionnées dans le bulletin précédent seront entreprises. Il n'est pas clair s'il sera possible d'utiliser le simulateur de route à vérins hydrauliques du MTQ d'une manière bénéfique au projet, car la taille du véhicule qui peut y être testé est limitée. Toutefois, les essais routiers sur la piste d'essais à Blainville seront effectués à l'automne et des accéléromètres seront installés sur les camions afin de valider non-seulement la consommation d'essence, mais aussi la dynamique reproduite par le modèle. Ensuite, l'analyse de différents profils réels et virtuels et la création de nouveaux barèmes d'évaluation des routes seront entamées.

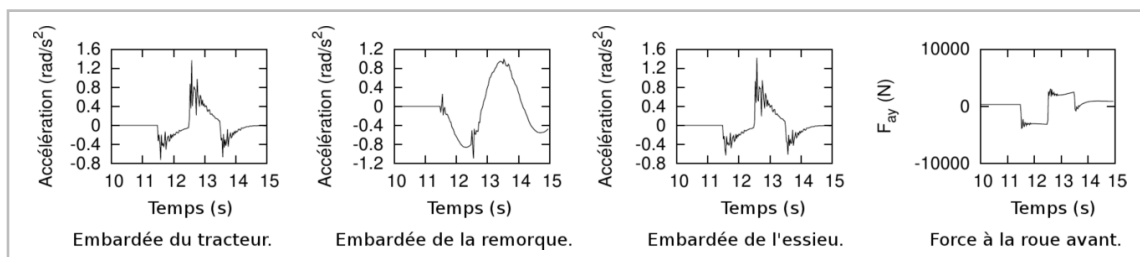


Figure 7)

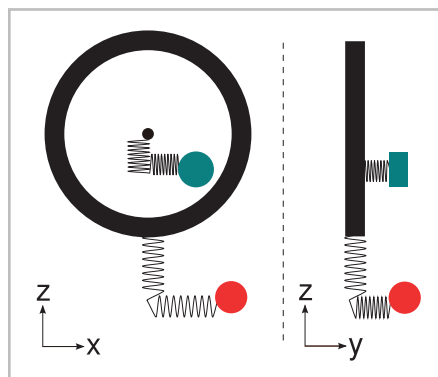


Figure 6)  
Représentation des nœuds du modèle de pneu. Le moyeu est vert, l'anneau est noir et la plaque de contact est rouge. À gauche) vue de côté, À droite) vue de l'avant.

- [1] I. J. M. Besselink. Shimmy of Aircraft Main Landing Gears. PhD thesis, Delft University of Technology, 2000.
- [2] L. Gagnon, M. J. Richard, P. Masarati, M. Morandini, and G. Doré. Multibody Simulation of Tires Operating on an Uneven Road. In Multibody Dynamics 2011, Brussels, Belgium, 4-7 July 2011.
- [3] J. P. Maurice. Short Wavelength and Dynamic Tyre Behaviour under Lateral and Combined Slip Conditions. PhD thesis, Delft University of Technology, 2000.

- [4] H. B. Pacejka. Tire and vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers, 2006.
- [5] A. J. C. Schmeitz. A Semi-Empirical Three-Dimensional Model of the Pneumatic Tyre Rolling over Arbitrarily Uneven Road Surfaces. PhD thesis, Delft University of Technology, 2004.
- [6] P. W. A. Zeegelaar. The Dynamic Response of Tyres to Brake Torque Variations and Road Unevennesses. PhD thesis, Delft University of Technology, 1998.

## PROJET 1A-2

### Mise au point d'essais simples pour évaluer les propriétés mécaniques et la sensibilité à l'eau des sols en matériaux de chaussée

CHARGÉ DE PROJET : Darío Soto Tafur

Le projet vise le développement d'essais simples pour la détermination du module réversible et du potentiel de ségrégation des sols pour supporter l'utilisation de modèles mécanistes de conception et d'analyse de chaussées. Il fait suite au volet 1 du projet 1A-2 (Mellizo 2010) qui a exploité les bases de données de deux projets de doctorat pour développer des modèles d'estimation du module réversible des matériaux granulaires à partir de propriétés physiques des matériaux. Dans un premier temps, le projet comportera d'abord un état des connaissances détaillé dans le domaine de la caractérisation des sols et des matériaux de chaussées. Par la suite, les travaux seront axés sur le développement d'outils pour la détermination, en laboratoire et in situ, des propriétés mécaniques ainsi que de la sensibilité à l'eau et au gel des sols d'infrastructure. En plus de miser sur les derniers développements documentés dans la littérature, le projet continuera le développement entrepris dans le cadre de deux projets de maîtrise. Ces projets portent sur l'utilisation du pénétromètre dynamique, de l'essai CBR et du déflectomètre portable pour la mesure et la prédiction des propriétés mécaniques (Boutet, 2008) et sur la

mesure en laboratoire de la constante diélectrique et de la remontée capillaire pour évaluer la sensibilité des matériaux aux effets environnementaux (Abdelrazik Idriss, 2005). Un aspect important qui sera abordé est la mesure de la constante diélectrique pour déterminer la sensibilité à l'eau conjointement avec la détermination des propriétés mécaniques du sol d'infrastructure (en laboratoire et in situ) avec des équipements portatifs tels que le déflectomètre (LWD) et le pénétromètre dynamique (DCP). Le développement des nouveaux outils ou accessoires combinant de telles mesures permettra la caractérisation rapide et simple des sols d'infrastructure dans le but d'obtenir l'information nécessaire à un dimensionnement de chaussées mécaniste-empirique. Cette information pourra alors, suite à une validation par des essais triaxiaux et de potentiel de ségrégation, servir à l'élaboration de modèles permettant la prédiction du comportement. Ainsi, les équipements portatifs et les modèles mathématiques obtenus constitueront des outils de premier plan pour une caractérisation fiable et économique des sols d'infrastructure.

## PROJET 2A-3

### Développement de lois de comportement des chaussées sous l'action combinée des charges lourdes et du climat

CHARGÉ DE PROJET : Youdjari Djonkamla

Modéliser le comportement (endommagement) de la chaussée en fonction du temps suivant une approche qui prend en compte les variables mécanistes en jeux de façon satisfaisante est une tâche très complexe. Cette complexité est illustrée à la figure 8 (Haas, 2003), où l'ensemble des facteurs en cause et les interactions potentielles sont indiqués. Même si les variables mécanistes (climat et trafic) et les propriétés des matériaux constituant les couches de la chaussée peuvent être prises en compte de façon raisonnable, les méthodes de construction, le comportement des sols d'assise et l'entretien des structures rendent les prédictions parfois imprécises. C'est possiblement pour cette raison que la conception et l'évaluation des chaussées ont longtemps été réalisées en utilisant des méthodes empiriques. Depuis 2002, suite aux travaux de chercheurs américains (NCHRP), l'approche dite Mécaniste-Empirique (ME) est de plus en plus utilisée en Amérique du Nord. Les méthodes ME reposent sur l'utilisation de modèles de calcul de la réponse mécanique et de lois d'évolution (ou modèles d'endommagement) bien adaptés au contexte d'exploitation. Dans le contexte Canadien, la prise en compte des facteurs climatiques est essentielle pour l'optimisation des structures de chaussées. Selon le rapport de la commission royale sur le transport des personnes (1992), les facteurs environnementaux sont responsables de la plus grande partie (50% à 80%) des dommages subis par les chaussées.

Le projet vise le développement et la validation de lois d'endommagement (déformation permanente, fissuration de fatigue, fissuration thermique et dégradation de l'uni) permettant de quantifier l'effet des charges lourdes et du climat sur la performance des chaussées afin de supporter la mise en place de méthodes de conception mécaniste-empiriques en contexte climatique rigoureux. Le projet permettra d'adapter les modèles existants ou de développer de nouvelles lois d'endommagement pour bien représenter le comportement des chaussées dans les contextes Canadien et Québécois. L'adaptation des modèles existants se fera par le biais des paramètres de calage indiqués au tableau 1, en utilisant des données d'essais en laboratoire ou les données de comportement de chaussées disponibles (programmes SHRP, C-SHRP, du programme de suivi du Ministère des Transports du Québec et du programme de suivi de performance des chaussées municipales de la Chaire i3C). Dans le cas où les modèles ne prennent pas bien en considération les phénomènes tels que le gel, une nouvelle forme de modèle intégrant les variables importantes sera développée pour caler aux conditions locales en utilisant les bases de données disponibles.

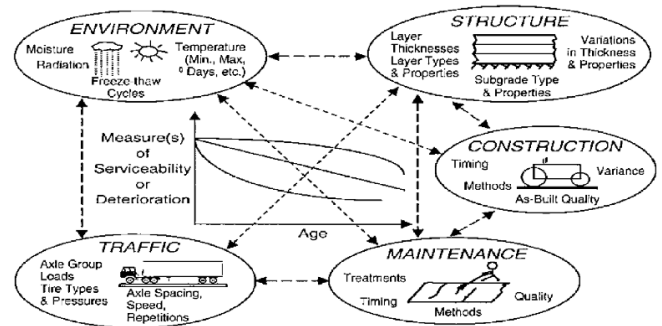


Figure 8) Facteurs affectant les endommagements (Haas 2003)

Type de Modèle	Equation mathématique	Calibration de laboratoire	Calibration de terrain
Déformation permanente au revêtement	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \beta_{r1} a_1 T^{\beta_{r2} a_2} N^{\beta_{r3} a_3}$	$a_1, a_2, a_3$	$\beta_{r1}, \beta_{r2}, \beta_{r3}$
Déformation permanente dans les fondations	$\delta_s(N) = \beta_{CB} \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left( \frac{N}{N_0} \right)^\beta} \cdot \epsilon_v \cdot h$	$\epsilon_0, \beta, \rho$	$\beta_{CB}$
Déformation permanente dans le l'infrastructure	$\delta_s(N) = \beta_{SO} \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left( \frac{N}{N_0} \right)^\beta} \cdot \epsilon_v \cdot h$	$\epsilon_0, \beta, \rho$	$\beta_{SO}$
Fissuration de fatigue	$N_f = \beta_{f1} k_1 (\epsilon_f)^{-\beta_{f2} k_2} (E)^{-\beta_{f3} k_3}$	$k_1, k_2, k_3$	$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$
Fissuration thermique	$C_f = \beta_1 * N \left( \frac{\log(C/\sigma_{fasc})}{\sigma} \right)$ et $\Delta C = A \Delta K^n$	$A, n$	$\beta_1$
Dégradation de l'Uni Matériaux non liés	$IRI = IRI_0 + 0,0463 \left[ SF \left( e^{\frac{30}{20}} - 1 \right) \right] + 0,00119(TC_L)_T + 0,1834(COV_{RD}) + 0,00384(FC)_T + 0,00736(BC)_T + 0,00115(LC_{SNWP})_{MH}$	Chiffres	Chiffres

Tableau 1) Lois d'endommagement proposées dans le « Mechanistic-Empirical pavement design guide »



## PARTENAIRES

## ACTUALITÉS

### FORCE-LAVAL : UN RÉSEAU FORT ENTRE L'UNIVERSITÉ LAVAL ET SES PARTENAIRES DE CHAIRES DE RECHERCHE ET DE CRÉATION

Le réseautage était à l'honneur lors du deuxième forum Force-Laval le 28 avril dernier. Une centaine de partenaires, titulaires de chaires de recherche et de création, étudiants et représentants de la direction de l'Université Laval se sont rencontrés, toutes disciplines confondues, pour partager leurs réalités et envisager de nouvelles pistes de collaboration.

La rencontre visait à mieux cerner la place de la recherche universitaire dans l'agenda de l'innovation des partenaires et mieux comprendre leurs besoins et leurs défis. Un panel de spécialistes reconnus alimentait la discussion : Mme Natalie Quirion, directrice générale du Parc technologique du Québec métropolitain, M. Pierre Pedneau, président-directeur de SOVAR, M. Carl Beaulieu, directeur principal de Samson Bélair Deloitte & Touche et M. Vincent Tanguay, vice-président - Québec, Innovation et transfert, du CEFRIQ. L'exercice a permis d'échanger, identifier des conditions favorables à la création de partenariats fructueux et dégager des pistes d'amélioration.

Une vingtaine de travaux et résultats de recherche et de création de chaires étaient aussi exposés par des titulaires et des étudiants. Ils reflétaient toute la pertinence, l'ampleur et le potentiel des recherches menées dans le cadre des chaires en partenariat. L'Université Laval compte actuellement 59 chaires de recherche et de création en partenariat, représentant des investissements de plus de 151 M\$ en recherche.

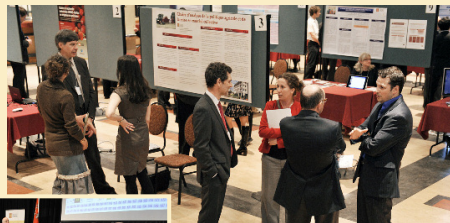


### REMISE DE PRIX LORS DU CONGRÈS ANNUEL DE BITUME QUÉBEC

Le 30 mars 2011, à l'hôtel des Seigneurs de Saint-Hyacinthe, dans le cadre du 7<sup>e</sup> congrès annuel de Bitume Québec, monsieur Jonas Depatie, a reçu la bourse d'études Shell 2011 remise par madame Catherine Lavoie, directrice générale de Bitume Québec.



François Sauvé, directeur du Bureau des chaires, Pierre Pedneau, président-directeur de SOVAR, Carl Beaulieu, directeur principal de Samson Bélair Deloitte & Touche, Natalie Quirion, directrice générale du Parc technologique du Québec métropolitain, Vincent Tanguay, vice-président - Québec Innovation et transfert du CEFRIQ, Sylvie Marcoux, vice-rectrice adjointe à la recherche et à la création et Denis Brière, recteur de l'Université Laval, lors du deuxième forum Force-Laval.



Exposition de travaux de chaires de recherche et de création, toutes disciplines confondues, lors du deuxième forum Force-Laval.

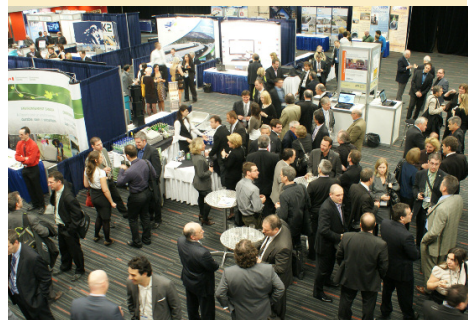


Partenaires, titulaires de chaires de recherche et de création, étudiants et représentants de la direction de l'Université Laval lors du deuxième forum Force-Laval.

### CONGRÈS ANNUEL DE L'AQTR 2011

Les 11, 12 et 13 avril dernier s'est tenu à Montréal le 46<sup>e</sup> Congrès annuel de l'AQTR, rassemblant plus de 800 congressistes sous le thème « Conjuguer les transports du passé au futur ». Sous la présidence de M. Yves Devin, directeur général de la Société de transport de Montréal, l'événement a connu un franc succès. Avec près de 100 conférences techniques, le Salon du transport et des routes et des invités prestigieux, le congrès de l'AQTR est un événement incontournable et rassembleur en transport à ne pas manquer.

Dans le cadre de ce congrès, plusieurs des étudiants et professionnels de recherche de la Chaire i3C ont eu l'opportunité de présenter l'avancement de leur projet et de répondre aux questions des congressistes.



RESPONSABLE  
Guy Doré, ing. PhD

ÉDITION  
Pierre Perron, ing.

COLLABORATEURS INGÉNIEURS :  
Jonas Depatie, Youdjari Djonkamla,  
Louis Gagnon, Joannie Poupart,  
Catherine Savoie, Dario Soto Tafur

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>

