



Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
charges lourdes-climat-chaussées

PRODUITS DE LA CHAIRE i3c



UNIVERSITÉ
LAVAL

Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
charges lourdes-climat-chaussées



SOMMAIRE EXÉCUTIF

PRODUITS DE LA CHAIRE I3C

LA CHAIRE I3C

Première chaire industrielle canadienne spécialisée dans le domaine des chaussées. Vise l'amélioration des connaissances et le développement d'outils techniques pour maximiser la performance des chaussées sollicitées par les charges lourdes et le climat.

THÈMES DE RECHERCHE

Le comportement des matériaux et des structures de chaussées;

La maîtrise de la performance des chaussées;

Les caractéristiques de surface des chaussées affectant le comportement et la performance des véhicules sur les chaussées.

QUELQUES CHIFFRES

Partenaires : **17 privés et public**

Appui financier : **2,5M\$ sur 5 ans**

Contributions de services : **110 000 \$**

Projets de recherche : **14**

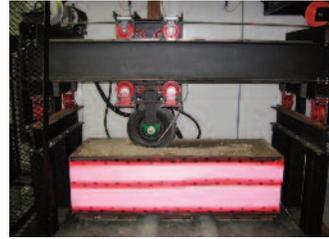
Comités de suivi : **10**

Rencontres annuelles et de suivi des partenaires : **30**

PRODUCTION DE LA CHAIRE I3C

Développement de différentes catégories de produits de recherche orientés vers des solutions pratiques aux problèmes rencontrés par l'industrie, notamment :

- 1 amélioration des connaissances et développement d'outils d'ingénierie à caractère pratique
- 2 formation de main d'œuvre hautement qualifiée
- 3 capacité d'expertise et de recherche
- 4 publications scientifiques
- 5 bases de données
- 6 collaborations nationales et internationales



1

AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES ET DÉVELOPPEMENT D'OUTILS D'INGÉNIERIE À CARACTÈRE PRATIQUE

Module réversible des matériaux granulaires

- Un utilitaire de calcul (format provisoire en EXCEL) pour l'estimation du module réversible des matériaux granulaires de chaussée en fonction du degré de saturation et des propriétés physiques des matériaux

Comportement en déformation permanente des matériaux granulaires

- Un modèle permettant de caractériser une source granulaire en fonction de son comportement en déformation permanente dans la chaussée
- Un modèle de calcul (intégré dans un utilitaire de calcul i3C) permettant de qualifier la sensibilité à la déformation permanente en fonction des caractéristiques et de l'état des matériaux granulaires

Matériaux recyclés

- Un utilitaire de calcul (format provisoire en EXCEL) pour la conception des renforcements de chaussées en fonction de la teneur en granulats bitumineux

Module réversible et gélivité des sols d'infrastructure

- Une procédure d'essai de laboratoire permettant l'estimation du module réversible et du potentiel de ségrégation des sols à partir de mesures de LWD et de constante diélectrique sur un sol placé dans un moule conçu spécifiquement pour l'essai.
- Un utilitaire de calcul (en développement) pour l'analyse des données de l'essai et l'estimation des propriétés des sols.

Utilisation du déflectomètre portable

- Un tableau de facteurs de correction à appliquer dans le logiciel d'analyse du LWD pour différentes conditions de sols et diamètres de plaques d'essai

Bénéfice technique et économique du drainage des chaussées

- Une méthode pour évaluer le bénéfice sur la durée de vie des chaussées flexibles associé à l'inclusion de couche drainante de type géosynthétique.

Conception des chaussées en milieu municipal

- Une méthode pour prendre en compte l'effet de la vitesse en conception des chaussées municipales
- Une méthode pour prendre en compte le soulèvement différentiel en conception des chaussées
- Un logiciel de calcul pour le dimensionnement des chaussées en milieu municipal (en développement; version Beta disponible à l'hiver 2013)

Effet des pneus et des charges dynamiques

- Une gamme d'instruments de pointe (déformation et déflexion dans le corps des chaussées) pour la mesure de la réponse mécanique de la chaussée sous les véhicules lourds (deux brevets déposés)
- Un logiciel d'analyse des signaux de déformation de la chaussée
- Une méthode rigoureuse d'analyse de l'effet des charges lourdes sur l'endommagement de la chaussée
- Un modèle permettant de relier l'IRI et la vitesse au niveau de charge dynamique induit par les véhicules lourds circulant sur des chaussées détériorées (le modèle sera intégré au logiciel de conception des chaussées)

Comportement et performance des véhicules lourds sur les chaussées

- Un modèle de comportement de véhicule lourd avec emphase sur l'analyse de l'interaction dynamique entre le profil de la chaussée et le pneu permettant d'étudier l'influence de l'état de la route sur l'efficacité des véhicules lourds;
- Des critères rigoureux de seuils d'intervention sur les chaussées basés une analyse de corrélation entre la dégradation de l'uni de la chaussée et les effets sur la santé et la sécurité ainsi que sur l'usure et la consommation d'essence.

2 FORMATION DE MAIN D'ŒUVRE HAUTEMENT QUALIFIÉE

Quarante-quatre (44) étudiants hautement qualifiés pour travailler dans le domaine de l'ingénierie des chaussées :

- **3 doctorats**
- **9 projets de maîtrise**
- **32 assistants de recherche et stagiaires**

3 CAPACITÉ D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE

- Repose sur le plus important laboratoire de recherche sur les chaussées au Canada.
- Obtention d'une subvention de plus de \$18 000 000 de la FCI/MEQ pour la construction d'un laboratoire sur les infrastructures à l'Université Laval.

4 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- Soixante-cinq (65) publications de toutes sortes incluant des publications dans des revues avec comité de lecture (10 publications publiés, acceptées ou soumises); dans des conférences avec arbitrage (12 publications); ou sous forme d'autres publications

5 BASES DE DONNÉES

- Établissement d'une importante base de données de comportement sur plus de 40 chaussées échantillonnées dans les villes de Québec et de Montréal.

6 COLLABORATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

- Établissement de réseaux de collaborateurs à l'intérieur de l'Université Laval, mais aussi avec des chercheurs d'autres institutions à l'échelle nationale et internationale.
- Collaboration importante avec des chercheurs de l'Institut français des sciences et technologies des transports.
- Réseautage avec les chercheurs de l'École de technologie supérieure, de l'Université de Waterloo et de l'Université de l'Illinois.



PRODUITS DE LA CHAIRE i3C

◀◀◀ INTRODUCTION

La Chaire de recherche industrielle CRSNG sur l'interaction charges lourdes - climat - chaussées (Chaire i3C) est la première chaire industrielle canadienne spécialisée dans le domaine des chaussées. La création de la Chaire s'inscrivait dans la volonté de l'Université Laval et du CRSNG d'accroître les partenariats en recherche dans un domaine d'intérêt stratégique pour le Canada.

La Chaire i3C vise l'amélioration des connaissances et le développement d'outils techniques pour maximiser la performance des chaussées sollicitées par les charges lourdes et le climat. Elle a aussi pour objectif de contribuer à former des spécialistes en matériaux et mécanique de chaussées soumises à l'effet des charges et du climat. Ces spécialistes seront sensibilisés aux enjeux relatifs au comportement de nos infrastructures routières et à l'économie du transport.

Les travaux de la Chaire, amorcés en mai 2008, ont donc été orientés vers la recherche de solutions technologiques pour améliorer le comportement des infrastructures routières en contexte climatique rigoureux. Les nombreux partenaires privés de la Chaire pourront bénéficier de connaissances et d'outils techniques qui leur donneront un avantage compétitif et faciliteront l'exportation de leur savoir-faire dans un contexte de concurrence mondiale.

La Chaire i3C a reçu l'appui financier des gouvernements, de municipalités, et de plusieurs entreprises privées.

◀◀◀ RAPPEL DES ENJEUX

Les infrastructures de transport jouent un rôle important dans le développement social et économique du pays. Le passage répété des charges lourdes et les facteurs climatiques sont souvent identifiés comme étant les deux causes majeures de la dégradation des chaussées. En effet, c'est bien connu que la température, l'action du gel et du dégel ainsi que l'eau peuvent endommager les chaussées et agir comme facteurs aggravants de l'action des charges lourdes. Par ailleurs, la chaussée peut elle-même être une cause de dégradation et de perte d'efficacité des équipements de transport. Les chaussées sont des structures composites conçues pour assurer le transport sécuritaire et confortable des personnes et des marchandises. Pour jouer leur rôle, elles doivent résister adéquatement aux sollicitations des charges lourdes et du climat. Elles doivent conserver leurs caractéristiques de surface favorisant une circulation efficace et sécuritaire des personnes et des marchandises.

««« CONTRIBUTION DES PARTENAIRES

La Chaire i3C a regroupé des partenaires dynamiques, tant du secteur privé que public, qui croyaient en la recherche et l'innovation. Les partenaires ont donc participé activement à l'élaboration du programme de recherche incluant un volet portant sur le développement des connaissances et un autre portant sur l'identification de solutions aux problèmes de l'industrie. Ils ont également contribué à l'orientation des activités scientifiques de la Chaire.

La majorité des partenaires ont participé aux sept (7) assemblées annuelles des partenaires qui visaient à revoir l'état d'avancement du programme, discuter des ajustements à apporter au programme et discuter de la mise-en-œuvre des résultats de recherche. Ils ont participé également, selon leur intérêt spécifique, aux activités des dix (10) comités de suivi de projet pour près d'une vingtaine (20) de rencontres; ces comités avaient pour objectifs d'orienter les projets et d'élaborer une stratégie pour la mise en œuvre des résultats de recherche.

Ils ont été de plus sollicités pour des avis techniques sur des sujets spécifiques à leur champ d'expertise, pour l'obtention de données et pour la fourniture de services spécialisés dont les contributions en nature se sont élevés à près de 110 000\$

««« PRODUCTION DE LA CHAIRE I3C

Les travaux de recherche de la Chaire industrielle du CRSNG sur l'interaction Charges lourdes – Climat – Chaussées ont permis de développer des produits de recherche pratiques et de haute qualité. Ces produits aideront à faire face aux défis complexes auxquels sera confrontée l'industrie canadienne de l'ingénierie des transports au cours des prochaines décennies. L'augmentation des charges et du trafic des véhicules lourds, les effets saisonniers dans un contexte de changements climatiques, les besoins importants de réhabilitation du réseau routier et l'intégration et l'application efficace de méthodes de conception mécaniste-empiriques ne sont que quelques exemples de défis auxquels devra faire face l'industrie au cours des prochaines années.

LE PROGRAMME EST SUBDIVISÉ EN TROIS THÈMES DE RECHERCHE :

- THÈME 1** • **Le comportement des matériaux et des structures de chaussées;**
- THÈME 2** • **La maîtrise de la performance des chaussées ;**
- THÈME 3** • **Les caractéristiques de surface des chaussées affectant le comportement et la performance des véhicules sur les chaussées.**

Les activités de la Chaire ont permis de développer différentes catégories de produits de recherche orientés vers des solutions pratiques aux problèmes rencontrés par l'industrie. Ces catégories sont :

- 1** amélioration des connaissances et développement d'outils d'ingénierie à caractère pratique
- 2** main d'œuvre hautement qualifiée
- 3** capacité d'expertise et de recherche
- 4** publications scientifiques
- 5** bases de données
- 6** collaborations nationales et internationales





AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES ET DÉVELOPPEMENT D'OUTILS D'INGÉNIERIE À CARACTÈRE PRATIQUE

Dans un contexte où l'utilisation de méthodes mécaniste-empiriques devient une pratique généralisée en ingénierie des chaussées, les propriétés mécaniques des matériaux de chaussées doivent être connues avec fiabilité pour dimensionner et estimer la durée de vie des chaussées dans un contexte de variations saisonnières. Les travaux réalisés dans le cadre de la chaire i3C ont cherché à améliorer les connaissances sur le comportement mécanique des sols et matériaux de chaussées en contexte de gel saisonnier. Les principales avancées sont les suivantes :

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX GRANULAIRES (THÈME 1)

La quantification des propriétés mécaniques des matériaux de chaussées est essentielle pour l'analyse et la conception des chaussées à l'aide de modèles mécaniste-empiriques. Le module réversible et le comportement en déformation permanente sont directement associés au comportement mécanique et à la détérioration des chaussées. Ces propriétés varient considérablement en fonction de facteurs environnementaux. Les recherches réalisées ont permis de quantifier l'effet du degré de saturation et des cycles de gel et dégel sur les propriétés mécaniques (notamment en déformation permanente) des matériaux granulaires en fonction de leur granulométrie et de leur minéralogie.

Cette recherche a permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- De la détermination des caractéristiques des matériaux granulaires souhaitables pour la réduction de la sensibilité à l'eau et au gel;
- De la relation entre le module réversible et le degré de saturation, l'état de contrainte, la porosité, la quantité de fines et les caractéristiques de fabrication.
- Des facteurs affectant le comportement en déformation permanente des matériaux granulaires
- Du comportement saisonnier basé sur la déformation permanente des matériaux granulaires en utilisant des caractéristiques des granulats (porosité, saturation, caractéristiques de fabrication);
- De l'effet des changements climatiques (précipitations et température) sur les matériaux de chaussées (projet complémentaire financé par Ouranos)

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Une méthode de caractérisation du comportement en déformation permanente des matériaux de chaussées
- Un modèle permettant de caractériser une source granulaire en fonction de son comportement en déformation permanente dans la chaussée
- Un utilitaire de calcul (format provisoire en EXEL) pour l'estimation du module réversible et de la sensibilité à la déformation permanente des matériaux granulaires de chaussée en fonction du degré de saturation et des propriétés physiques des matériaux

MATÉRIAUX RECYCLÉS (THÈME 1)

Les matériaux recyclés sont abondamment utilisés en réfection des chaussées, en utilisant notamment le procédé de retraitement en place. Bien que cette approche soit avantageuse à plusieurs points de vue, des inquiétudes persistent sur la qualité des travaux et le comportement à long terme des matériaux retraités. Le projet a permis de caractériser les propriétés mécaniques (module réversible et déformation permanente) des matériaux recyclés. Il a également permis de documenter la variabilité et les propriétés mécaniques de ces matériaux en chantier. Finalement, quelques solutions pour mitiger les problèmes associés à l'utilisation des matériaux recyclés ont été étudiées dans le cadre du projet.

Cette recherche a permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- Des facteurs affectant le comportement mécanique réversible et en déformation permanente des matériaux recyclés en fonction notamment de la teneur en granulats bitumineux concassés (GBC)
- De l'efficacité de certaines mesures de mitigation du mauvais comportement en déformation permanente des fondations riches en GBC
- De la variabilité des caractéristiques granulométriques et des propriétés mécaniques des matériaux recyclés en chantier

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Un utilitaire de calcul (format provisoire en EXEL) pour la conception des renforcements de chaussée en fonction de la teneur en GBC

MODULE RÉVERSIBLE ET GÉLIVITÉ DES SOLS D'INFRASTRUCTURE (THÈME 1)

Le module réversible et la gélivité des sols d'infrastructure sont les deux paramètres requis pour la conception des chaussées. Faute de méthode d'essai abordable et fiable, on attribue généralement à ces paramètres des valeurs typiques par type de sol. Ce projet porte sur l'estimation, par des méthodes simples et fiables, du module réversible et du potentiel de ségrégation des sols d'infrastructure en support aux méthodes mécaniste-empiriques.

Cette recherche a permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- De la relation entre les mesures de modules prises à l'aide du déflectomètre portable (LWD) et le module mesuré en cellule triaxiale à chargement répété
- De la relation entre la constante diélectrique des sols, leurs propriétés physiques et leur potentiel de ségrégation

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Une procédure d'essai de laboratoire permettant l'estimation du module réversible et du potentiel de ségrégation des sols à partir de mesures de LWD et de constante diélectrique sur un sol placé dans un moule conçu spécifiquement pour l'essai.
- Un utilitaire de calcul (en développement) pour l'analyse des données de l'essai et l'estimation des propriétés des sols.

UTILISATION DU DÉFLECTOMÈTRE PORTABLE (THÈME 1)

Le déflectomètre portable (LWD) a été abondamment utilisé dans le cadre des travaux de la chaire. Ce type d'outil est très pratique et simple d'utilisation pour la détermination du module réversible des sols et matériaux de chaussées, mais relativement nouveau et peu documenté. Les travaux de la Chaire ont permis de faire progresser les connaissances au niveau de la distribution des contraintes sous la plaque de chargement d'un tel outil et de proposer des ajustements au facteur de distribution de contrainte typiquement utilisé dans les équations de Boussinesq afin de prendre en considération le diamètre de la plaque.

Cette recherche a permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- De la répartition non-uniforme des contraintes sous une plaque de déflectomètre
- Des facteurs influençant la distribution des contraintes sous une plaque de chargement d'un déflectomètre portable

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Un tableau de facteurs de correction à appliquer dans le logiciel d'analyse du LWD pour différentes conditions de sols et diamètres de plaques d'essai

BÉNÉFICE TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE DU DRAINAGE DES CHAUSSÉES (THÈME 1)

Dans un contexte où le degré de saturation est reconnu comme un facteur prépondérant affectant la performance des chaussées, des études ont été menées afin de mettre à l'essai diverses techniques de drainage permettant de mieux contrôler et stabiliser les teneurs en eau dans les couches de la chaussée et dans le sol d'infrastructure. La recherche était fondée sur la mesure de la récupération des propriétés mécaniques lors du drainage de structures de chaussées au laboratoire et sur section expérimentale.

Cette recherche a permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- De l'effet du niveau de saturation sur le comportement mécanique de la chaussée
- De l'effet d'une couche drainante de type géosynthétique, installée à différentes positions dans une structure de chaussée flexible, sur l'état hydrique et la réponse mécanique de la chaussée lorsque soumise à des épisodes de saturation

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Des facteurs de correction permettant l'évaluation du bénéfice sur la durée de vie de l'inclusion de couche drainante de type géosynthétique dans les structures de chaussées flexibles.

CONCEPTION DES CHAUSSÉES EN MILIEU MUNICIPAL (THÈME 2)

Les approches couramment utilisées pour le dimensionnement structural des chaussées ont été développées par les grandes administrations routières pour les chaussées en milieu rural. Le contexte municipal est assez différent du contexte rural, notamment au niveau de la vitesse de circulation et de la présence d'utilités publiques souterraines. Le projet a permis de développer une approche innovatrice de conception des chaussées municipales prenant en compte a) l'effet de la vitesse de circulation en intégrant au modèle de calcul des lois de comportement viscoélastiques des sols et matériaux de chaussées; et b) le risque et les conséquences du soulèvement différentiel en fonction du type et de la classe de route.

Cette recherche a permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- Du comportement viscoélastique de sols typiques pour la prise en compte de l'effet de la vitesse lors du dimensionnement structural des chaussées
- La variabilité des sols d'infrastructure et son incidence sur le soulèvement différentiel et sur l'endommagement de l'uni des chaussées

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Une méthode pour prendre en compte l'effet de la vitesse lors du dimensionnement structural des chaussées municipales
- Une méthode pour vérifier le comportement au gel des structures de chaussées
- Un logiciel de calcul pour le dimensionnement structural des chaussées en milieu municipal (en développement; version Beta disponible à l'hiver 2013)





EFFET DES PNEUS ET DES CHARGES DYNAMIQUES (THÈME 2)

La performance des chaussées est aussi influencée par les caractéristiques des charges à la surface, notamment les dimensions et propriétés des pneus utilisés sur les véhicules lourds et les aspects dynamiques associés à la charge. Dans le premier cas, l'utilisation de pneus à bande large comporte plusieurs avantages comparativement aux pneus jumelés conventionnels, mais les connaissances liées à l'effet qu'ils ont sur l'endommagement des chaussées sont à améliorer. Par ailleurs, la détérioration des chaussées, notamment la détérioration du profil hivernal par les soulèvements différentiels, provoque des oscillations de la suspension des véhicules lourds en déplacement sur les chaussées, ce qui induit des charges dynamiques. Ces charges peuvent être significativement plus élevées que la charge statique généralement admise. Ce phénomène étant encore mal compris et intégré, des travaux de modélisation ont été réalisés pour mieux comprendre l'effet des diverses déformations de surface, et aussi de l'IRI, sur le niveau des charges dynamiques.

Cette recherche a permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- De l'endommagement causé par les pneus simples à bandes larges grâce à une instrumentation originale à fibre optique permettant la caractérisation de l'ensemble du bassin de déformation sous les pneumatiques afin de mieux quantifier le dommage réel, en incluant l'ensemble des zones de sollicitation critiques.
- De comprendre comment les diverses déformations de surface, notamment celles associées au gel, et la vitesse affectent l'intensité du chargement dynamique.

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Une gamme d'instruments de pointe (déformation et déflexion dans le corps des chaussées) pour la mesure de la réponse mécanique de la chaussée sous les véhicules lourds (deux brevets déposés)
- Un logiciel d'analyse des signaux de déformation de la chaussée
- Une méthode rigoureuse d'analyse de l'effet des charges lourdes sur l'endommagement de la chaussée
- Un modèle permettant de relier l'IRI et la vitesse au niveau de charge dynamique induit par les véhicules lourds circulant sur des chaussées détériorées (le modèle sera intégré au logiciel de conception des chaussées)

ANALYSE DES PARAMÈTRES DE BASSINS DE DÉFLEXION (THÈME 2)

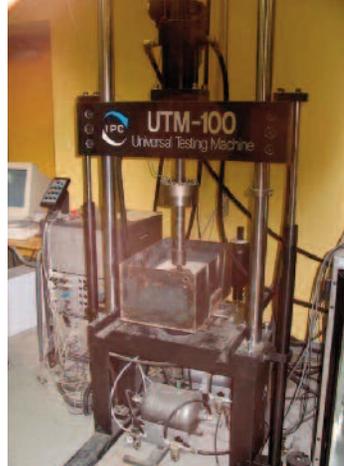
Le déflectomètre à masse tombante est reconnu comme étant la référence pour la mesure du comportement mécanique des chaussées. On utilise généralement une procédure de rétro-calcul pour déterminer les modules élastiques des couches de la chaussée qui servent ensuite à faire l'analyse structurale de la chaussée. Le projet de recherche réalisé dans le cadre du programme de la Chaire visait le développement d'une méthode de calcul de renforcement de la chaussée directement à partir des caractéristiques du bassin de déflexion.

Les recherches réalisées dans le cadre de ces projets ont permis de faire progresser les connaissances sur :

- La relation entre les caractéristiques de la structure de chaussée et sa réponse mécanique en déflexion.

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- Une méthode de calcul (intégré à un utilitaire de calcul EXCEL) permettant le calcul des déformations critiques dans la chaussée et le renforcement requis à partir des caractéristiques du bassin de déflexion mesuré au déflectomètre à masse tombante (FWD)



COMPORTEMENT ET PERFORMANCE DES VÉHICULES SUR LES CHAUSSÉES (THÈME 3)

Les véhicules lourds circulant sur les chaussées dont l'état de surface est imparfait sont fortement influencés par les déformations, notamment au niveau de leur comportement et de leur efficacité, mais sont aussi susceptibles d'avoir des effets néfastes sur la santé des opérateurs. Les travaux de la Chaire ont donné lieu à d'importantes activités de modélisation basées sur la dynamique des systèmes multicorps afin d'étudier l'effet de l'uni des chaussées sur le comportement des véhicules lourds. Les compagnies Michelin, Manac et Freightliner ont accepté de fournir des données techniques confidentielles sur leurs produits ce qui permet de rehausser la qualité du modèle. De plus, des travaux de validation et de calage utilisant un camion réel instrumenté ont été réalisés sur un rang expérimental.

Les recherches réalisées dans le cadre de ces projets ont permis de faire progresser les connaissances notamment au niveau :

- De la compréhension de l'interaction entre la chaussée et le véhicule
- De l'effet de l'IRI d'une chaussée, et plus spécifiquement l'effet de diverses composantes d'un profil de route, sur l'usure et la consommation d'essence des véhicules lourds circulant sur des chaussées dégradées, mais aussi sur la santé et la sécurité du conducteur.

Les outils d'ingénierie qui découlent de cette recherche sont les suivants :

- un logiciel de comportement de véhicule avec emphase sur l'analyse de l'interaction dynamique entre le profil de la chaussée et le pneu permettant d'étudier l'influence de l'état de la route sur l'efficacité des véhicules lourds;
- Des critères rigoureux de seuils d'intervention sur les chaussées basés sur une analyse de corrélation entre la dégradation de l'uni de la chaussée et les effets sur la santé et la sécurité ainsi que sur l'usure et la consommation d'essence.



FORMATION DE MAIN D'ŒUVRE HAUTEMENT QUALIFIÉE

En plus d'un personnel technique formé de trois professionnels de recherche (Jean-Pascal Bilodeau, Jérôme Fachon et Pierre Perron), le programme de recherche de la chaire i3C a contribué directement à la formation de plus de 40 étudiants hautement qualifiés pour travailler dans le domaine de l'ingénierie des chaussées :

PROJETS DE DOCTORAT

1. Damien Grellet
2. Louis Gagnon
3. Youdjari Djonkamla

PROJETS DE MAÎTRISE

1. Joannie Poupart (Génivar)
2. Jonas Depatie (LVM)
3. Catherine Savoie (InspecSol)
4. Claudia Mellizo (Dessau)
5. Alejandro Quijano (Dessau)
6. Dario Soto
7. Papa M. Thiam
8. Damien Grellet
9. François P. Drolet

PROJETS DE FIN D'ÉTUDES

1. Éric Marcil
2. Catherine Savoie
3. Camille Schwarz (Eurovia)
4. Alexis Dejean
5. Fabrice Dalmasso
6. Nicolas Farcette
7. Sébastien Wurckler
8. Vincent Drouot

ASSISTANTS DE RECHERCHE ET STAGIAIRES

1. Antoine Fecteau
2. Anne Cargemel
3. Valérie Lachance
4. David Bilodeau
5. Yann Beaudoin
6. Frédéric Lévesque
7. Catherine Savoie
8. Alexandre Proulx
9. Adam Lavoie
10. Camille André
11. Keven Bédard
12. Julian Barbosa
13. Kevin Hibon
14. Noémie C. Lessard
15. Paul de Barbeyrac
16. Samuel Senneville
17. Brian Mercier
18. Thomas Gaudiard
19. Romain Foveaux
20. Simon Dumais
21. Dejan Grabundzija
22. Anne-Sophie Kapp
23. Gregory Ghitti
24. Robin Guilbault



3



CAPACITÉ D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE

La chaire i3C a permis de consolider une importante capacité de recherche en génie des chaussées à l'Université Laval. En plus du personnel de recherche attaché à la Chaire, la capacité d'expertise et de recherche repose sur le plus important laboratoire de recherche sur les chaussées au Canada. Le laboratoire, axé sur la géotechnique routière et les études expérimentales, comporte les équipements principaux suivants :

- **Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL; FCI 1998)** : site expérimental routier permanent de 1 km de longueur comportant des sections pour l'étude des techniques de surfacage, l'étude du comportement des structures de chaussées et l'étude de l'agressivité des véhicules lourds.
- **Le laboratoire de géotechnique routière** : Laboratoire de préparation et d'essais sur les sols et les matériaux granulaires de chaussées
- **Système universel d'essais sur les matériaux routiers** : Presse hydraulique à chargement cyclique pour essais en mode triaxial, en compression axiale ou diamétrale et en flexion de poutre avec système de conditionnement environnemental
- **Simulateur de charge de laboratoire** : Simulateur de charge à échelle réduite pour sollicitation par passage répété de roue sur des éprouvettes de chaussées
- **Laboratoire de gel** : Chambres froides, cellules de gel, caméra infrarouge, équipement de mesure de propriétés thermiques et bains thermiques pour essais sur les matériaux ou sur éprouvettes de chaussées en conditions de gel et de dégel
- Parc d'équipement d'essais de géotechnique routière incluant notamment un déflectomètre à masse tombante (FWD), deux déflectomètres portables (LWD), des équipements de mesure de déformation dans les chaussées, des pesées portables, un système de mesure de la pression de contact, un pénétromètre dynamique automatisé, un profilomètre, des inclinomètres, des scissomètres et une foreuse portable.

Par ailleurs, la présence d'une chaire industrielle du CRSNG dans le domaine des routes a été un atout important qui a permis l'obtention d'une subvention de plus de \$18 000 000 de la FCI/MEQ pour la construction d'un laboratoire sur les infrastructures à l'Université Laval. Le laboratoire comporte une fosse d'essai intérieure qui permettra de reconstituer des chaussées d'essai en conditions environnementales contrôlées (eau et température). La subvention permettra également l'acquisition d'un simulateur de charge mobile qui permettra la reproduction à grand débit des effets d'une roue de camion chargée. Le simulateur permettra de faire des séquences de chargement accélérées sur la fosse d'essai, sur le site expérimental routier de l'Université Laval (SERUL) ou sur une route en service. Le simulateur sera vraisemblablement utilisé pour bonifier certains projets en cours lors de la dernière année de la chaire (2013).

Il est à noter que la capacité de recherche de l'équipe de la Chaire i3C est fortement accrue par les collaborations développées avec les partenaires de la Chaire qui apportent de l'expertise et des équipements scientifiques complémentaires à ceux disponibles à l'Université Laval.



Au cours des quatre premières années du programme, l'équipe de la chaire a produit 65 publications de toutes sortes incluant des publications dans des revues avec comité de lecture (10 publications publiés, acceptées ou soumises); dans des conférences avec arbitrage (12 publications); ou sous d'autres formes (Conférences sans arbitrage, revues d'ingénierie et rapports techniques). La liste complète des publications produites par la chaire i3C est donnée à l'annexe 1.



La plupart des projets de la Chaire i3C ont permis de constituer des bases de données importantes spécifiques aux sujets traités. Ces bases de données sont disponibles sur demande pour les partenaires qui souhaiteraient les exploiter à des fins de recherche et de développement. Par ailleurs, la phase 1 de la chaire a permis d'établir les bases d'une importante base de données sur plus de 40 chaussées échantillonnées dans les villes de Québec et de Montréal. Cette base de données atteindra sa maturité lors de la deuxième phase de la chaire i3C et permettra de supporter plusieurs projets relatifs à la performance des chaussées en contexte municipal.



Le programme de la Chaire prévoyait l'établissement de réseaux de collaborateurs à l'intérieur de l'Université Laval, mais aussi avec des chercheurs d'autres institutions à l'échelle nationale et internationale.

À l'Université Laval, des collaborations importantes ont été développées avec les professeurs Marc Richard (génie mécanique) et Benoît Fournier (génie géologique) qui participent notamment à l'encadrement des étudiants. Le premier est davantage impliqué dans les projets ayant des liens avec le comportement des véhicules. Le second est davantage impliqué dans les projets ayant des liens avec les matériaux.

Une collaboration importante s'est également développée avec des chercheurs de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) (Jean-Michel Piau, Armelle Chabot, Pierre Hornych, Jean-Pierre Kerzreho). Un étudiant du programme de la Chaire a séjourné à leur centre de recherche et des sections du manège de fatigue de Nantes ont été instrumentées avec les capteurs à fibre optique développés dans le cadre de la Chaire pour l'étude avancée de l'effet du type de pneus.

Plusieurs discussions ont également eu lieu avec les chercheurs de l'école de technologie supérieure, de l'Université de Waterloo et de l'Université de l'Illinois.



PARTENAIRES



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des Sciences et de génie
Département de génie civil



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

LISTE DES PUBLICATIONS

Novembre 2012

REVUES AVEC COMITÉ DE LECTURE (PUBLIÉ OU ACCEPTÉ)

1. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2012. Relating resilient behaviour of compacted unbound base granular materials to matrix and interlock characteristics. *Construction and Building Materials*, Volume 37: 220-228.
2. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2012. Estimation of tensile strains at the bottom of asphalt concrete layers under wheel loading using deflection basins from falling weight deflectometer tests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 39: 771-778.
3. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2012. Resilient modulus water sensitivity of compacted unbound granular materials used as pavement base. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(5): 459-471.
4. Grellet, D., Doré, G. and Bilodeau, J.-P. 2012. Comparative study on the impact of wide base tires and dual tires on the strains occurring within flexible pavements asphalt concrete surface course. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(5):525-535.
5. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. and Schwarz, C. 2011. Effect of seasonal frost conditions on the permanent strain behaviour of compacted unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(5): 507-518.

6. Deblois, K., Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2010. Use of FWD Time History Data for the Analysis of Seasonal Variation in Pavement Response. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 37, p. 1224-1231.

REVUES AVEC COMITÉ DE LECTURE (SOUMIS)

1. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2012. A study on the stress distribution experienced under portable light weight deflectometer loading plate. Soumis à la *Revue International Journal of Pavement Engineering*.
2. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2012. Pavement reinforcement through asphalt concrete thickness increase for rutting mitigation of base layer containing RAP. Soumis à la revue *Canadian Journal of Civil Engineering*.
3. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2012. Estimation of compressive strain at the top of subgrade soil from FWD deflection basin and development of a comprehensive reinforcement design methodology. Article en préparation.
4. Gagnon, L., Richard, M. J., Masarati, P., Morandini, M. and Doré, G. 2012. An Implicit Rigid Ring Tire Model for Multibody Simulation with Energy Dissipation. Soumis à la revue *Tire Science and Technology*.

CONFÉRENCES AVEC COMITÉ DE LECTURE (PUBLIÉ OU ACCEPTÉ)

1. Bilodeau, J.-P., Doré, G. and Poupart, J. 2012. Permanent deformation of various unbound aggregates submitted to seasonal frost conditions. Proceedings of International Conference on Cold Regions Engineering, August 20th to 22nd, Quebec, Canada.
2. Depatie, J., Bilodeau, G., and Doré, G. 2012. Evaluation of recycled base layers properties produced by full depth reclamation. Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Geotechnics, Miura et al. (eds), Hokkaido, Japan, 10-12 September 2012.
3. Grellet, D., Doré, G., Kerzreho, J.-P., Piau, J.-M., Chabot, A. and Hornych, P. 2012. Experimental and Theoretical Investigation of Three Dimensional Strain Occurring Near the Surface in Asphalt Concrete Layers. In proceedings of 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, A. Scarpas et al. (Eds.), pp. 1017 – 1027.
4. Grellet, D., Doré, G., Bilodeau, J.-P. and Gauliard, T. 2012. Effect of tire type on damage occurring in flexible pavement structures. Prepared for 92nd Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
5. Savoie, C., Doré, G., Bilodeau, J.-P. and Fachon, J. 2012. Effect of Geosynthetic Drainage Layers on the Recovery Rate of Pavement Surface Modulus. Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Geotechnics, Miura et al. (eds), Hokkaido, Japan, 10-12 September 2012.
6. Gagnon, L., Richard, M. J., Masarati, P., Morandini, M. and Doré, G. 2011. Multibody simulation of tires operating on an uneven road. In proceedings of Multibody Dynamics – ECCOMAS thematic conference, J.C. Samin et P. Fisette (eds), Brussels, Belgium, July 4th-7th 2011.
7. Grellet, D., Doré, G. and Bilodeau, J.-P. 2010. Effect of tire type on strains occurring in asphalt concrete layers. In Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements CD-ROM, Nagoya, Japan, August 1st to 6th, 10 p.
8. Murillas, A. Q., Doré, G. and Bilodeau, J.-P. 2010. Design and rehabilitation of urban pavements. In Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements CD-ROM, Nagoya, Japan, August 1st to 6th, 10 p.
9. Suarez, C. A. M., Doré, G. and Bilodeau, J.-P. 2010. Resilient modulus estimation for granular materials. In Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements CD-ROM, Nagoya, Japan, August 1st to 6th, 9 p.

CONFÉRENCES AVEC COMITÉ DE LECTURE (SOU MIS)

1. Doré, G. and Bilodeau, J.-P. 2012. A new pavement design procedure for frost protection in seasonal frost areas. Submitted to Bearing Capacity of Roads Railways and Airfields 2013.
2. Tafur, D. S., Doré, G. and Bilodeau, J.-P. 2012. Estimation of subgrade soils mechanical properties and frost sensitivity through the use of simple tests. Submitted to Bearing Capacity of Roads Railways and Airfields 2013.
3. Thiam, P. M., Doré, G. and Bilodeau, J.-P. 2012. Effect of the future increases of precipitation on the long-term performance of roads. Submitted to Bearing Capacity of Roads Railways and Airfields 2013.

AUTRES PUBLICATIONS OU COMMUNICATIONS SANS COMITÉ DE LECTURE

1. André, C. 2012. Détermination de données structurales des chaussées. Projet de fin d'études, Polytech-Grenoble, 50 p.
2. Bilodeau, J.-P., Doré, G., Depatie, J. and Poupart, J. 2012. Rutting behaviour of flexible pavements aggregate bases measured with small-scale laboratory heavy vehicle simulator. In Proceedings of 2013 Transportation Association of Canada Conference, October 14th to 17th, Fredericton, New Brunswick.
3. Djonkamla, Y. 2012. Développement et/ou validation de lois d'évolution de comportement des chaussées flexibles adaptées aux conditions environnementales du Québec : État des connaissances et orientations du projet. Recueil des communications du 47ème congrès de l'AQTR, 2 au 4 avril 2012, Québec (présentation).
4. Doré, G. 2012. L'instrumentation des chaussées. ViaBitume, 7(1) : pp. 25-26.
5. Grellet, D. et Doré, G. 2012. Évaluation de l'impact de la pression et des types de pneus sur les performances des chaussées souples. ViaBitume, 7(1) : pp34-37.

6. Savoie, C., Doré, G., Bilodeau, J.-P. and Fachon, J. 2012. Effet du drainage sur la récupération mécanique des chaussées en contexte climatique nordique. Rapport de recherche pour le compte de Transports Canada.
7. Tafur, D.S. 2012. Caractérisation des sols d'infrastructures. Recueil des communications du congrès 18ème INFRA, 19 au 21 novembre 2012, Montréal (présentation).
8. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2011. Estimation of resilient modulus for compacted unbound granular materials used as base and subbase layers in Canada. In Proceedings of 2011 Transportation Association of Canada Conference, September 12th to 16th, Edmonton, Alberta.
9. Bilodeau, J.-P. and Doré, G. 2011. Influence of moisture content on the resilient modulus of base granular materials. In Proceedings of 2011 Transportation Association of Canada Conference, September 12th to 16th, Edmonton, Alberta.
10. Bilodeau, J.-P., Doré, G. et Suarez, C.A.M. 2011. Estimation du module réversible des matériaux granulaires non liés mis en place à compacité élevée dans les fondations de chaussées. Recueil des communications du 46ème congrès de l'AQTR, 11 au 13 avril 2011, Montréal (présentation).
11. Cargemel, A. 2011. Étude de l'impact des charges dynamiques sur la chaussée. Projet de fin d'études, Polytech-Nantes, 41 p.
12. Dejean, A. 2011. Étude sur les facteurs influençant la qualité et la représentativité des essais au déflectomètre portable. Projet de fin d'études, INSA Strasbourg, 80 p.
13. Depatie, J., Doré, G. et Bilodeau, J.-P. 2011. Module réversible et déformation permanente de matériaux recyclés contenant des granulats bitumineux utilisés en fondation de chaussées. Recueil des communications du 17ème congrès INFRA, 7 au 9 novembre 2011, Québec (présentation).
14. Doré, G. 2011. La Chaire de recherche industrielle du CRSNG i3C et la recherche sur la conception et la performance des chaussées. ViaBitume, 6(3) : pp. 22-24.
15. Doré, G. 2011. La Chaire de recherche industrielle du CRSNG i3C et la recherche sur les matériaux routiers. ViaBitume, 6(2) : pp. 50-52.
16. Fachon, J. 2011. Évaluation de l'impact de la pression et des types de pneus sur la résistance en fatigue des chaussées souples. Recueil des communications du 46ème congrès de l'AQTR, 11 au 13 avril 2011, Montréal (présentation).
17. Gagnon, L., Richard, M. et Doré, G. 2011. L'influence de l'uni de la route sur l'efficacité du transport. Via Bitume, 6(1):43-45.
18. Grellet, D., Bilodeau, J.-P. et Doré, G. 2011. Déformation dans les couches d'enrobés bitumineux. Recueil des communications du 17ème congrès INFRA, 7 au 9 novembre 2011, Québec (présentation).
19. Guilbault, R. 2011. Utilisation des géosynthétiques dans les chaussées. Projet de fin d'études, Polytech-Nantes, 35 p.
20. Poupart, J., Doré, G., Bilodeau, J.-P. 2011. Déformation permanente des matériaux granulaires de fondation (MG-20) en contexte de gel et dégel. Recueil des communications du 46ème congrès de l'AQTR, 11 au 13 avril 2011, Montréal (présentation).
21. Savoie, C., Doré, G., Bilodeau, J.-P. and Fachon, J. 2011. Effet du drainage sur la récupération mécanique des chaussées en contexte climatique nordique. Rapport de recherche pour le compte de Transports Canada.
22. Savoie, C., Bilodeau, J.-P., Doré, G. 2011. Évaluation de l'impact de l'implantation de technologies géosynthétiques sur la durée de vie d'un ouvrage routier. Via Bitume, Vol. 6(3), p. 36-37.
23. Savoie, C., Doré, G., Bilodeau, J.-P. et Fachon, J. 2011. Étude de l'effet du drainage sur la récupération mécanique des chaussées : Phase de laboratoire. Recueil des communications du 46ème congrès de l'AQTR, 11 au 13 avril 2011, Montréal (présentation).
24. Savoie, C. 2011. Effet du drainage sur la récupération mécanique d'une chaussée expérimentale en laboratoire. Colloque Infrastructures routières et application des géosynthétiques de l'AQTR, 29 avril 2010, Drummondville (présentation).
25. Suarez, C. A. M. et Bilodeau, J.-P. 2011. Estimation du module réversible des matériaux granulaires. Via Bitume, Vol. 6 (1), p. 17-18.

26. Bilodeau, J.-P. et Doré, G. 2010. Effet de la granulométrie sur le module réversible des matériaux granulaires. Recueil des communications du 45ème congrès de l'AQTR, 29 au 31 mars 2010, Québec (présentation).
27. Bilodeau, J.-P. et Doré, G. 2010. Développement d'une méthode de conception de chaussées mécaniste-empirique adaptée au contexte municipal. Recueil des communications du 16ème congrès INFRA, 15 au 17 novembre 2012, Montréal (présentation).
28. Drouot, V. 2010. Étude de l'effet des chaussées dégradées sur la consommation de carburant des véhicules et la sécurité des usagers de la route. Projet de fin d'études, INSA Strasbourg, 107 p.
29. Farcette, N. 2010. Développement et Intégration d'une méthode de prédiction de soulèvement de structure de chaussées en contexte nordique dans le cadre d'une nouvelle approche rationnelles de conception des chaussées municipales. Projet de fin d'études, INSA Strasbourg, 110 p.
30. Grellet D., Doré G. 2010. Évaluation de l'impact de la pression et des types de pneus sur les performances des chaussées souples. *Via bitume*, 5(2) : pp. 22-24.
31. Grellet D. et Doré G. 2010. Caractérisation des déformations dans la couche bitumineuse -effet du type de pneu. Recueil des communications du 45ème congrès de l'AQTR, 29 au 31 mars 2010, Québec (Affiche).
32. Grellet, D. et Doré, G. 2009. Évaluation de l'impact de la pression et des types de pneus sur la résistance en fatigues des chaussées souples. Recueil des communications du 15ème congrès INFRA, 16 au 18 novembre, Mont Tremblant (présentation).
33. Murillas, A. Q. et Bilodeau, J.-P. 2010. Conception des chaussées municipales. *Via Bitume*, Vol.5 (3), p. 20-21.
34. Poupard, J., Bilodeau, J.-P., Doré, G. et Schwarz, C. 2010. Déformation permanente des matériaux granulaires de chaussée en contexte de gel saisonnier. Recueil des communications du 45ème congrès de l'AQTR, 29 au 31 mars 2010, Québec (Affiche).
35. Schwarz, C., Doré, G., Bilodeau, J.-P. et Fachon, J. 2010. Étude des déformations permanentes des matériaux granulaires non liés dans les fondations de chaussées face aux cycles de gel/dégel. Rapport de recherche TP15047F, présenté à Transports Canada, 91 p.
36. Suarez, C.A.M., Doré, G. et Bilodeau, J.-P. 2010. Estimation du module réversible des matériaux granulaires de chaussées. Recueil des communications du 45ème congrès de l'AQTR, 29 au 31 mars 2010, Québec (Affiche).
37. Wurckler, S. 2010. Développement de techniques d'auscultation de chaussées. Projet de fin d'études, INSA Strasbourg, 66 p.
38. Doré, G., Fachon, J. et Grellet, D. 2009. Étude de l'incidence des systèmes de contrôle de gonflement des pneus (SCGP) sur l'interaction véhicule-Route. Rapport de recherche TP 14950F, 115 p.
39. Kapp, A.-S. 2009. Mémoire de stage ST2 - Spécialité génie civil. Rapport de stage, INSA Strasbourg, 58 p.
40. Marcil, É. 2009. Influence de la minéralogie sur le comportement des granulats de fondation routière. Projet de fin d'études, Université Laval, 75 p.
41. Doré, G., Fachon, J. et Grellet, D. 2008. Étude de l'impact des Systèmes de contrôle de gonflement des pneus (CTI) sur l'interaction véhicule-route. Rapport d'étape, décembre 2008, 73 p.
42. Doré, G., Fachon, J. et Grellet, D. 2008. Étude de l'impact des Systèmes de contrôle de gonflement des pneus (CTI) sur l'interaction véhicule-route. Rapport d'étape, mai 2008, 9 p.
43. Doré, G., Fachon, J. et Grellet D. 2008. Comparaison de l'impact des pneus larges et jumelés sur l'interaction véhicule-route. Rapport d'étape, décembre 2008, 73 p.