

INNOVATION

NUMÉRO 11 OCTOBRE 2001

TRANSPORT

BULLETIN SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

mtq.gouv.qc.ca/innovation/innovation.htm



DOSSIER



OUTIL PERMETTANT D'ANALYSER
LA STABILITÉ DES VÉHICULES LOURDS

Québec 

**PROJET DE RECHERCHE
CONCEPTION DES GLISSIÈRES DE BÉTON
RENFORCÉES AVEC DE L'ARMATURE
EN MATÉRIAUX COMPOSITES 3**

**LE MULTIMODAL
ACQUISITION DES EMPRISES FERROVIAIRES
ABANDONNÉES PAR LE MINISTÈRE DES
TRANSPORTS DU QUÉBEC ET TRANSFERT DE LA
GESTION AUX MUNICIPALITÉS RÉGIONALES DE
COMTÉ 7**

**DOSSIER
OUTIL PERMETTANT D'ANALYSER LA STABILITÉ
DES VÉHICULES LOURDS 10**

**ROUTES ET STRUCTURES
MODÈLES DE PERFORMANCE
DES CHAUSSÉES 18**

PARUTIONS RÉCENTES 22

**CONGRÈS ET
CONFÉRENCES 23**

INNOVATION TRANSPORT est réalisé par le Centre québécois de transfert de technologie routière et édité par la Direction des communications du ministère des Transports du Québec. Il est maintenant diffusé sur Internet à l'adresse suivante : <http://www.mtq.gouv.qc.ca/innovation/innovation.htm>

Rédaction : *Dominique Duchesne*

Révision linguistique : *Direction des communications*

Supervision graphique : *Jean-Pierre Tremblay*

Conception : *Tandem Conception et Infographie inc.*

Impression : *Imprimerie Art Graphique inc.*

Photogravure : *Composition Orléans*

Pour obtenir de l'information supplémentaire, il suffit de s'adresser à :

Ministère des Transports du Québec

Direction de la recherche et de l'innovation en transport

700, boul. René-Lévesque Est, 21^e étage

Québec (Québec), G1R 5H1

Téléphone : (418) 643-6039

Télécopieur : (418) 646-2343

Courrier électronique : doduchesne@mtq.gouv.qc.ca

Dépôt légal

Bibliothèque nationale du Québec

ISSN - 1480-610X

Tirage : 2000 exemplaires

OUTIL PERMETTANT D'ANALYSER LA STABILITÉ DES VÉHICULES LOURDS

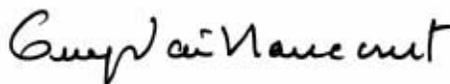
L'amélioration de la sécurité des usagers de la route est un objectif partagé par toutes les administrations, tant nord-américaines qu'européennes. La question de la sécurité est d'ailleurs d'autant plus préoccupante que le nombre de véhicules motorisés qui circulent sur le réseau routier a augmenté de façon notable au cours des dernières années.

À elle seule, la circulation de véhicules lourds a connu au Québec, au cours des dernières années, une croissance importante. Pour la période allant de 1995 à 1999, le taux d'accidents par 100 millions de kilomètres parcourus a été deux fois et demie plus élevé pour les camions lourds (2,19), en raison de leur masse, que pour les véhicules automobiles (0,84).

L'un des principaux objectifs du Ministère en matière de sécurité est de réduire le nombre d'accidents impliquant un véhicule lourd. Pour ce faire, il est essentiel de se doter de meilleurs outils pour analyser les causes de ces accidents. Le Ministère a donc entrepris une recherche sur l'utilisation des nouvelles technologies pour analyser la stabilité des véhicules lourds. Cette recherche a abouti à la conception d'un logiciel permettant d'évaluer le niveau de sécurité de ces véhicules.

Ce logiciel de simulation a été conçu en fonction du contexte québécois, en tenant compte notamment des types de véhicules, des types de profils routiers et du climat. Les résultats obtenus jusqu'à maintenant ont permis au Ministère de prendre des décisions plus éclairées en ce qui concerne les problèmes liés à la circulation des camions et d'apporter des modifications réglementaires qui sont de nature à améliorer encore davantage la sécurité des usagers de la route.

Une description sommaire de ce logiciel ainsi que certains résultats obtenus à l'aide de celui-ci vous sont présentés dans la rubrique dossier du présent numéro. Nous espérons que cet article saura vous intéresser et vous permettra d'apprécier le travail accompli par la Direction du transport routier des marchandises pour améliorer le bilan routier des véhicules lourds.



Guy Vaillancourt, ing.

Directeur du transport routier des marchandises



CONCEPTION DES GLISSIÈRES DE BÉTON RENFORCÉES AVEC DE L'ARMATURE EN MATÉRIAUX COMPOSITES

par Gérard Desgagné, ing. M. Sc., Direction des structures, Ministère des Transports du Québec
et Brahim Benmokrane, ing. Ph. D., Université de Sherbrooke

Depuis le début des années 60, les critères de conception en matière de dispositifs de retenue sont demeurés presque inchangés. En 1998, la Direction des structures amorçait la révision de la conception des glissières de pont pour satisfaire aux exigences de la nouvelle norme S6-00 « Code canadien sur le calcul des ponts routiers ». En vertu de cette norme, chaque pont doit faire l'objet d'une analyse visant à déterminer le niveau de performance requis pour les glissières qui correspond à leur capacité à retenir les véhicules. Le niveau 1 représentant la capacité la plus faible et le niveau 3, la plus élevée.

Parmi les dispositifs de retenue dont le niveau de performance a été jugé satisfaisant, les glissières de béton renforcées avec armature classique en acier, pour un niveau de performance 2 ou 3 (PL2 ou PL3), sont très largement utilisées sur nos ouvrages. Ces glissières en béton armé sont exposées à des conditions atmosphériques très rigoureuses, qui accélèrent le processus de corrosion de l'armature d'acier, provoquant ainsi l'éclatement du béton. La corrosion de l'acier et l'éclatement du béton attaquent l'intégrité structurale des glissières, réduisent leur résistance à l'impact et leur durée de vie et entraînent des

coûts de réparation et de remplacement élevés. Dans le but de trouver une solution à ce problème, la Direction des structures a mis sur pied en 1998, parallèlement à la révision de la conception des glissières, un projet de recherche portant sur l'utilisation d'une nouvelle armature non corrosive en matériaux composites.

Ce projet, mené en collaboration avec la Direction territoriale de l'Estrie, fut confié à une équipe de recherche du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke. Cette équipe

a travaillé en partenariat avec l'entreprise Pultrall inc. de Thetford Mines, qui fabrique des barres d'armatures de type ISOROD, en matériaux composites constitués de fibre de verre avec résine de vinylester. Le but de la recherche était de démontrer que les glissières en béton renforcées d'une armature en matériaux composites ont un comportement au moins équivalent à celles qui sont renforcées d'une armature classique en acier et sont conçues selon les exigences de la nouvelle norme S6-00.

Photo 1 : Essai statique en laboratoire

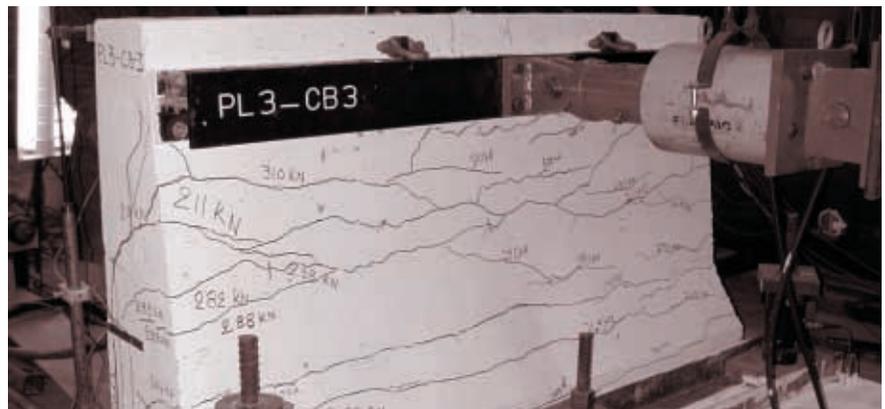


Figure 1 : Glissière en béton de type PL-2 renforcées avec de l'armature en matériaux composites

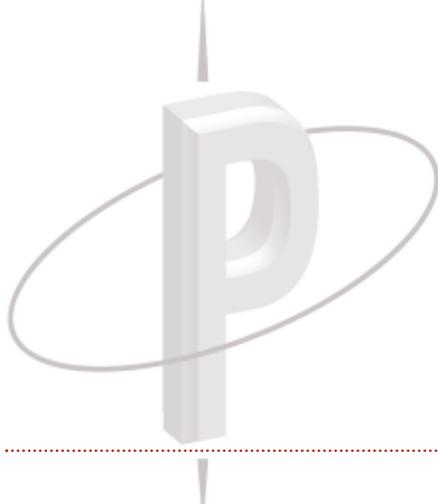
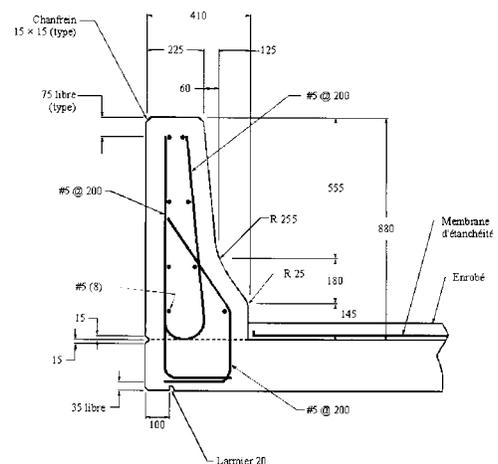


Figure 2: Glissières en béton de type PL-3 renforcées avec de l'armature en matériaux composites

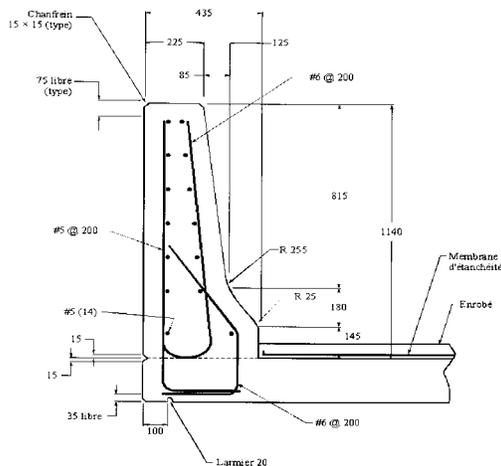


Photo 2: Glissières en béton de types PL-2 et PL-3 testées sur un site extérieur



Photo 3: Essai d'impact par pendule équivalent



La recherche reposait essentiellement sur deux types d'essais : des essais statiques en laboratoire et des essais dynamiques à l'extérieur.

Essais statiques (Phases I et II)

Le but des essais statiques était de vérifier en laboratoire différents dimensionnements de glissières en matériaux composites. La phase I portait sur une armature de liaison glissière/dalle en acier, et la phase II sur une armature de liaison glissière/dalle en matériaux composites.

L'essai statique consiste à appliquer une charge sur la glissière de façon graduelle, et ce, jusqu'à la rupture (photo 1).

Les séries d'essais réalisées ont permis d'évaluer le comportement général, sous charges statiques, des glissières en béton de types PL2 et PL3 renforcées d'une armature en matériaux composites, comparativement à celui des glissières renforcées d'une armature classique en acier. Les niveaux de déformation des armatures et du béton ainsi que les déplacements des glissières ont été mesurés en fonction de la charge appliquée. L'analyse des résultats d'essais effectués sur 16 glissières de 2 mètres de longueur a permis de démontrer que les glissières en béton de types PL2 et PL3 renforcées entièrement avec des armatures en matériaux composites (incluant l'armature de liaison glissière/dalle) ont un comportement comparable à celui des glissières renforcées avec de l'acier. Les résultats obtenus ont aussi montré que les résistances extrêmes qui ont été atteintes sont équivalentes. Les glissières proposées (figure 1 et 2) ont donc été retenues pour la réalisation des essais dynamiques.

Essais dynamiques (Phase III)

Les spécifications de la nouvelle norme exigent que les glissières d'un pont résistent à l'impact initial d'une collision et demeurent efficaces

Photo 4 : Réseau de fissuration de la glissière avec armatures d'acier

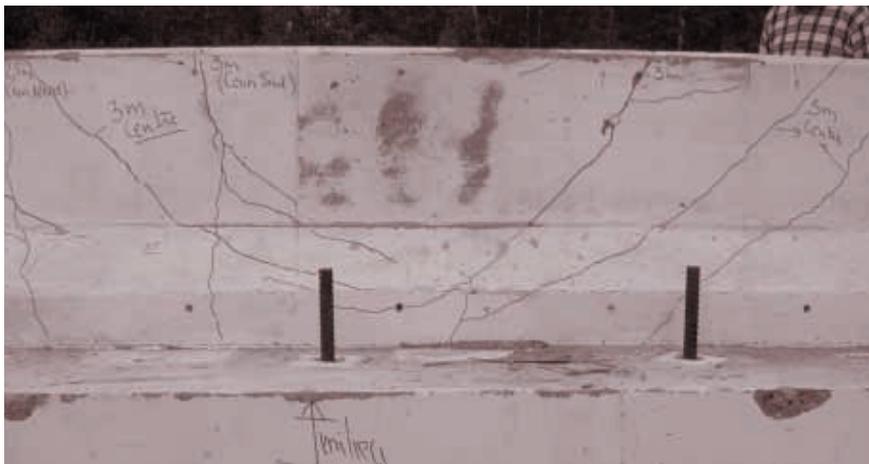


Photo 4 : Réseau de fissuration de la glissière avec armatures composites



Photo 6 : Essai destructif (vue avant)



pour rediriger le véhicule dans sa trajectoire, ce dont il faut s'assurer par des essais de collision (Crash-Test). La forme, déjà normalisée, des nouvelles glissières (F-Shape) nous assure que le véhicule sera bien redirigé en cas de collision ; cependant, leur résistance doit être testée par un essai d'impact. La comparaison entre le comportement des glissières renforcées d'une armature en matériaux composites et celui des glissières renforcées avec de l'acier est possible grâce au fait que la résistance des glissières originales à armature d'acier a pu être évaluée au cours des années où elles ont été utilisées dans des dispositifs de retenue.

Il n'y a pas de spécification quant au déroulement des essais d'impact, il a donc été convenu de procéder avec un pendule équivalent (procédure déjà utilisée en Ontario) et de tester les glissières à armature composite et des glissières de même type à armature d'acier, dans les mêmes conditions, en les sollicitant de façon maximale et en comparant les résultats.

L'essai d'impact par pendule équivalent s'est effectué à l'aide d'une grue et d'une boule de démolition en acier de 3 tonnes. Le système d'impact doit d'abord être calibré de façon à ce que l'impact produit génère des dommages sérieux sur des glissières classiques avec armature d'acier, nécessitant à la limite leur remplacement. On applique ensuite le même système sur les glissières avec armature en matériaux composites et on compare les résultats.

Huit glissières d'une longueur de dix mètres, incorporées à une dalle de 1,5 m de largeur sur 0,25 m d'épaisseur, ont été construites au Centre de services de Sherbrooke en condition de chantier, soit avec quatre de chacun des deux types (PL2 et PL3) (photo 2). Pour chaque type, deux glissières à armature d'acier et deux autres à armature composite ont été testées. L'essai a nécessité la fabrication d'un massif d'ancrage en béton armé de 12 m de longueur sur 2 m de largeur et 1 m de profondeur sur lequel on pouvait fixer les glissières sur dalle à l'aide de barres

à haute résistance. La hauteur de chute du pendule, calibrée pour les types PL2 et PL3, était respectivement de 3 m et 3,5 m en considérant un point d'impact constitué d'une plaque de répartition en acier, appuyée directement sur la glissière en béton (photo 3). Des essais destructifs sur glissière sans plaque de répartition ont également été effectués.

Les essais avec plaque de répartition ont montré que le comportement des glissières à armature composite est similaire à celui des glissières de même type à armature d'acier classique. On a cependant pu observer un réseau de fissurations plus développé dans le cas des glissières renforcées de matériaux composites, en raison du fait que le module d'élasticité de la

fibre de verre est cinq fois plus faible que celui de l'acier (photos 4 et 5). Le mode de liaison entre la glissière et la dalle n'a présenté aucune rupture.

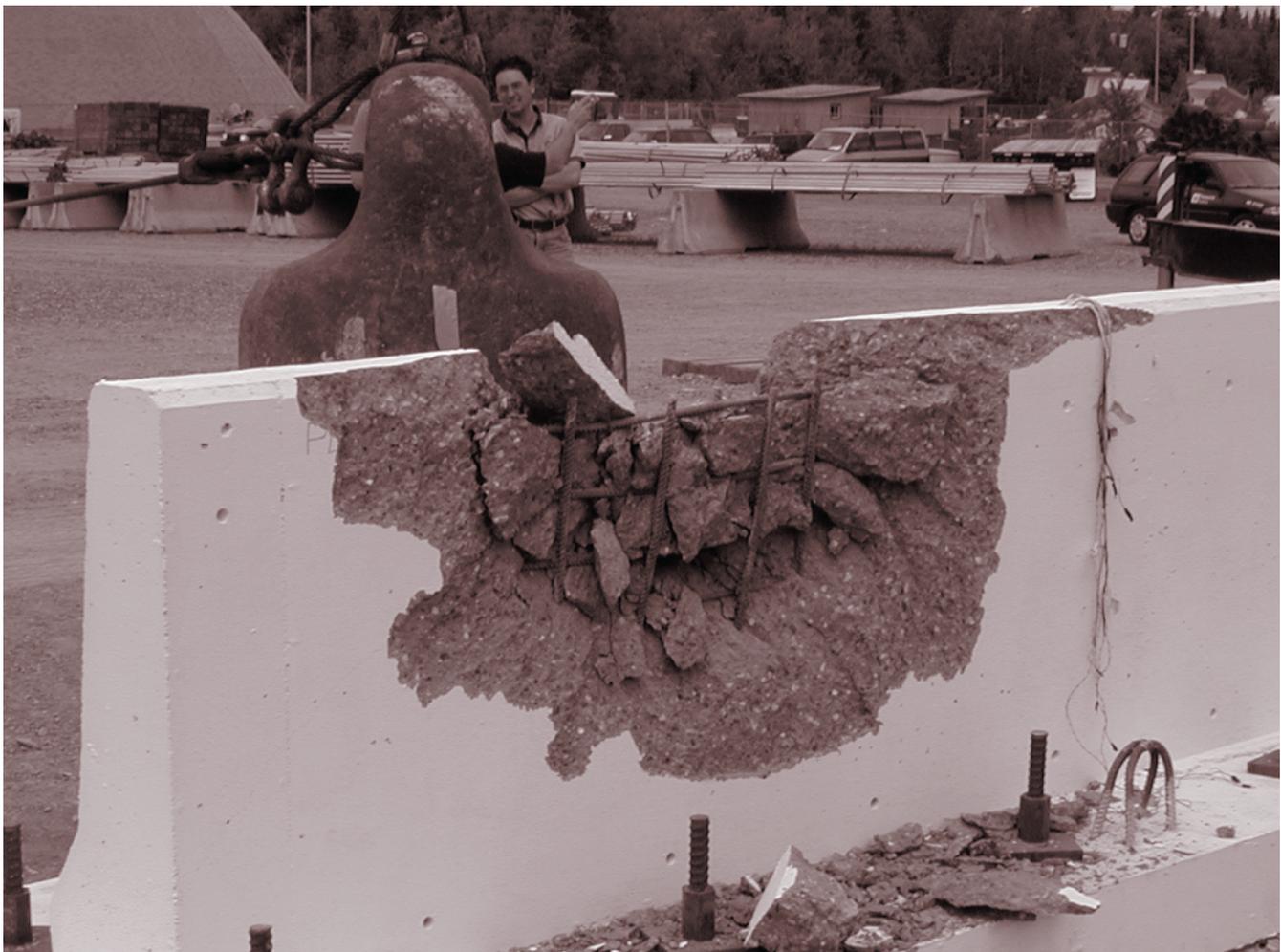
Les essais destructifs sans plaque de répartition (photos 6 et 7) ont montré que l'armature d'acier s'est plastifiée localement, alors que l'armature en matériaux composites a eu un comportement élastique sans rupture. Le comportement des deux glissières est toutefois similaire en ce qui concerne la zone de poinçonnement, la fissuration et l'éclatement du béton.

De façon générale, les résultats de la comparaison entre les comportements des deux types de glissières au moment de l'impact permettent de conclure que les glissières rigides en béton à

armature d'acier et celles qui ont une armature composite ont des performances très similaires quant à la fissuration, à l'absorption de l'énergie et à la résistance extrême.

L'utilisation sur des ponts de ce nouveau type de glissières de béton, renforcées avec une armature en matériaux composites, est prévue pour l'année 2002.

Photo 7 : Essai destructif (vue arrière)



ACQUISITION DES EMPRISES FERROVIAIRES ABANDONNÉES PAR LE MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC ET TRANSFERT DE LA GESTION AUX MUNICIPALITÉS RÉGIONALES DE COMTÉ

par Michèle Giasson, ing., Service du transport ferroviaire
et Valérie Labrie, stagiaire, Service du transport ferroviaire

INTRODUCTION

À la suite de l'abandon des corridors ferroviaires par les compagnies de chemin de fer, le ministère des Transports du Québec a acquis de la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (CN) et du Canadien Pacifique (CP) plusieurs emprises ferroviaires abandonnées. Ainsi, depuis 1994, le Ministère a pris possession de vingt-deux emprises ferroviaires abandonnées. La gestion de ces emprises, qui demeurent la propriété du Ministère, est transférée aux municipalités régionales de comté (MRC) lorsqu'elles sont utilisées à des fins récréotouristiques. Cet article présente un historique de l'acquisition par le ministère des Transports, des emprises ferroviaires abandonnées ainsi que les étapes du transfert de leur gestion aux MRC.

HISTORIQUE DE L'ACQUISITION

En 1977, le gouvernement du Québec s'était engagé à faire l'acquisition de toutes les emprises ferroviaires abandonnées ou susceptibles de l'être dans un proche avenir. Le gouvernement avait alors désigné le Ministère comme négociateur dans ces transactions. Il l'avait également chargé de la coordination des besoins et de la redistribution des terrains. En 1987, le gouvernement revenait sur son engagement et décidait de n'acquérir que les emprises ferroviaires utiles pour l'un ou l'autre des ministères.

En 1991, un comité, placé sous la présidence d'un représentant du ministère des Transports et regroupant huit autres ministères, étudiait le problème posé par les emprises ferroviaires abandonnées et dégageait les grandes lignes de l'action gouvernementale en ce qui a trait à l'utilisa-

tion de ces corridors. En 1992, une consultation publique était menée par un autre comité, formé de trois députés de l'Assemblée nationale. Ces deux comités recommandaient qu'on acquière les emprises abandonnées par les compagnies ferroviaires qui pouvaient être aménagées à des fins récréotouristiques. À la suite de cette recommandation, en 1994 et 1995, le Ministère faisait l'acquisition auprès du CN et du CP des emprises ferroviaires énumérées au tableau 1.

En 1996, le gouvernement renouvelait le mandat du Ministère et confirmait son intention d'acquérir certaines des emprises ferroviaires abandonnées, pour en conserver l'intégrité et s'assurer qu'elles demeurent dans le domaine public et puissent éventuellement être utilisées à des fins récréatives ou autres. De plus, il décidait d'en transférer la responsabilité aux MRC, pour ce qui est de l'aménagement, de la mise en valeur, de l'entretien et de la responsabilité civile,

Tableau 1

CORRIDOR FERROVIAIRE	LONGUEUR EN KILOMÈTRES	PISTE MULTIFONCTIONNELLE EN EXPLOITATION OU EN CONSTRUCTION EN KILOMÈTRES	PRISE DE POSSESSION
CORRIDOR DU CN			
Rivière-du-Loup—Frontière du Nouveau-Brunswick (P'tit Témis)	104	104	Octobre 95
Saint-Isidore—Pohénégamook (corridor Monk)	225	0 (en négociation)	Octobre 95
CORRIDOR DU CP			
Saint-Jérôme—Mont-Laurier (le P'tit Train du Nord)	200	200	Juin 94
Low—Messines (Maniwaki)	62	25	Octobre 95
Total	591	329	

lorsque leur vocation serait d'ordre récréotouristique. C'est le ministre responsable du loisir et du sport qui fut alors chargé d'établir les modalités des ententes avec les MRC.

La même année, le MTQ achetait les quatorze emprises du CN énumérées au tableau 2. Environ le tiers de ces emprises ont été louées aux MRC.

D'autres emprises du CN et du CP ont été acquises depuis 1996. Il s'agit des corridors énumérés au tableau 3.

Depuis 1994, le gouvernement du Québec a donc pris possession de vingt-deux emprises ferroviaires abandonnées, ce qui représente plus de 1300 kilomètres, et des discussions sont présentement en cours pour l'acquisition de nouveaux tronçons.

TRANSFERT DE LA GESTION AUX MRC

À partir du moment où le ministère des Transports prend possession d'une emprise ferroviaire qui pourrait être utilisée à des fins récréotouristiques, en collaboration avec le Secrétariat au loisir et au sport (SLS), il négocie le transfert de sa gestion avec la MRC concernée.

Certaines emprises offrent toutefois peu d'intérêt à cet égard pour les MRC, soit parce qu'elles sont morcelées ou parce que leur emplacement les rend difficile d'accès.

Lorsqu'une entente est conclue, un bail d'une durée de soixante ans est signé par le Ministère, le SLS et la MRC. Cette dernière devient alors le gestionnaire du corridor et doit procéder à sa

mise en valeur. Jusqu'à ce que le bail soit signé, ces emprises demeurent sous la responsabilité du Ministère et sont gérées par les directions territoriales.

Les emprises abandonnées sont également utilisées pour l'installation de services publics (lignes électriques, réseaux de canalisation et d'égout, conduites de gaz, fibre optique, etc.).

Tableau 2

CORRIDOR FERROVIAIRE	LONGUEUR EN KILOMÈTRES	PISTE MULTIFONCTIONNELLE EN EXPLOITATION OU EN CONSTRUCTION EN KILOMÈTRES	PRISE DE POSSESSION
CORRIDOR DU CN			
Shannon—Rivière-à-Pierre	63	63	Juillet 96
Aston-Jonction—Saint-Valère	21	0	Juillet 96
Sorel—Nicolet	53	0 (en négociation)	Juillet 96
Richmond-Charny (Danville)	139	139	Juillet 96
Granby—Marieville	35	28,4 (De Marieville à Saint-Paul-d'Abbotsford)	Juillet 96
Saint-Rémi—Hemmingford	22	0 (en négociation)	Juillet 96
Valleyfield—Lacolle	50	0 (en négociation)	Juillet 96
Sainte-Martine—Beauharnois	9	9	Juillet 96
Rouyn—Taschereau (Le ministère de l'Environnement possède une partie de l'emprise, située dans le Parc d'Aigubelle entre les points milliaires 10.33 et 14.03.)	71	0 (en négociation)	Juillet 96
Huntingdon—Saint-Constant (Massena)	54	17,4	Juillet 96
Linton—La Tuque	57,6	0	Juillet 96
Triquet—Petite-Chute (Cran)	14	0	Juillet 96
Antenne Natagan—Barraute	8,4	0	Juillet 96
Pointe-aux-Trembles—Saint-Basile-sud (Dombourg)	16	0	Juillet 96
Total	613	256,8	

CONCLUSION

L'engagement de l'État québécois à maintenir les emprises ferroviaires abandonnées dans le domaine public a contribué grandement ces dernières années au développement des réseaux cyclables, notamment de la Route verte, qui est devenue l'itinéraire cyclable national du Québec. L'aménagement de ces réseaux a contribué à développer la pratique de l'activité physique, en particulier du vélo, et a accru l'attrait touristique du Québec auprès des amateurs de plein air. Les retombées économiques de la reconversion des emprises abandonnées en parcs linéaires ont été significatives dans de nombreuses régions où on

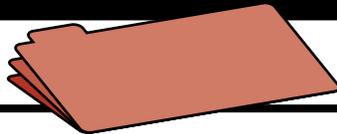
en a fait l'expérience. Les emprises acquises par le gouvernement pourront éventuellement être réutilisées pour le transport ferroviaire. La cohabitation des trains et des cyclistes est même possible : elle se pratique déjà à divers endroits au Québec.

Tableau 3

CORRIDOR FERROVIAIRE	LONGUEUR EN KILOMÈTRES	PISTE MULTIFONCTIONNELLE EN EXPLOITATION OU EN CONSTRUCTION EN KILOMÈTRES	PRISE DE POSSESSION
CORRIDOR DU CN			
Québec-Shannon	24	24	Mai 1999
Harlaka—Saint-Romuald (L'acquisition de cette emprise excluait la parcelle de l'ordre de 218 mètres qui est située dans le secteur de la côte Patton et de la rue Baron)	12,5	12,5	Mai 1999
Saint-Eustache—Mirabel	15,1	0	Février 2001
CORRIDOR DU CP			
Témiscamingue—Angliers (Le ministère des Ressources naturelles possède 11,9 km, qui sont situés entre Témiscamingue et Kipawa, soit entre les points milliaires 40.5 et 47.9.)	134	28,1	Septembre 1997
Total	185,6x	64,6x	

Note : Cet article sera également publié dans le bulletin d'information ferroviaire TRAQ.

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements à MM. Marc Panneton, urbaniste au Service des technologies d'exploitation, et Richard Garneau, ing. au Secrétariat au loisir et au sport, qui ont accepté de commenter la version provisoire de cet article.



OUTIL PERMETTANT D'ANALYSER LA STABILITÉ DES VÉHICULES LOURDS

par Mario Bussières, Service de la normalisation technique, ministère des Transports du Québec,
en collaboration avec M. Boumédiène Falah de l'Université du Québec à Rimouski

INTRODUCTION

L'une des responsabilités de la Direction du transport routier des marchandises (DTRM) du ministère des Transports du Québec est d'élaborer, d'évaluer et de réviser les lois, les règlements et les normes techniques du transport routier des marchandises, notamment ceux qui touchent les charges et les dimensions des véhicules lourds. La réglementation sur les normes de charges et de dimensions définit les caractéristiques des véhicules routiers et des ensembles de véhicules routiers. Pour pouvoir déterminer quels sont les changements à apporter pour améliorer la sécurité sur les routes et protéger les infrastructures, la DTRM doit également réaliser des recherches, de la veille et du transfert technologique dans le domaine du transport routier des marchandises.

Le Service de la normalisation technique de la DTRM est le maître d'œuvre de la révision du Règlement sur les normes de charges et dimensions. À ce titre, il doit entre autres analyser les demandes des transporteurs, associations de camionneurs et fabricants de véhicules qui souhaitent voir apporter des modifications aux véhicules afin d'optimiser les activités de transport. Ces modifications peuvent avoir une incidence directe sur la stabilité du véhicule et par conséquent, sur la sécurité des usagers de la route.

Auparavant, les responsables de l'évaluation des modifications devaient procéder à des essais sur piste afin de déterminer le niveau de stabilité

dynamique des nouveaux types de véhicules. Ces essais s'avèrent nécessaires pour pouvoir établir des normes permettant d'assurer à la fois l'efficacité du transport par camions lourds et un niveau de sécurité optimal. Ces essais nécessitent cependant beaucoup de temps pour la préparation et l'exécution des tests en plus d'être très coûteux.

Le Service de la normalisation technique a donc entrepris, au courant de l'année 1996, une recherche sur l'utilisation des nouvelles technologies pour analyser plus rapidement et à moindre coût la stabilité des véhicules lourds. Ces nouvelles technologies (logiciels, ordinateurs puissants) ont permis de concevoir et de mettre au point des modèles mathématiques qui traduisent le comportement dynamique des véhicules lourds. Il y a quelques décennies seulement, à cause de la capacité limitée des ordinateurs, les équations de mouvement d'un véhicule étaient limitées à 2 degrés de liberté. Actuellement, un simple modèle de véhicule à quatre roues peut facilement atteindre une vingtaine de degrés. Cette augmentation liée à la qualité du modèle ne pourrait pas être atteinte sans les ordinateurs plus performants d'aujourd'hui et des algorithmes de résolution d'équations de plus en plus adaptés à la complexité des modèles.

Conscient de l'importance de ces outils, le ministère des Transports (MTQ) a confié à Boumédiène Falah, professeur à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), la conception d'un logiciel destiné à la simulation du comportement

dynamique des configurations de véhicules lourds, dont le MTQ a la responsabilité en ce qui a trait aux normes et à la sécurité. Ce logiciel permet d'analyser différentes configurations de véhicules articulés soumises à des manœuvres d'accélération, de freinage et de braquage.

La stabilité des véhicules lourds est fonction de plusieurs facteurs, notamment le type et la disposition du chargement, le centre de masse, l'amplitude de roulis, et particulièrement les forces et moments générés par les pneus. Ainsi, le paramètre de stabilité joue un rôle essentiel dans la conception d'un véhicule lourd. L'optimisation d'une configuration de véhicule ou d'un ensemble de véhicules est donc une opération complexe qui nécessite des outils d'analyse et de simulation très sophistiqués. D'une manière générale, ces outils doivent permettre d'évaluer l'effet d'un nouveau design sur le comportement du véhicule, de s'assurer que le véhicule n'aura pas de comportements « imprévisibles » et de déterminer les causes des accidents (reconstruction d'accident)

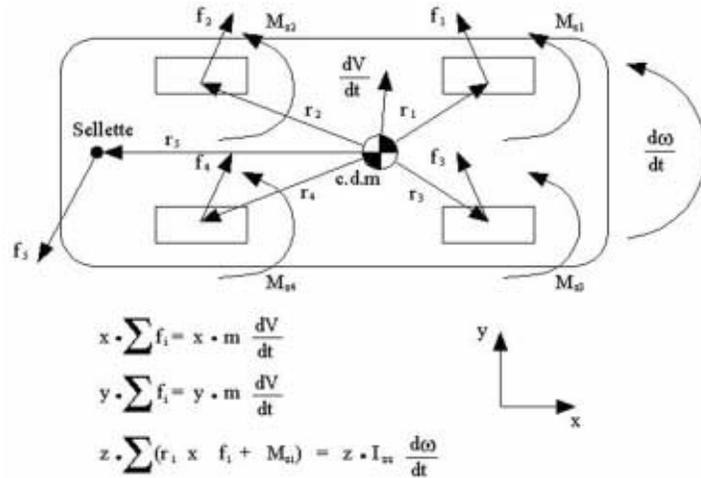
Dans la première partie, cet article décrit, les grandes lignes de la conception des modèles mathématiques relatifs aux configurations étudiées. La seconde partie est consacrée à la description des critères d'évaluation des performances du véhicule. Enfin, la troisième partie présente quelques résultats d'une analyse comparative portant sur le comportement dynamique de deux configurations de véhicules.

MODÈLE MATHÉMATIQUE D'UN VÉHICULE LOURD

Les modèles mathématiques décrivant les différents sous-ensembles (suspensions, essieux, pneus, systèmes de direction, etc.) sont détaillés et permettent de reproduire le plus fidèlement possible le comportement général du véhicule. Le logiciel est pourvu d'un contrôleur de direction permettant de simuler les manœuvres du chauffeur et d'analyser le comportement du véhicule soumis à une trajectoire donnée (changement de voie, détermination du diagramme de sous-virage, etc.). Par ailleurs, les algorithmes introduits dans ce logiciel permettent de produire des simulations presque en temps réel. Le logiciel permet également d'afficher un nombre important de variables de sortie. Ces variables de sortie permettent de caractériser le comportement dynamique du véhicule lorsque celui-ci est soumis à une manœuvre donnée.

Les grandes lignes des modèles mathématiques liés aux configurations analysées sont décrites ci-dessous. L'objet du modèle mathématique est de prévoir, à la suite d'une manœuvre de direction ou d'une opération de freinage, le comportement dynamique du véhicule selon les trois axes de mouvement (roulis, lacet et tangage). Le contrôle directionnel et la résistance au renversement du véhicule constituent les préoccupations majeures dans le comportement en dynamique d'un véhicule lourd. La stabilité et le contrôle directionnel impliquent principalement la dynamique du véhicule dans le plan du lacet (yaw plane), alors que le seuil de renversement est associé au plan de roulis (roll plane). La figure 1 montre les efforts auxquels est soumis le véhicule dans le plan de lacet. Le mouvement du véhicule est gouverné tout simplement par les trois équations, issues de la loi de la dynamique, projetées sur les axes x (roulis) et y (tangage) du véhicule. Ces équations sont représentées à la figure 1. L'efficacité du modèle se mesure à sa capacité à prédire avec la précision nécessaire les forces appliquées sur la sellette d'attelage, les

Figure 1 : Forces appliquées au véhicule dans le plan de lacet



efforts de cisaillement (forces latérales) et les moments d'alignement. Le mouvement dans le plan du lacet est aussi influencé par les mouvements du véhicule provenant des plans de roulis et de tangage. Ces mouvements modifient la réponse du véhicule, notamment durant le régime transitoire.

La figure 2 montre les efforts qui agissent, dans le plan de roulis, sur un véhicule exécutant un virage à gauche. Les efforts extérieurs appliqués au véhicule proviennent de l'interface pneus-chaussée et des efforts d'attelage dus aux unités des véhicules tractés. La stabilité du véhicule est conditionnée par la première équation

qui traduit l'équilibre des moments des forces par rapport au centre de masse du véhicule. Lorsque les roues quittent le sol, les forces verticales deviennent nulles sur un côté de l'essieu. Lorsqu'il y a un nombre critique de décolllements des roues du sol, le véhicule approche son seuil de renversement et l'équilibre statique est sur le point d'être rompu. Ainsi, les efforts verticaux sur les roues et leur point d'application par rapport au centre de masse qui se déplace jouent un rôle déterminant sur la stabilité en roulis du véhicule.

Figure 2: Forces dans le plan de roulis

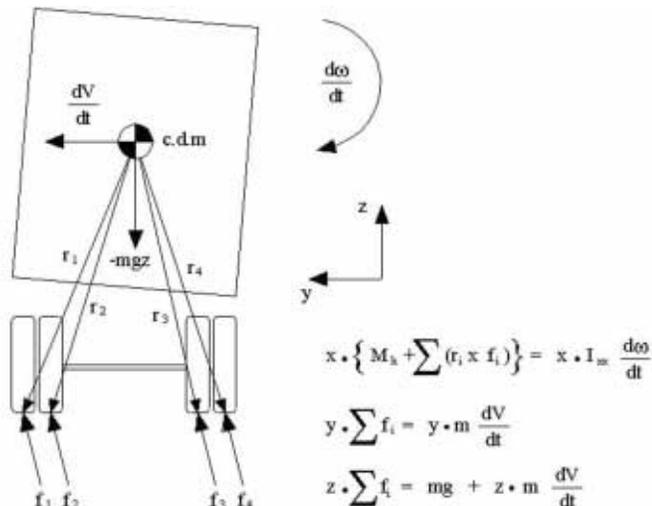


Figure 3 : Relation force-déflexion des ressorts à lames

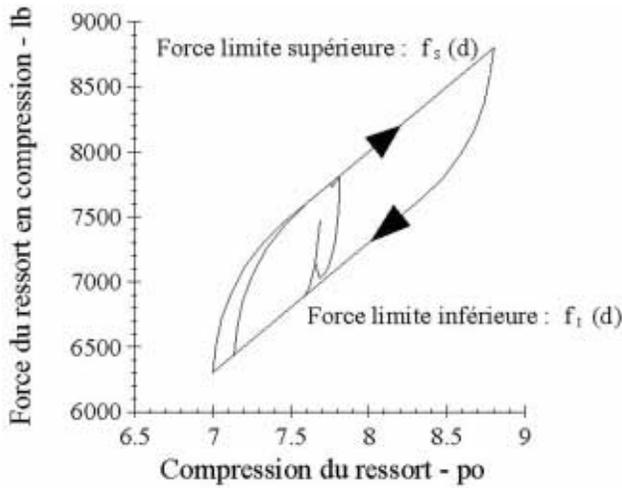


Figure 4 : Modèle du système de direction

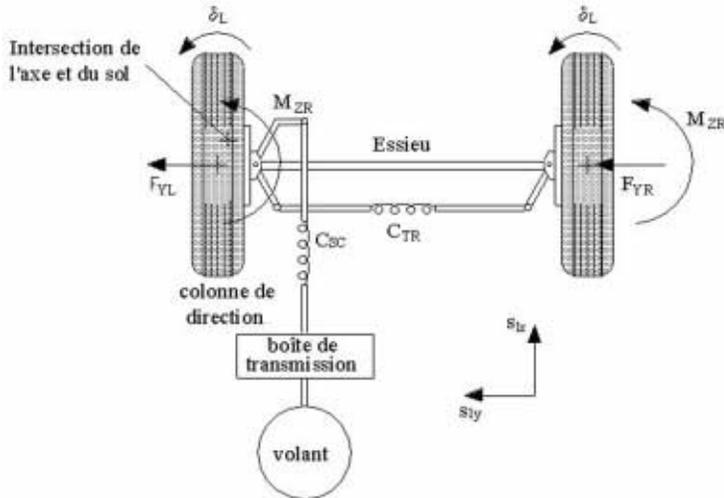
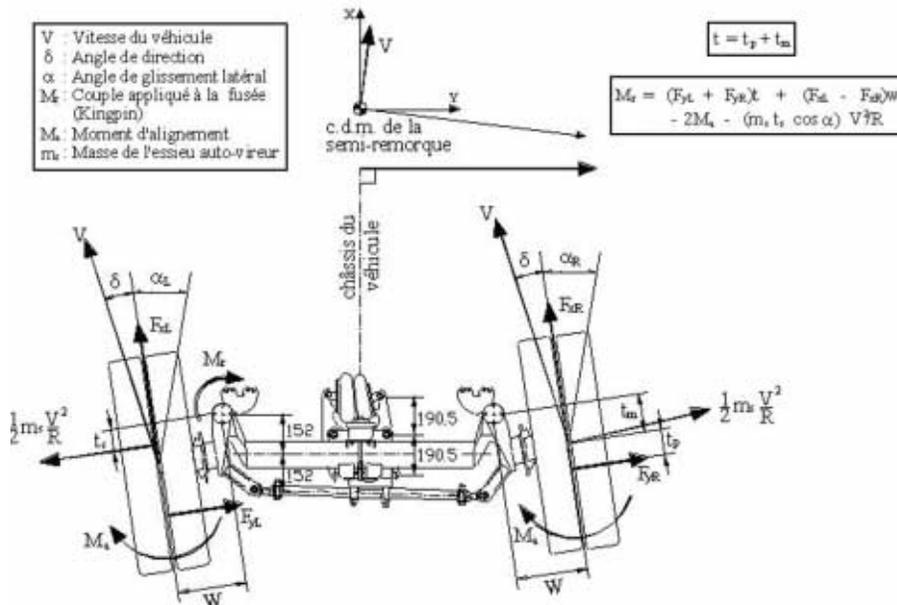


Figure 5 : Essieu auto-vireur



La figure 3 montre le modèle des ressorts à lames utilisé pour construire le modèle des suspensions. Ce modèle est composé de deux enveloppes traduisant la force en fonction de la compression des lames, qui permettent aussi de reproduire le phénomène d'hystérésis, caractéristique aux suspensions à lames utilisées dans les véhicules lourds.

La figure 4 montre le modèle du système de direction qui a été adopté dans cette étude. Le modèle sert principalement à déterminer l'angle disponible aux roues lorsque le chauffeur impose au volant une rotation donnée. On note que les angles aux roues ne sont pas seulement fonction de l'angle du volant, mais aussi des déformations du système de direction engendrées par les efforts provenant de l'essieu directeur.

Un essieu auto-vireur est aussi modélisé. La figure 5 montre un essieu auto-vireur soumis à des forces latérales qui lorsqu'elles atteignent un certain niveau d'amplitude arrivent à vaincre le ressort à air et induisent une rotation du pivot de la fusée (Kingpin). Les équations d'équilibre régissant le comportement de l'essieu auto-vireur sont aussi présentées à la figure 5. Le phénomène d'hystérésis présent dans un essieu auto-vireur est modélisé en utilisant l'approche des enveloppes inférieures et supérieures déjà adoptées dans le cas des suspensions à lames. Enfin, le modèle mathématique tient compte aussi des essieux solides, de la sellette d'attelage, des pneus, des freins et de leurs nombreuses caractéristiques cinématiques et dimensionnelles.

Depuis 1996, des études ont été effectuées sur la réalisation de modèles mathématiques et aussi sur la validation de ces modèles, parmi celles-ci figure une étude intitulée *Évaluation de l'efficacité de freinage de véhicules lourds en fonction des paramètres de charge, de vitesse et d'échauffement des freins*. Cette étude a entre autres permis d'analyser, grâce à l'installation d'une caméra infrarouge sur un véhicule, le comportement en temps réel d'un système de

Figure 6 : Position de la caméra sur le véhicule

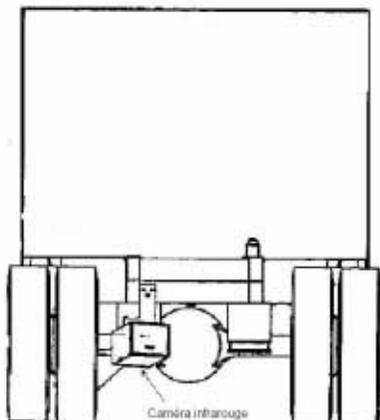
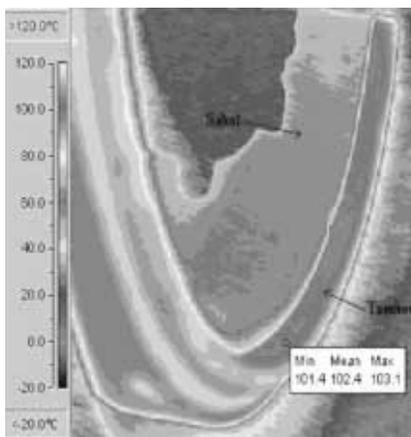


Figure 7 : Angle de vue de la caméra infrarouge



Figure 8 : Image infrarouge du tambour



freinage de véhicules lourds. Les résultats obtenus par modélisation mathématique ont pu par la suite être comparés aux résultats recueillis lors de ces essais. Les figures 6, 7 et 8 présentent un des montages expérimental ayant permis d'observer en temps réel la fluctuation de température d'un système de freinage de véhicules lourds.

INDICES DE PERFORMANCES

Les indices de performances qui ont été retenus en vue de l'évaluation des différentes combinaisons des véhicules lourds analysés sont décrits ci-dessous d'une manière succincte. À chaque indice, nous avons associé la valeur recommandée par l'ATC (Association des transports du Canada). Ces valeurs ne sont données ici qu'à titre indicatif. Les modèles mis au point permettent aisément d'optimiser la conception d'un véhicule donné en fournissant au logiciel les caractéristiques exactes de la configuration à analyser. Le logiciel, dans sa version actuelle, permet d'évaluer chacun de ces indices de performances.

SEUIL DE RENVERSEMENT STATIQUE (STATIC ROLLOVER THRESHOLD)

Le seuil de renversement est défini comme étant la valeur limite de l'accélération latérale (exprimée en g), au-delà de laquelle le véhicule perd son équilibre statique et se renverse dans un tournant à vitesse constante. Cet indice, mesuré en régime permanent, est obtenu en imposant au véhicule une vitesse de 100 km/h et une entrée de type rampe au système de direction dont la pente progresse de 2.0 degrés de rotation du volant par seconde. Cette faible variation de l'angle du volant permet d'imposer une manœuvre sans perturbation transitoire, tout en balayant en une seule simulation l'intervalle des accélérations latérales jusqu'au seuil de renversement.

Recommandation selon ATC : >0.4g.

STABILITÉ EN LACET (STEADY-STATE YAW STABILITY)

La stabilité en lacet est définie comme étant la valeur du coefficient de sous-virage (understeer gradient), exprimé en degré/g, obtenu à une valeur arbitraire de l'accélération latérale de 0.25g. L'évaluation de cet indice est obtenue en déterminant l'inverse de la pente locale du diagramme de manœuvre correspondant à une accélération latérale de 0.25g. La variation de l'accélération latérale est réalisée en imposant comme entrée au volant de direction une rampe identique à celle décrite pour le critère précédent. Durant l'exécution de cette rampe, la vitesse du véhicule demeure constante et égale, à 100 km/h. La valeur de l'indice calculé est comparée à celle du coefficient de sous-virage critique $K_{critique}$. Ce dernier est atteint lorsque le véhicule devient instable en lacet.

Critère de passage : $K > K_{critique}$

$$K_{critique} = - \frac{Lg}{V^2}$$

L: Empattement du tracteur.

V: Vitesse du véhicule (100 km/h)

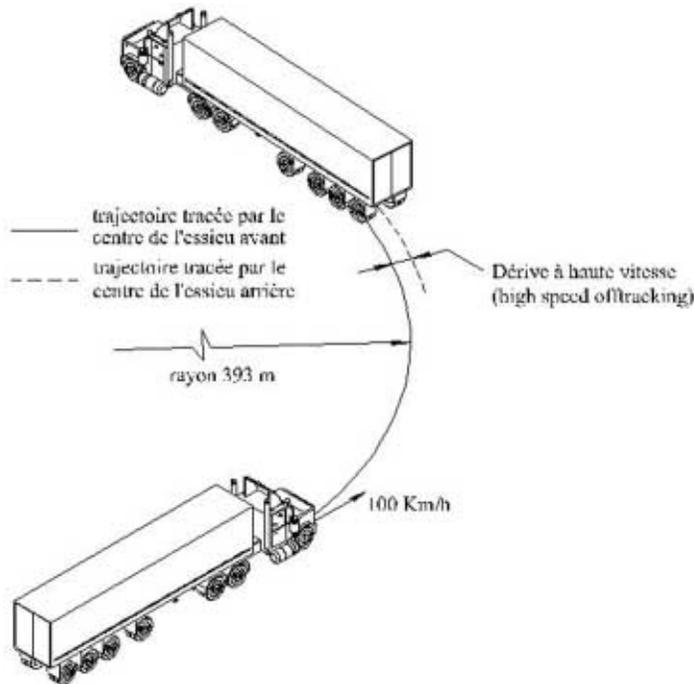
g: Accélération de la pesanteur (9.81 m/s²)

DÉRIVE À HAUTE VITESSE (HIGH-SPEED OFFTRACKING)

La dérive à haute vitesse est définie comme étant la distance de débordement de la trajectoire du dernier essieu de la combinaison de véhicules par rapport à celle du premier essieu (figure 9). La mesure est réalisée pour un véhicule roulant à une vitesse de 100 km/h et engagé dans un virage à rayon constant de 393 m, générant ainsi une accélération latérale constante de 0.2 g.

Recommandation selon ATC : ≤0.46 m.

Figure 9 : Dérive à haute vitesse



STABILITÉ DYNAMIQUE EN ROULIS (DYNAMIC ROLLOVER STABILITY)

La stabilité dynamique en roulis est estimée en évaluant séparément le seuil de renversement de chacune des portions de la combinaison, indépendantes en roulis les unes des autres. Par portion indépendante, on entend un ensemble d'unités de la combinaison dont le mouvement en roulis est indépendant de toutes les autres unités de la combinaison. L'indice de stabilité en roulis est exprimé par le rapport de transfert de charge (Load Transfert Ratio: LTR). Ce dernier est évalué par la formule ci-dessous :

$$LTR = \frac{|\sum F_{Li} - F_{Ri}|}{\sum (F_{Li} + F_{Ri})}$$

F_{Ri} : Force verticale agissant sur les roues gauches de l'essieu i

F_{Li} : Force verticale agissant sur les roues droites de l'essieu i

Ce rapport de transfert de charge vaut zéro lorsque le véhicule est au repos et atteint la valeur de un lorsque la charge d'un côté du véhicule est totalement transférée vers l'autre côté de l'unité. Cet indice de performance est évalué en imposant à la combinaison une

manœuvre d'évitement d'obstacle (changement rapide de voie) qui génère une accélération sinusoïdale au centre de masse du tracteur ayant une amplitude de 0.15g. La période de la manœuvre sinusoïdale est de deux secondes. La vitesse du véhicule est de 100 km/h.

Recommandation selon ATC pour LTR : <0.60.

DÉRIVE EN RÉGIME TRANSITOIRE (TRANSIENT HIGH-SPEED OFFTRACKING)

La dérive en régime transitoire est mesurée durant une manœuvre d'évitement d'obstacles telle que décrite pour l'indice de stabilité dynamique en roulis. Cette dérive, exprimée en unité de distance, est définie comme étant le débordement maximum du dernier essieu de la combinaison par rapport à la trajectoire finale du premier essieu. Cet indice permet d'évaluer l'éventualité que l'arrière de la combinaison puisse accomplir une incursion dans une voie adjacente de la circulation durant une manœuvre d'évitement d'obstacle.

Recommandation selon ATC: ≤0.80 m.

FREINAGE EN LIGNE DROITE (STRAIGHT LINE BRAKING)

Cet indice est associé à la distance de freinage atteinte par le véhicule lorsque ses vitesses initiale et finale sont respectivement de 100 km/h et zéro. La pression de freinage utilisée est de 40 psi.

Recommandation selon ATC pour efficacité de freinage : >0.7g.

FREINAGE EN VIRAGE (BRAKING IN TURN)

Cet indice concerne seulement les véhicules équipés d'un essieu auto-vireur. Il est mesuré lorsque le véhicule est animé d'une vitesse de 64 km/h et engagé dans une courbe de 200 m de rayon. Les freins sont alors appliqués jusqu'au blocage de la roue la moins chargée. La réponse de l'unité équipée d'un essieu auto-vireur est examinée en mouvement de lacet, pour détecter toute anomalie susceptible d'être en relation avec le fonctionnement de l'essieu auto-vireur.

DÉRIVE À BASSE VITESSE (LOW-SPEED OFFTRACKING)

La dérive à basse vitesse est la distance maximale entre les trajectoires du premier et du dernier essieu de la combinaison durant une manœuvre de virage à 90 degrés à droite, dont le rayon est de 9,8 mètres (figure 10). La vitesse du véhicule est limitée à 8,25 km/h.

Recommandation selon ATC : ≤6.00 m.

VIRAGE SERRÉ (TIGHT-TURN JACKKNIFE)

Cet indice permet d'évaluer la friction minimale μ_{peak} entre les pneus et la chaussée nécessaire pour éviter une mise en portefeuille (Jackknife). La vitesse et la trajectoire sont similaires à celles qui sont associées à la dérive à basse vitesse. La demande en friction exprime la

résistance qu'éprouve le véhicule dans un virage serré. La demande en friction est estimée par la formule ci-dessous:

$$1 \mu_{\text{peak}} = \left(\frac{\sum F_Y}{\cos(\Gamma)} \right) / \sum F_Z$$

tandem-moteur tandem-moteur

F_Y : Force latérale sur les essieux du tandem moteur

F_Z : Force verticale agissant sur les essieux du tandem moteur

Γ : Angle de l'articulation entre le tracteur et la semi-remorque

Recommandation selon ATC pour la demande en friction : <0.1

ÉTUDE EFFECTUÉE À L'AIDE DU LOGICIEL D'ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES VÉHICULES LOURDS

Différentes études ont porté sur l'évaluation du comportement dynamique de véhicules lourds. Parmi celles-ci figure l'étude intitulée *Évaluation par simulation informatique du comportement dynamique de certains ensembles de véhicules permettant d'établir leurs niveaux de sécurité*, de B. Falah et M. Tennich. Cette étude avait pour objet de comparer le comportement dynamique de trois configurations proposées par l'industrie avec celui des configurations permises par la réglementation actuelle. Pour les fins du présent article, les résultats d'une partie de cette étude, soit l'évaluation des véhicules transportant de la machinerie lourde, seront présentés.

La configuration de véhicules représentée à la figure 11a est destinée principalement au transport de pelles excavatrices et d'équipements lourds sur des chantiers et circulant en vertu d'un permis spécial de circulation. Ces chantiers ne sont pas toujours pourvus de l'espace nécessaire aux manœuvres exécutées par ces véhicules, dont la longueur totale est de plus de 25 mètres.

Par ailleurs, ces véhicules sont très souvent appelés à circuler sur des surfaces à faible coefficient de friction, ce qui compromet leur capacité tractive. L'industrie souhaite utiliser la présente configuration en ajoutant un essieu à l'essieu tandem afin d'éliminer le diablo. Cette nouvelle configuration est représentée à la figure 11b.

Une analyse comparative du comportement dynamique des deux configurations s'est donc avérée nécessaire pour pouvoir se prononcer sur l'acceptabilité de cette éventuelle configuration.

Figure 10 : Dérive à basse vitesse

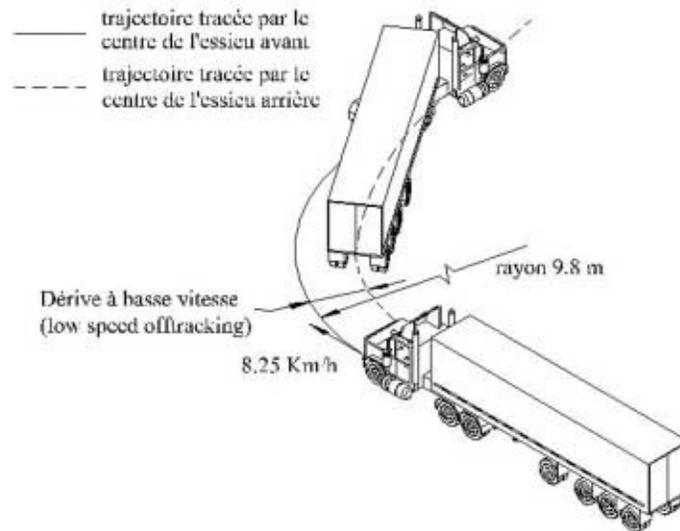


Figure 11.a : Configuration autorisée par permis spécial, combinaison T3A_D2A_Tr3A

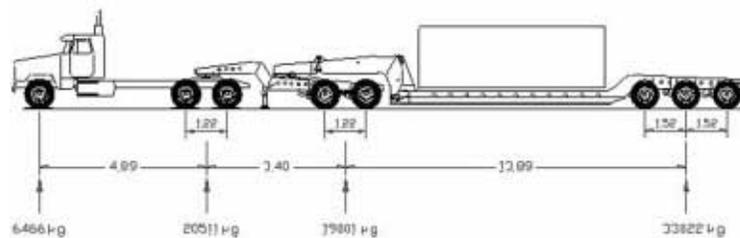
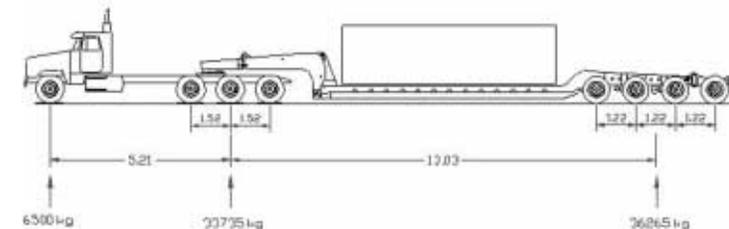


Figure 11.b : Nouvelle configuration proposée, combinaison T4A_Tr4A



1 Le signe μ_{peak} est lié au signe des forces latérales F_Y . Dans ce rapport, μ_{peak} est fourni avec le signe F_Y . Une nouvelle version des modèles mathématiques associée à cette étude fournit μ_{peak} en valeur absolue.

LA STABILITÉ DYNAMIQUE EN ROULIS

La figure 12a présente les accélérations latérales au centre de masse des tracteurs des deux combinaisons T3A_D2A_Tr3A et T4A_Tr4A durant une manœuvre rapide d'évitement d'obstacle. On peut observer que les deux tracteurs sont soumis au même niveau d'accélération latérale sinusoïdale de 0.15 g. La figure 12b montre que les deux combinaisons ont le même taux de transfert de charge ce qui signifie que, en roulis, les deux configurations se valent.

LE VIRAGE SERRÉ

La figure (12c) donne la valeur de μ_{peak} , friction minimale pour éviter une mise en portefeuille. La configuration T4A_Tr4A présente

un μ_{peak} légèrement plus faible que celui de la T3A_D2A_Tr3A. Cependant, la combinaison T4A_Tr4A ne réussit pas à effectuer avec succès le trajet imposé par le contrôleur. Il est donc imprudent de comparer les deux valeurs de demande en friction. La figure 12d permet par contre de comparer la demande en friction de la configuration T4A_Tr4A à vide et sous charge. À vide, la demande en friction devient plus importante et dépasse légèrement la valeur de 0.1. Il importe de noter au passage que, à part la demande en friction, le comportement de cette configuration à vide ne présente aucune caractéristique particulière.

RÉSULTATS

Les indices de performances utilisés pour l'évaluation du comportement dynamique de ces deux combinaisons montrent que la T4A_Tr4A a des performances égales, et parfois même légèrement supérieures à la T3A_D2A_Tr3A. La nouvelle combinaison montre une faiblesse dans l'exécution du virage serré de 9.8 m. À vide, le véhicule exécute convenablement le rayon de 9,8 m, mais a une demande en friction légèrement au dessus 0.1. La demande limite en friction recommandée par la ATC doit être inférieure à 0.1. Une attention particulière doit donc être apportée à la performance du véhicule proposé en ce qui a trait à ses performances dans les virages serrés. Le Ministère évalue s'il y a lieu de reconnaître cette configuration de véhicules dans le Règlement sur le permis spécial de circulation.

Figure 12a : Accélération latérale au centre de masse du tracteur

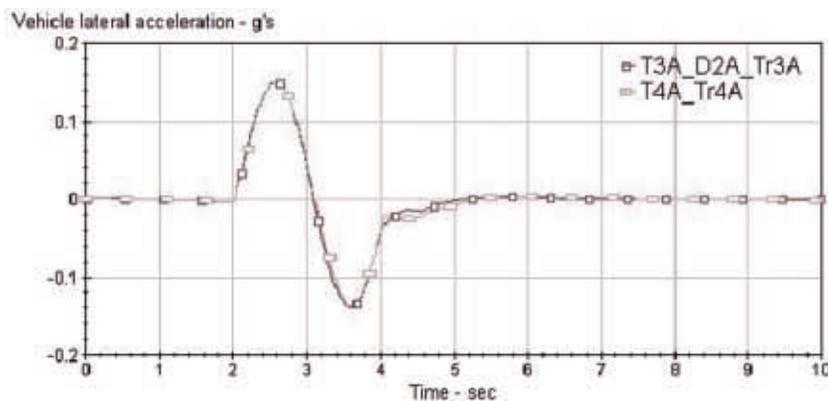
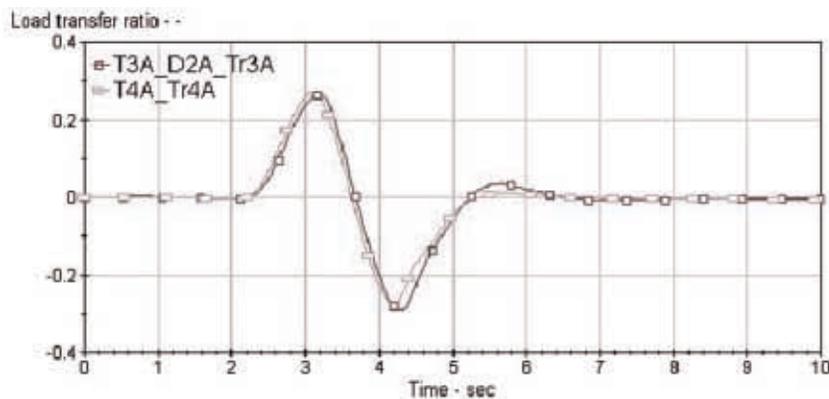


Figure 12b : Taux de transfert



CONCLUSION

Au cours des dernières années, plusieurs études sur la stabilité dynamique des véhicules ont été réalisées à l'aide du logiciel de simulation du comportement dynamique de véhicules. Ces études ont permis au Service de la normalisation technique de donner des orientations à certains dossiers et ainsi apporter des modifications réglementaires permettant d'améliorer la sécurité des usagers de la route. Parmi ces études, figurent l'analyse sur la stabilité dynamique des dépanneuses [6-7], l'analyse sur la stabilité dynamique de différents types de véhicules [8], l'analyse du comportement d'un système de freinage de véhicules lourds [4-5], l'analyse du comportement de la traction des véhicules lourds [1-2-3] et l'analyse géométrique [9].

Bien que ce logiciel permette déjà de répondre à plusieurs des besoins du Service de la normalisation technique, des améliorations y seront apportées afin qu'il puisse produire des simulations encore plus représentatives de la réalité. Un projet portant sur l'amélioration de ce logiciel est présentement en cours. Il permettra, entre

Figure 12c : Virage serré à 9.8 m (Tight-Turn Jackknife)

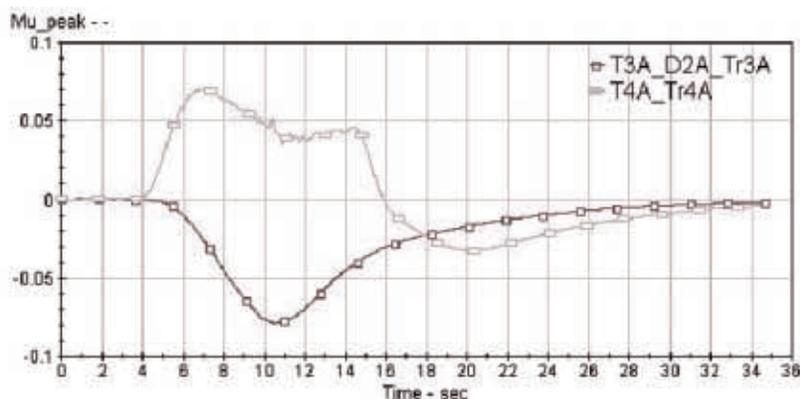
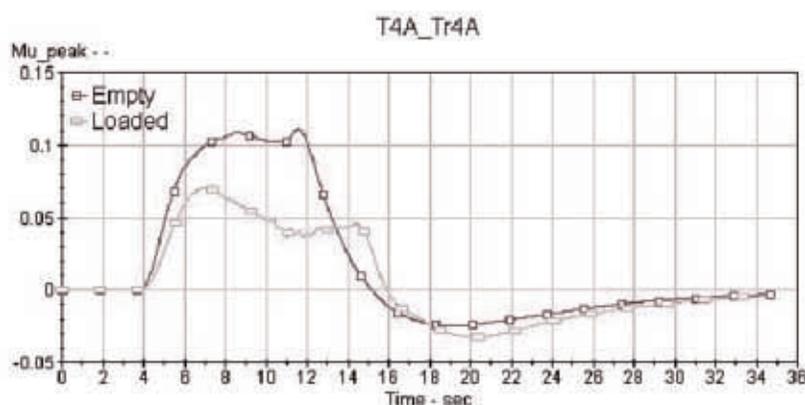


Figure 12d : Comparaisons des demandes en friction à vide et sous charge



autres, de poursuivre la modélisation des véhicules lourds, en raffinant davantage les modèles et en validant expérimentalement les modèles mathématiques élaborés.

RÉFÉRENCES

1. Falah, B., Montambault, S. et Routhier, F. *Évaluation de différents types de systèmes de traction pour camions tracteurs*, Rapport final, Université du Québec à Rimouski, mai 1997.
2. Falah, B., D'amours, G. et Dodier, C. *Effet sur l'efficacité de la capacité tractive d'un camion en fonction de la diminution de la charge sur le tandem*, Rapport final, Université du Québec à Rimouski, mai 1998.
3. Falah, B. et Tennich, M. *Évaluation de l'efficacité de la capacité tractive des véhicules lourds circulant en forêt*, Rapport final, Université du Québec à Rimouski, mars 2000.
4. Falah, B. et Tennich, M. *Simulation du comportement en freinage de véhicules lourds en tenant compte du réchauffement des freins*, Rapport technique, Université du Québec à Rimouski, mars 2000.
5. Falah, B., Boucher, B. et D'Amours, G. *Évaluation de l'efficacité de freinage de véhicule lourds en fonction des paramètres de charge, de vitesse et d'échauffement des freins*, Rapport final, Université du Québec à Rimouski, octobre 1999.
6. Falah, B. et Tennich, M. *Simulation du comportement sous charges statiques et dynamiques de véhicules dépanneuses*, Rapport technique, Predimetrics, avril 1999.
7. Falah, B., *Optimisation d'une dépanneuse à 10 roues*, Rapport technique, Mechasim inc., août 1999.
8. Falah, B. et Tennich, M. *Évaluation par simulation informatique du comportement dynamique de certains ensembles de véhicules permettant d'établir leurs niveaux de sécurité*, Rapport final, Mechasim inc., mars 2000.
9. Falah, B. *Étude portant sur l'évaluation géométrique par simulations informatiques de la manœuvrabilité des remorques extensibles*, Rapport final, Mechasim inc., mars 2001.



MODÈLES DE PERFORMANCE DES CHAUSSÉES

P. Lepert, M. Rêche et A. Riouall, Laboratoire central des ponts et chaussées, France

Y. Savard, N. Pouliot, D. Leroux, Direction du laboratoire des chaussées, ministère des transports du Québec

INTRODUCTION

Pour optimiser l'emploi des crédits d'entretien des routes, c'est-à-dire obtenir les meilleurs résultats en fait de qualité d'usage et de préservation du patrimoine routier, avec un budget donné, il est indispensable que le gestionnaire situe son analyse sur le moyen ou le long terme. Cela implique qu'on soit capable de modéliser le comportement des chaussées sur des périodes de plusieurs années, pour pouvoir prédire leur évolution en tenant compte de leurs caractéristiques intrinsèques initiales et des sollicitations qu'elles devront supporter. L'étude des modèles de comportement des chaussées constitue donc un volet essentiel de la conception des systèmes d'aide à la gestion des chaussées, dont les gestionnaires routiers à travers le monde commencent à se doter.

UNE COLLABORATION ENTRE LE MTQ ET LE LCPC

Pour concevoir ces modèles, la Direction du laboratoire des chaussées (DLC) du ministère des Transports du Québec (MTQ) a mis sur pied un programme rigoureux de sections. Le nombre de sections suivies, environ 400, est limité, en revanche de nombreuses informations caractérisent chacune d'entre elles. Le MTQ s'interrogeait sur les méthodes à utiliser pour exploiter et valoriser au mieux ces informations, avec le double objectif d'établir les modèles de comportement de ses chaussées et de raffiner les procédures de collecte des données pour son système de gestion des chaussées.

De son côté, en France, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a entrepris d'appliquer des outils statistiques, tels que la théorie des lois de survie, aux données recueillies lors

d'auscultations systématiques de son réseau national (IQRN). La base IQRN rassemble un grand nombre d'observations des dégradations de sections, mais il est rare qu'elle contienne des informations sur les caractéristiques intrinsèques (portance du sol, composition des matériaux, rigidité initiale des couches, etc.) qui conditionnent l'évolution de ces dégradations. Pour cette raison, passée une première étape de conception des méthodes d'analyse, leur amélioration a buté sur l'insuffisance des bases disponibles.

Ce double constat a conduit tout naturellement les deux organismes à coopérer : le MTQ apporte la qualité et la richesse de sa base de données routières, le LCPC participe au titre de l'expérience qu'il a acquise dans l'application d'outils de type « lois de survie ». Le MTQ souhaite tirer le meilleur parti des données qu'il a accumulées pour progresser vers les objectifs indiqués ci-dessus, le LCPC voit dans cette collaboration l'occasion d'améliorer les méthodes statistiques qu'il a conçues pour mettre au point des modèles de comportement qui seront ensuite appliqués au contexte français. La Commission permanente France - Québec apporte un soutien précieux au projet, en prenant en charge les frais des missions qui permettent à l'équipe québécoise et à l'équipe française de se rencontrer deux fois par an pour faire le point sur les travaux.

PROGRAMME DE TRAVAIL

En 2000 et 2001, les recherches ont porté sur le comportement des chaussées souples n'ayant reçu aucun entretien. Quelque 25 sections, suivies par le MTQ entre 2 et 8 ans, et dont l'âge varie entre 0 et 18 ans, répondaient à ces critères. Après avoir regroupé toutes les informa-

tions les caractérisant dans une base de données spécifique (2^e semestre 2000), le LCPC et le MTQ se sont livrés à une première analyse avec des outils statistiques assez simples (début du 1^{er} semestre 2001). La méthode statistique dite des « lois de survie », conçue au LCPC, a été appliquée dans un second temps (fin du 1^{er} semestre 2001) pour bâtir les modèles de performance de ces chaussées.

Fin 2001, la recherche s'orientera sur le comportement des chaussées souples ayant reçu un premier entretien, sous la forme d'un renouvellement de la couche de surface. La base de données spécifique sera constituée au cours du second semestre 2001, et les premières analyses réalisées immédiatement après. L'identification des modèles de comportement par la méthode des lois de survie sera effectuée entre novembre 2001 et février 2002. Le projet devrait donc aboutir au milieu de 2002.

PREMIERS RÉSULTATS

Dans un premier temps, la **qualité des données** contenues dans la base a été évaluée chaque fois que cela était possible.

- La répétabilité des données mécaniques mesurées avec le FWD (déflexion, notamment), comme celle des données sur l'uni longitudinal (IRI), s'avère très bonne, avec un coefficient de variation (rapport écart-type/moyenne) de l'ordre de 1 à 2 %.
- Faute de répétition des recueils, cette répétabilité n'est pas accessible sur les relevés de fissuration et les mesures d'orniérage ; en revanche, on dispose d'informations permettant d'apprécier la justesse de ces relevés et mesures. Les relevés de fissuration peuvent être considérés comme fiables car ils sont en

général exécutés par une même équipe, qui réalise une cartographie détaillée des dégradations et dispose des relevés antérieurs sur chaque section (hors le cas des sections du programme SHRP, peu nombreuses). Quant aux mesures d'orniérage réalisées à la poutre de 1,8 m, elles sont justes, comme l'ont démontré les comparaisons faites entre les mesures à la poutre et le Dipstick, système de référence précis au 1/10^e de millimètre. Par exemple, la différence obtenue entre les deux appareils sur la profondeur d'ornière en chaque point de mesure est de $\pm 0,9$ mm.

- La cohérence des données a également été considérée, en examinant l'évolution des paramètres en fonction du temps, sur chaque section. Dans l'ensemble, cet examen montre une progression régulière de la fissuration, de l'IRI, de l'orniérage et des paramètres

mécaniques, dès lors qu'on s'affranchit des variations saisonnières (figure 1).

- Ajoutons aussi que les variables caractérisant les sections retenues dans la base (indice de gel, trafic, déflexion, IRI) présentent une distribution assez large pour donner un sens aux analyses.
- Enfin, les sections s'avèrent effectivement homogènes, si on en juge par la régularité longitudinale des mesures de paramètres mécaniques ou d'orniérage.

Pour les **essais de portance mécanique** faits avec le **FWD** :

- On montre clairement que leurs variations temporelles résultent de la superposition d'évolutions saisonnières, très marquées, et

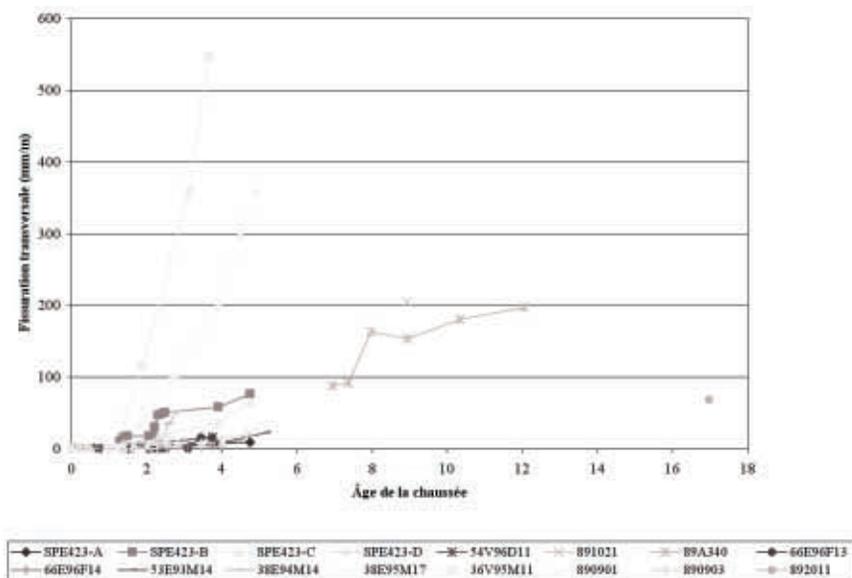
d'une évolution à long terme, régulière et plus faible. Ce constat conduit à considérer que les paramètres mécaniques qui caractérisent le mieux les propriétés « intrinsèques » de la section, et doivent donc être considérés comme variables explicatives de l'évolution des autres variables d'état, sont les valeurs initiales débarrassées de leur composante saisonnière. On a retenu les premières valeurs mesurées en période estivale (entre le 1^{er} juin et le 31 octobre).

- Le FWD fournit un nombre important de paramètres mécaniques de la chaussée. Certains de ces paramètres ne sont pas indépendants, et il n'est donc pas nécessaire, ni souhaitable, de les retenir tous dans les analyses ultérieures. Après avoir examiné les corrélations entre ces paramètres, on trouve que trois paramètres suffisent à caractériser le comportement mécanique des chaussées, par exemple : la déflexion, le nombre structural total du corps de la chaussée et le module de résilience du sol. Cette analyse, effectuée avec des moyens statistiques sommaires, suggère d'approfondir les relations entre les variables pour diminuer le nombre de variables explicatives, par exemple par des Analyses en Composantes Principales Normées (ACP-N).

- En regardant également les corrélations entre les paramètres de dimensionnement des chaussées (issues de la modélisation) et ceux issus de l'essai FWD, on constate que ces deux groupes de paramètres sont très corrélés sur les chaussées ayant fait l'objet d'un dimensionnement par la méthode du MTQ, alors qu'il n'y a pas de corrélation avec les autres sections.

- De même, on observe que, si la rigidité des chaussées varie dans le même sens que le trafic qu'elles supportent (ce qui est, bien entendu, tout à fait logique), la corrélation entre déflexion et trafic est meilleure sur les chaussées conçues à partir d'un calcul de

Figure 1 : Évolution de la fissuration transversale de retrait thermique en fonction de l'âge de la chaussée



dimensionnement que sur celles qui ne le sont pas. Ces constats laissent espérer que sur les chaussées dimensionnées on puisse réduire le nombre d'essais FWD nécessaire pour alimenter le système de gestion, en tirant un meilleur parti des valeurs de dimensionnement. Là aussi, l'analyse méritera d'être approfondie avec des outils plus puissants au cours des prochains mois.

- Finalement, on montre que les chaussées présentent une homogénéité transversale de leurs caractéristiques mécaniques qui autorise à considérer, pour les analyses ultérieures, que les mesures faites sur une voie sont applicables aux deux voies d'une même section.

En ce qui concerne les fissures de retrait thermique et de fatigue, les travaux permettent, au stade actuel, de montrer la cohérence des valeurs contenues dans la base de données. Ces valeurs sont mises en relation, dans les paragraphes suivants, avec le développement des défauts d'unis et de l'orniérage.

L'IRI a été mesuré sur toutes les sections, et souvent sur les différentes voies. À chaque fois, il est simultanément mesuré dans la trace de roue d'axe et de rive.

- La comparaison de ces deux valeurs conduit à la conclusion que l'IRI de rive est sensiblement égal à celui d'axe lorsque l'accotement de la section est revêtu, alors qu'il est un peu plus mauvais (+ 10 %) lorsque l'accotement

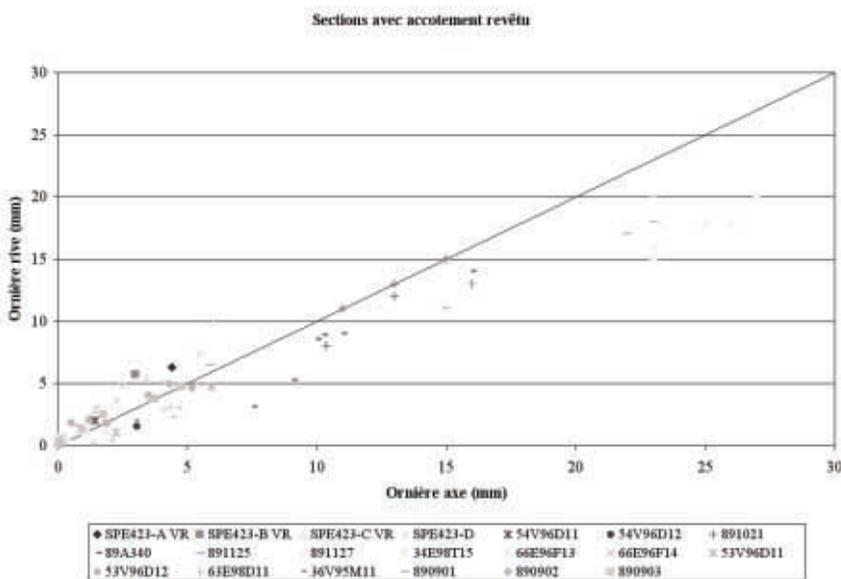
n'est pas ou n'est que partiellement revêtu.

- L'examen de l'évolution de l'IRI en fonction de l'âge et du niveau de fissuration de retrait conduit à des conclusions prudentes : IRI et niveau de fissuration de retrait progressent en fonction de l'âge, plus vite sur certaines sections que sur d'autres (les mêmes dans les deux cas).
- Par ailleurs, l'évolution de l'uni semble un peu conditionnée par le trafic, davantage d'ailleurs sur les sections fissurées que sur celles qui ne le sont pas.

En analysant les données **d'orniérage**, on arrive sensiblement aux mêmes conclusions, mais plus marquées.

- Indiscutablement, l'orniérage de rive progresse nettement plus vite que l'orniérage d'axe sur les sections dont l'accotement n'est pas revêtu (figures 2 et 3).
- De même, l'orniérage évolue systématiquement en fonction du temps, en même temps d'ailleurs que les phénomènes de fissuration de retrait et de fissuration de fatigue.
- Enfin, l'effet du trafic sur cet orniérage est indiscutable, et plus marqué sur les sections fissurées que sur celles qui ne le sont pas.

Figure 2: Relation entre ornière de rive et d'axe sur les chaussées dont l'accotement est revêtu

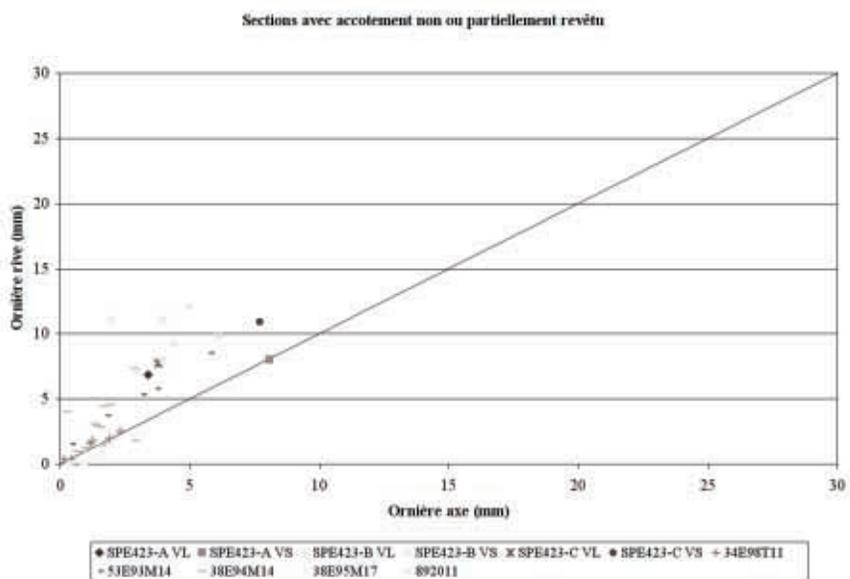


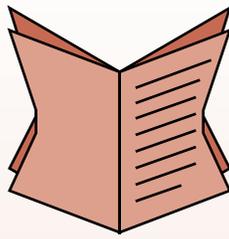
CONCLUSIONS (PROVISOIRES)

Ces premiers résultats montrent que la base de données rassemblée par le ministère des Transport du Québec contient potentiellement des informations riches sur le comportement des chaussées. Son exploitation par des méthodes de traitement de données très sommaires permet déjà de mettre en lumière un certain nombre de tendances encourageantes. On peut donc espérer que l'application d'outils statistiques plus sophistiqués, comme la théorie des lois de survie, permettra de déboucher sur des modèles exploitables à brève échéance.

La coopération entre le MTQ et le LCPC est donc bien engagée, sous l'égide de la Commission permanente France-Québec. Les premiers résultats, rapidement exposés dans cette note, seront détaillés, en même temps que les conclusions de l'étude de modélisation par application de la méthode des lois de survie, dans un article ultérieur.

Figure 3: Relation entre ornière de rive et d'axe sur les chaussées dont l'accotement est partiellement ou non revêtu





Le modèle prévisionnel de transport du fret et des individus du Québec (TRAFIQ)

Denis Bolduc, Département d'économie de l'Université Laval, et Richard Laferrière, Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal

Cette étude, réalisée par le Groupe de recherche en économie de l'énergie, de l'environnement et des ressources naturelles (GREEN), a permis de mettre au point des modèles économétriques en vue d'établir des prévisions de demandes de « transport de fret et des individus du Québec » (TRAFIQ), pour la période 1997-2015.

Transport du fret (volume 1)

Dans la première partie de l'étude, le modèle économétrique TRAFIQ a servi à expliquer les mouvements de fret, et ce, en considérant six corridors dont les mouvements de fret ont pour origine et destination le Québec, onze catégories de marchandises et deux moyens de transport, le camion et le chemin de fer. Il a servi également à établir, pour ces deux moyens de transport, les catégories et les corridors qui connaîtront, durant la période 1997-2015, les plus grandes augmentations du tonnage et les plus importants taux de croissance annuelle.

Transport des individus (volume 2)

Dans la deuxième partie de l'étude, le modèle TRAFIQ a permis de produire, pour le Québec, des prévisions de déplacement des personnes selon les quatre principaux moyens de transport interurbain, soit l'automobile, l'avion, l'autobus et le train. Ces prévisions, qui portent sur l'horizon 1997-2015, sont détaillées d'après le motif de déplacement, le type de déplacement pour le travail et les autres types de déplacements entre les 17 régions administratives du Québec.

Le modèle combine les données de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) sur le kilométrage effectué selon les régions et les données « origine-destination » par motifs de déplacement du projet de train à haute vitesse (THV) Québec-Windsor.

Finalement, pour chacune des régions du Québec, l'étude prévoit, sur une base annuelle, soit une croissance, soit une diminution plus ou moins importante des déplacements des personnes.

Systèmes de détection et d'évitement des collisions pour les véhicules lourds

Jacques Bergeron et Martin Paquette, Université de Montréal, et Louis-Paul Tardif, L-P Tardif & Associés

Le but de l'étude était d'évaluer l'impact sur la sécurité routière des systèmes de détection et d'évitement des collisions pour les véhicules lourds, de vérifier l'applicabilité de ces systèmes au Québec et de déterminer quelle place il faut faire à ces nouvelles technologies.

Les objectifs de l'étude étaient donc de dresser un portrait global des connaissances dans le domaine, d'analyser l'impact du déploiement de ces systèmes sur la sécurité routière, notamment par leur utilisation sur les véhicules lourds et les autobus scolaires, de proposer des recommandations et de dégager des propositions de mesures à prendre de la part du ministère des Transports du Québec et des autres acteurs dans le domaine.

Enfin, l'étude a permis d'établir quelles sont les situations particulières au Québec qui doivent être considérées dans le développement de ces systèmes, d'envisager la possibilité d'un impact notable sur le bilan routier au cours des prochaines années, de dégager des conclusions et de proposer des recommandations.

Suivi expérimental de sections des routes 55 (Richmond) et 116 (Dosquet)

Cédric Imbs et Guy Doré, Département de génie civil de l'Université Laval

Dans le cadre de deux projets de recherche sur les nouvelles techniques de construction routière, le ministère des Transports du Québec a retenu les services du Département de génie civil de l'Université Laval pour étudier le comportement thermique et hydrique des chaussées pendant les cycles de gel-dégel. Ces projets consistent à assurer un suivi de l'évolution de l'état de sections de routes de courte longueur (150 m) sur une période d'au moins cinq ans.

Réalisé sur l'autoroute 55, dans le canton de Melbourne, le premier projet évalue la performance d'un béton isolant pour combattre les effets du gel dans la chaussée. Le deuxième projet analyse l'efficacité de différentes techniques de drainage sur des sections de la chaussée de la route 116, à Dosquet.

Le rapport expose la méthodologie utilisée pour la pose de l'instrumentation et pour la construction du site d'essai. Il présente ensuite un résumé de la problématique du gel dans les chaussées et les résultats du suivi pour les saisons hivernales 1998-1999 et 1999-2000.

RE
S
E
R
C
H
E

Parutio

CONGRÈS CONFÉRENCES



Activité	Lieu et date	Organisation	Renseignements
American Public Transportation Association Annual Meeting	Du 30 septembre au 4 octobre 2001 (Philadelphie, Pennsylvanie)	American Public Transportation Association	Pam Boswell Tél. : (202) 496-4803 Internet : http://www.apta.com
43 rd TRF Annual Forum A time and space odyssey	Du 21 au 24 octobre 2001 Williamsburg, Virginie	Transportation Research Forum	Tél. : (202) 879-4701 Télec. : (202) 879-4719 Courriel : info@trfweb.org
67 th ATAC Annual General Meeting and Tradeshow	Du 4 au 6 novembre 2001 Toronto, Ontario	Air Transport Association of Canada	Tel: (613) 233-7727 Télec. : (613) 230-8648 Courriel : atac@atac.ca Internet : http://www.atac.ca
International Truck and Bus Safety Research and Policy Symposium	Du 7 au 9 novembre 2001 Knoxville, Tennessee	National Safety Council et University of Tennessee	Jenny Jones Tél. : (865) 974-5255 Télec. : (865) 974-3889 Courriel : gohjones@utk.edu
INTERMODAL 2001 <i>Driving the Future of MultiModal Freight</i>	Du 13 au 15 novembre 2001 Hamburg, Allemagne	Informa Maritime and Transport	Anna Williams Télec. : 44 (0)1932 893 894 Courriel : cust.serv@informa.com Internet : http://www.intermodal-events.com
Transportation Research Board 81 th Annual Meeting	Du 13 au 17 janvier 2002 Washington (DC)	Transportation Research Board	Internet : http://www4.nationalacademies.org/trb/annual.nsf/
Congrès international francophone 2002 de l'ATEC <i>Nouveau enjeux : le transport doit s'adapter</i>	Les 23 et 24 janvier 2002 Paris, France	ATEC	Tél. : (33) 01 45 24 09 09 Télec. : (33) 01 45 24 09 94
37 ^e Congrès annuel de l'AQTR	Du 7 au 9 avril 2002 Québec	Association québécoise du transport et des routes inc.	Tél : (514) 523-6444 Télec. : (514) 523-6444 Courriel : info@aqtr.qc.ca Internet : http://www.aqtr.qc.ca

INNOVATION TRANSPORT

Le bulletin scientifique et technologique INNOVATION TRANSPORT s'adresse au personnel du ministère des Transports et à tout partenaire des secteurs public et privé qui s'intéresse à ce domaine.

Il est le reflet des grands secteurs du transport au Québec : le transport des personnes, le transport des marchandises, les infrastructures et l'innovation. Il traite des enjeux importants, présente des projets de recherche en cours de réalisation ou terminés, de même que de l'information corporative.

INNOVATION TRANSPORT entend diffuser les résultats de travaux de spécialistes et d'expérimentations, les comptes rendus des activités de veille et de transfert technologiques, ainsi que des activités réalisées pour garantir le maintien d'une expertise de pointe.

Les textes publiés dans le bulletin INNOVATION TRANSPORT reflètent uniquement le point de vue de leurs auteurs et n'engagent en rien le ministère des Transports.