

Étude des conséquences de la détérioration de l'uni des chaussées sur le comportement des véhicules et la sécurité des usagers de la route

FRADETTE, Nicolas and DORÉ, Guy

Nicolas FRADETTE
Département de génie civil,
Pavillon Adrien-Pouliot, UNIVERSITÉ LAVAL
Québec, Canada, G1K 7P4.
téléphone : (418) 656-2131, ext. 2860
fax : (418) 656-2928
Email : nicolas.fradette.1@ulaval.ca

Guy DORE
Département de génie civil,
Pavillon Adrien-Pouliot, UNIVERSITÉ LAVAL
Québec, Canada, G1K 7P4.
téléphone : (418) 656-2203
fax : (418) 656-2928
Email : guy.dore@gci.ulaval.ca

Pascale Pierre
Département de génie civil,
Pavillon Adrien-Pouliot, UNIVERSITÉ LAVAL
Québec, Canada, G1K 7P4.
téléphone : (418) 656-2131 ext. 4678
fax : (418) 656-2928
Email : pascale.pierre@gci.ulaval.ca

Exposé préparé pour
La séance sur les essais accélérés des chaussées

Du congrès annuel de 2005 de
L'Association des transports du Canada
à Calgary (Alberta)

Résumé

Les accidents routiers, encore beaucoup trop fréquents sur nos routes peuvent être causés par le conducteur, par la condition de son véhicule, ou par la condition de la chaussée. La présente étude porte spécifiquement sur l'effet de la condition de la chaussée, et plus particulièrement de l'uni de sa surface, sur le comportement des véhicules et la dangerosité de la conduite sur les routes du Québec. Le projet vise à améliorer la connaissance sur les phénomènes responsables des déformations de la surface des chaussées et à quantifier l'incidence de ces déformations sur le comportement des véhicules, conséquemment, sur la santé et la sécurité des usagers de la route. Il vise également à déterminer des balises rationnelles pour la révision des seuils de déficience des chaussées en fonction de la nature des déformations et de leur incidence sur les usagers.

Le projet a permis de développer une méthode pour quantifier le risque de perte d'adhérence associé à un mauvais uni de chaussée. La quantification du risque a pu être réalisée à l'aide du logiciel de simulation du comportement des véhicules « Carsim ». Dans la première partie du projet, l'utilisation de « Carsim » a permis de déterminer l'amplitude de bosses de différentes longueurs d'onde entraînant une perte de force de contact du pneu jugée critique. La seconde partie du projet a permis de développer un utilitaire simple du logiciel d'analyse des profils routiers « Profan » permettant de localiser les bosses dangereuses dans un profil de chaussée.

Introduction

Le projet vise à améliorer la connaissance sur les phénomènes responsables des déformations de la surface des chaussées et à quantifier l'incidence de ces déformations sur le comportement des véhicules, conséquemment, sur la santé et la sécurité des usagers de la route. Il vise également à déterminer des balises rationnelles pour la révision des seuils de déficience des chaussées en fonction de la nature des déformations et de leur incidence sur les usagers.

Problématique

Les véhicules routiers sont devenus indispensables pour le développement économique et social des sociétés modernes. Par contre, la circulation de ces véhicules sur les réseaux routiers est une cause importante de blessures et de décès. Les accidents routiers, encore beaucoup trop fréquents sur nos routes peuvent être causés par le conducteur, par la condition de son véhicule, ou par la condition de la chaussée. La présente étude porte spécifiquement sur l'effet de la condition de la chaussée, et plus particulièrement de l'uni de sa surface, sur le comportement des véhicules et la dangerosité de la conduite sur les routes du Québec.

Réponse du véhicule circulant sur des chaussées déformées

Un véhicule roulant sur une route dont la surface est irrégulière répond à l'excitation par l'action de sa suspension incluant la compression de ses pneus. Les passagers du véhicule perçoivent les accélérations verticales qui ne sont pas amorties par le système. Les vibrations du véhicule causées par la rugosité de la route créent des forces dynamiques. La force verticale résultante est l'addition de ces forces dynamiques avec les forces statiques engendrées par le poids (la charge) du véhicule. Les forces de contact entre la route et les pneus sont évidemment plus grandes lorsqu'il est question d'un véhicule lourd. Ce sont ces forces qui créent des contraintes et des déformations à la surface du revêtement et qui endommagent les routes. C'est donc un cercle vicieux qui s'installe puisque les dommages résultants augmentent par la suite la rugosité de la chaussée augmentant ainsi les forces dynamiques.

Implications pour la sécurité

Les surfaces des chaussées doivent être le plus uniforme possible et elles ne doivent pas afficher d'irrégularités qui pourraient être néfastes aux usagers de la route. Les irrégularités engendrent des mouvements verticaux des véhicules qui, en plus de créer un inconfort au roulement du véhicule, peuvent engendrer une perte de contact du pneu avec la route. L'oscillation verticale du véhicule entraîne une variation de la charge appliquée sur le pneu qui est en lien direct avec la force de friction ou l'adhérence de celui-ci sur la surface. C'est grâce au déplacement vertical de l'essieu qu'il est possible d'estimer le déchargement du pneu et donc la perte de contact avec le revêtement.

Une perte d'adhérence équivaut à une perte de contact du pneu avec la chaussée. Lorsque la perte de contact du pneu est complète, il peut y avoir perte de contrôle du véhicule. Le terme adhérence s'applique à la composante tangentielle des forces agissant entre le pneu et la chaussée.

Puisque la force verticale appliquée sur la roue d'un véhicule a un lien directe avec la force de frottement et donc l'adhérence, la mesure ou l'estimation de cette force peut permettre d'identifier les endroits présentant un risque potentiel de perte de contrôle du véhicule.

Gammes de longueurs d'onde contribuant à la rugosité

Un moyen simple, pour tenter de déterminer la source des problèmes affectant l'uni, est de déterminer quelle gamme de longueurs d'onde contribue réellement à la rugosité (1). Un profil longitudinal de chaussée est un signal aléatoire qu'il est possible de filtrer. Le filtre « Butterworth » est souvent utilisé pour l'analyse des profils routiers. Il permet de séparer les composantes du profil selon des bandes passantes de longueurs d'ondes. Toutes les bandes passantes réunies doivent couvrir l'ensemble des longueurs d'onde ayant un incidence sur l'IRI (2). Le calcul de l'IRI sur chacune de ces bandes permettent d'identifier les bandes qui contribuent le plus à la rugosité. Les très petites longueurs d'onde (< 30 cm) contribuent peu à la rugosité car les pneus des véhicules absorbent l'essentiel des ondulations courtes. De même, les longueurs d'onde très grandes ne sont pas perçues par les véhicules puisqu'elles ne génèrent pas d'oscillation importante du véhicule..

Analogie entre une sinusoïde et une déformation sur un pseudo-profil de route

Un pseudo-profil est une représentation graphique de l'élévation de la surface d'une route en fonction de la distance. Un pseudo-profil de route peut être représenté par une combinaison de plusieurs sinusoïdes élémentaires. Les vibrations causées par la rugosité d'une route sont définies comme étant non périodiques. C'est-à-dire qu'aucune fonction mathématique ne peut exprimer le mouvement d'un véhicule résultant de la rugosité d'un pseudo-profil à cause de la grande quantité de fréquences dont il est composé.

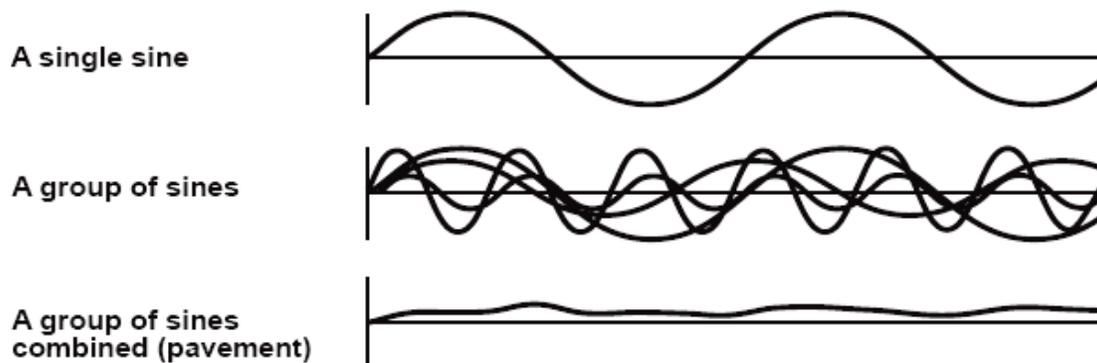


Figure 1 : Décomposition d'un pseudo-profil en plusieurs signaux sinusoïdaux élémentaires ayant des amplitudes, des longueurs d'onde et des phases différentes (3)

Par analogie avec un pseudo-profil de route, une irrégularité peut être représentée aussi par une sinusoïde élémentaire. Donc, l'amplitude d'une sinusoïde sera la hauteur maximale (h) pour une bosse ou la profondeur maximale pour un trou et la longueur d'onde sera deux fois la largeur de l'irrégularité (figure 2).

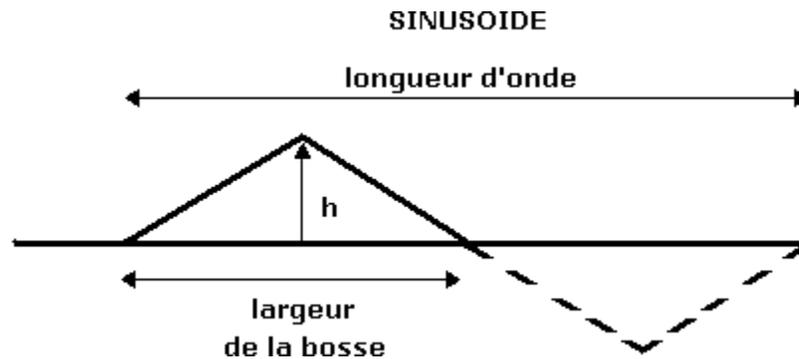


Figure 2 : Analogie entre une bosse et une sinusoïde.

Calcul de la perte d'adhérence entre le pneu et le revêtement à l'aide du logiciel *Carsim*

Pour pouvoir caractériser la sévérité des défauts pouvant se retrouver dans un pseudo-profil, plusieurs sinusoïdes d'amplitudes et de longueurs d'onde différentes ont été synthétisées informatiquement pour représenter la gamme des déformations (bosses ou creux) pouvant se retrouver sur nos routes. Pour ce faire, des amplitudes variant entre 20 et 180 millimètres et des longueurs d'onde variant entre 1 et 20 mètres ont été utilisées.

Par la suite, toutes les sinusoïdes créées ont été insérées dans des profils fictifs de 100 mètres parfaitement horizontaux pour simuler une route sans aucune rugosité à l'exception de la sinusoïde elle-même. Les sinusoïdes ont été placées au milieu des profils, c'est-à-dire que le centre de l'onde (à une distance d'une demie longueur d'onde) se retrouve au chaînage 50 mètres pour laisser le temps au véhicule d'arrêter d'osciller après avoir franchi l'irrégularité. Donc, seul l'effet d'une bosse simple et isolée dans le profil est vérifié dans le cadre de la présente étude. La méthode ne prend donc pas en compte les effets combinés de bosses multiples et successives.

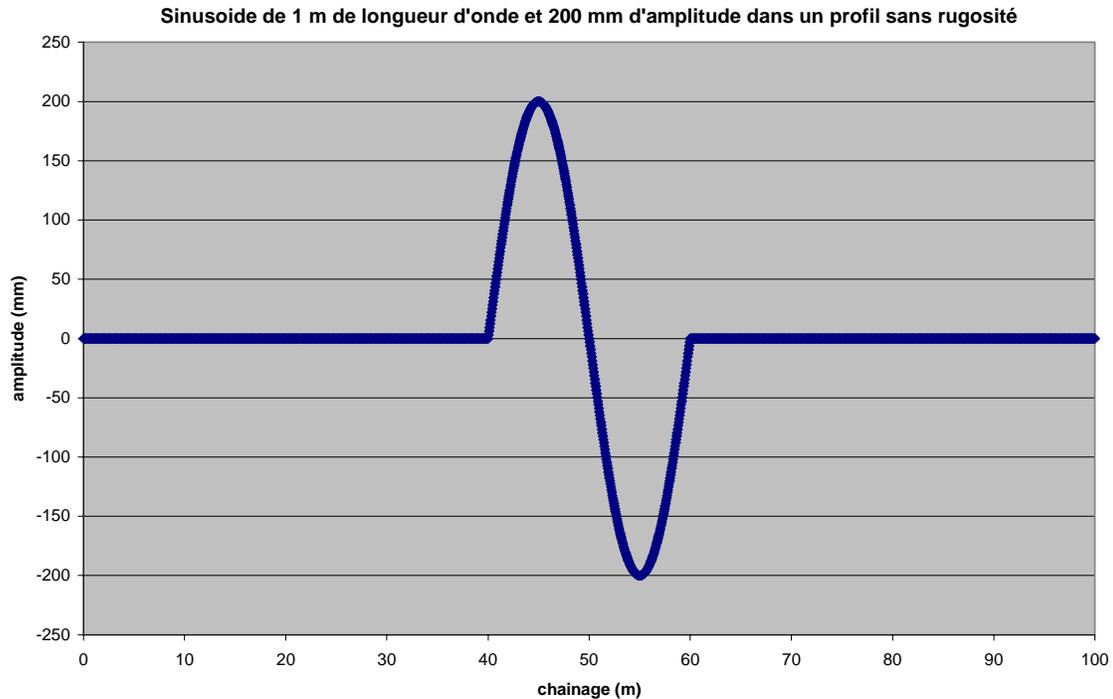


Figure 3 : Exemple de sinusoïde de 1 m de longueur d'onde et 200 mm d'amplitude insérée dans un profil sans rugosité

L'étape suivante a été de simuler le passage d'un véhicule de référence sur ces profils à l'aide du logiciel *Carsim* et ce à des vitesses variées pour en calculer les pertes d'adhérence. Les vitesses ont été choisies en fonction des limites fréquemment utilisées sur les différentes routes du Québec, soit : 70, 80, 90, 100, 110 et 120 km/h. Il est à noter que la limite de vitesse au Québec est de 100 km/h. Des vitesses supérieures à la limite permise ont tout de même été considérées pour l'étude pour prendre en considération les vitesses réelles observées sur certaines routes. Considérant que la perte d'adhérence des pneus est davantage une problématique de véhicules circulant à haute vitesse, vitesses en dessous de 70 km/h n'ont pas été étudiées.

Le logiciel *Carsim* permet de simuler le comportement dynamique de voitures, de camions légers, et de véhicules de service. Il est utilisé par des ingénieurs en conception, en développement, en essai et en planification. *Carsim* peut analyser le comportement mécanique complet du véhicule à l'aide d'un ordinateur personnel (4).

Le type de véhicule utilisé pour les simulations est une grande voiture correspondant à une Ford Taurus (ou modèle équivalent) (figure 4). La masse de la voiture est de 1527 kg avec suspension avant et arrière indépendante. La distance entre les deux essieux est de 2.69m et le type de pneu choisi est le 205/60R14. Une friction de 0.75 a été utilisée pour représenter une chaussée sèche.

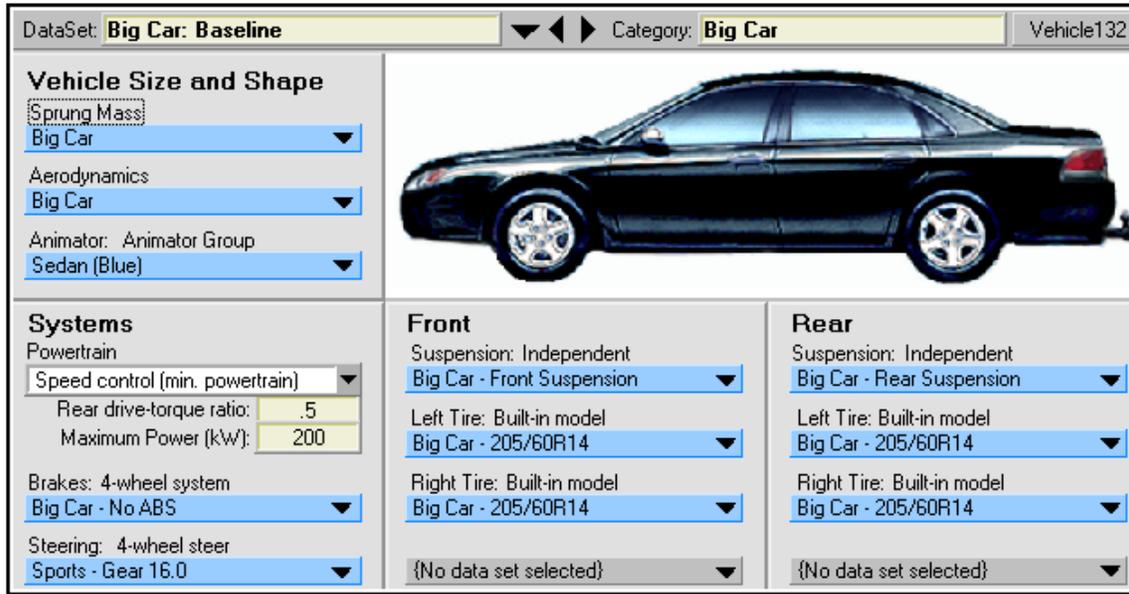


Figure 4 : Logiciel Carsim version 6. Type de véhicule utilisé.
(Mechanical Simulation Corporation)

Pour toutes les sinusoïdes d'amplitudes et de longueurs d'onde variées, et ce pour les 6 vitesses analysées, les forces de contact minimales entre les pneus et le revêtement, tant pour l'essieu avant ou arrière, ont été trouvées. Au total, 330 profils ont été analysés. Ensuite, pour calculer la réduction de la force de contact (%), chacune des forces verticales a été divisée par la moyenne des forces verticales agissant sur tout le pseudo-profil.

Des graphiques du % de force de contact en fonction de l'amplitude et de la longueur d'onde d'une sinusoïde, et ce à des vitesses variées, ont aussi été construits. La **figure 5** est un exemple de ces graphiques conçus avec un véhicule roulant à 90 km/h. Premièrement, il est possible de voir dans ces graphiques que toutes les courbes tendent vers une amplitude nulle pour une adhérence totale, et ce pour toutes les vitesses, ce qui est tout à fait normal. Deuxièmement, il est facile de constater sur ces graphiques que plus la vitesse augmente moins l'irrégularité a besoin d'une amplitude élevée pour atteindre le pourcentage de force de contact critique établi à 30%. Également, plus la longueur d'onde est élevée, plus l'amplitude de la sinusoïde doit être grande pour être dangereuse.

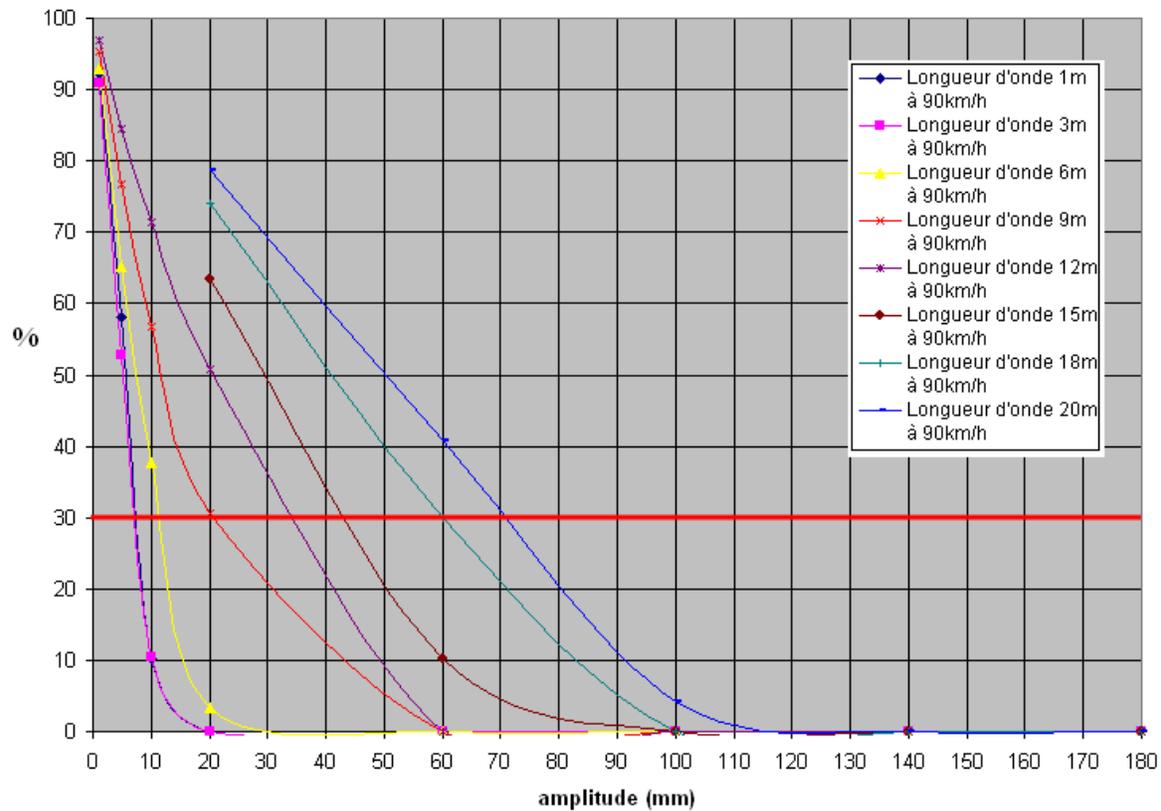


Figure 5 : Pourcentage de perte de force de contact maximum pour les pneus de l'essieu arrière en fonction de l'amplitude pour différentes longueurs d'onde à 90 km/h.

Par la suite, il a été possible de compiler, pour chacune des longueurs d'onde, toutes les amplitudes correspondant à une force de contact de 30% et ce pour toutes les vitesses à l'étude. Des graphiques de l'amplitude en fonction de la longueur d'onde ont été ainsi créés et des régressions de type polynomial du deuxième degré ont été calculées pour représenter mathématiquement la tendance de chaque courbe, voir **figure 6**.

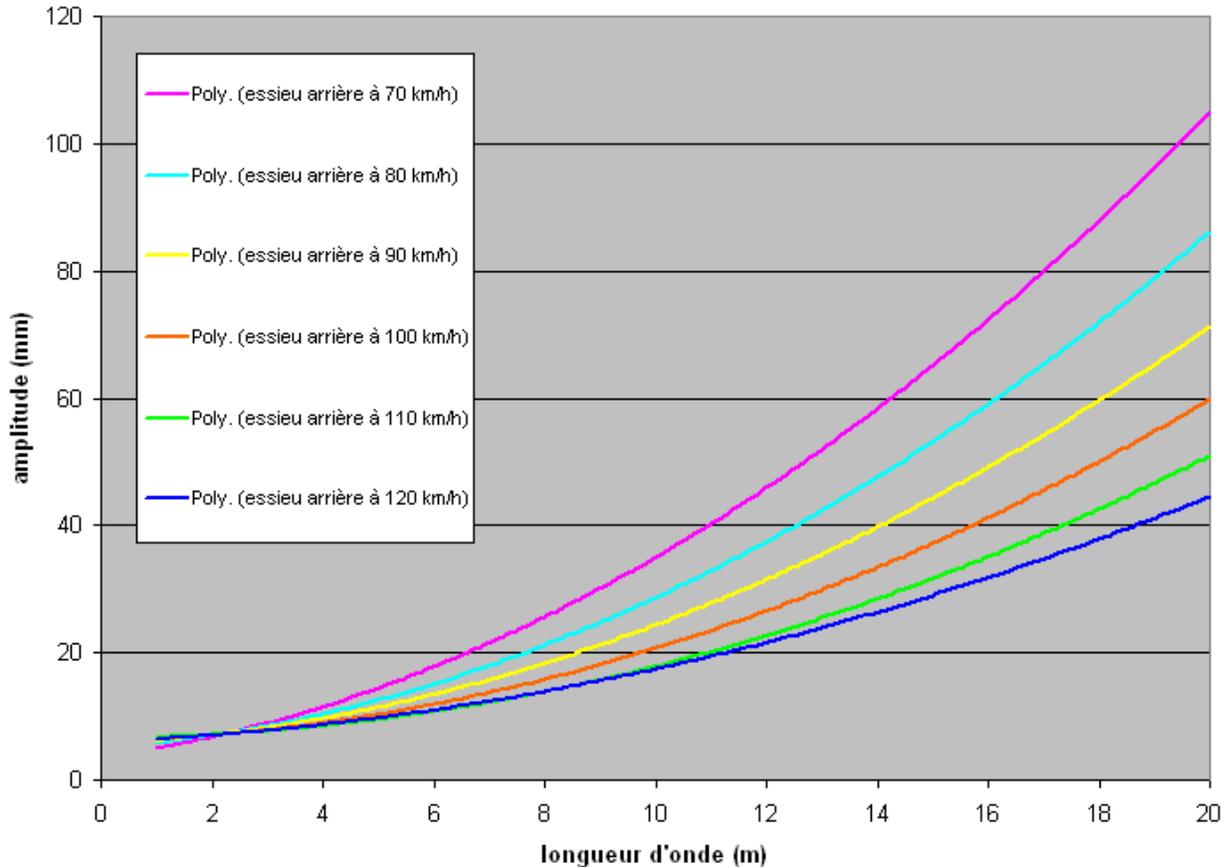


Figure 6 : Régressions de type polynomial du deuxième degré pour des courbes correspondant à une force de contact de 30% de l'essieu arrière et ce pour des vitesses variant entre 70 et 120 km/h.

Calculs des pertes d'adhérence sur des pseudo-profil de route

Le choix des sites à l'étude fait suite aux travaux de Hébert (5) portant sur l'évolution hivernale de l'uni de la chaussée. Dans une idée de continuité les mêmes 5 sites ont été choisis soit : deux portions de la route 369 près de Shannon, deux portions de la route 367 à Ste-Catherine et une portion de l'autoroute 40 à St-Augustin.

Pour chacun des sites, deux pseudo-profil provenant du profilomètre inertiel du Ministère des Transports du Québec ont été analysés par *CarSim* pour trouver les zones où la force de contact est inférieure à 30%. La vitesse utilisée dans le logiciel est celle permise sur ces routes, soit 90 km/h. La date du premier pseudo-profil correspond à l'IRI le plus élevé. Celui-ci a été choisi parmi plusieurs pseudo-profil mesurés entre le 3 décembre et le 26 juin 2003. La date du second pseudo-profil est le 26 juin 2003 pour tous les sites, date qui correspond aux pseudo-profil mesurés le plus tard durant l'été et aussi à l'IRI le plus faible dans la plupart des cas.

Sites	Dates des pseudo-profils	IRI total (mm/m)	Zones où la force de contact est inférieure à 30%
Autoroute 40	29 avril 2003 (pire IRI)	2,1	0
	26 juin 2003	1,9	0
Route 367 section #1	13 février 2003 (pire IRI)	4,6	44
	26 juin 2003	2,2	1
Route 367 section #2	07 avril 2003 (pire IRI)	2,7	9
	26 juin 2003	2,0	4
Route 369 section #1	14 mars 2003 (pire IRI)	6,8	53
	26 juin 2003	4,8	7
Route 369 section #2	14 mars 2003 (pire IRI)	2,6	8
	26 juin 2003	1,6	0

Tableau 1 : IRI et nombre de zones où la force de contact est inférieure à 30% pour chacun des pseudo-profils étudiés

En regardant le **tableau 1**, différentes constatations peuvent être faites. Les pseudo-profils qui contiennent le plus de zones où la force de contact est inférieure à 30% ont les indices de rugosité les plus élevés (cellules en rouge). Les pseudo-profils correspondant à l'autoroute 40 et à la route 369, section #2, possèdent les IRI les plus faibles de même que le moins de zones potentiellement dangereuses. De plus, l'amélioration de l'uni lors de la saison estivale se remarque par la diminution de l'IRI, mais également par la diminution du nombre de zones où l'adhérence est faible. L'IRI faible et l'absence de zone potentiellement dangereuse calculée par *CarSim* expriment la très bonne condition de la route.

Identification des endroits potentiellement dangereux

Un des objectifs de l'étude était d'utiliser un pseudo-profil comme base de données pour l'analyse de la dangerosité de la chaussée. La méthode devait être simple et rapide, être peu coûteuse, être capable d'associer l'anomalie à une sinusoïde, classifier les anomalies du pseudo-profil selon leurs amplitudes et leurs longueurs d'onde.

La méthode employée dans cette étude utilise comme outil le filtre Butterworth. Ce filtre, basé sur l'approche des transformés de Fourier, peut décomposer un signal aléatoire en plusieurs signaux élémentaires d'amplitudes et de longueurs d'onde variables (2). Il a été décidé de séparer la gamme des longueurs d'onde pouvant se retrouver dans un pseudo-profil en 3 catégories suivant les grandeurs établies par *L'Organisation de coopération et de développement économique 1984*, soit :

- Ondes courtes (1.0 à 3.3 m)
- Ondes moyennes (3.3 à 13.0 m)
- Ondes longues (13.0 à 40.0 m)

Il est important de souligner que les ondes supérieures à 40 mètres n'ont aucune influence sur l'indice de rugosité international. Donc, en utilisant des bandes passantes respectant les limites de ces ondes grâce au filtre Butterworth, l'ensemble des longueurs d'onde ayant un impact important sur le véhicule sont couvertes. Une telle procédure permet de bien déterminer les mécanismes causant les déformations à la surface du revêtement.

Ainsi, pour chacun des pseudo-profil retenus dans les cinq sites à l'étude, une décomposition des longueurs d'onde par bandes passantes et un calcul d'IRI sur chacune de ces bandes ont été réalisés. Les résultats sont présentés dans le **tableau 2**.

Sites	Dates des pseudo-profil	Filtre Butterworth par bandes passantes					
		IRI (mm/m) Ondes courtes 1m à 3,3m		IRI (mm/m) Ondes moyennes 3,3m à 13m		IRI (mm/m) Ondes longues 13m à 40m	
Autoroute 40	29 avril 2003	1,30	↑	1,25	↓	0,99	↓
	26 juin 2003	1,35	0,05	1,00	0,25	0,72	0,27
Route 367 section #1	13 février 2003	3,52	↓	3,24	↓	1,34	↓
	26 juin 2003	1,55	1,97	1,44	1,80	0,98	0,36
Route 367 section #2	7 avril 2003	1,44	↑	1,81	↓	1,43	↓
	26 juin 2003	1,55	0,11	1,44	0,37	0,98	0,45
Route 369 section #1	14 mars 2003	4,17	↓	4,54	↓	2,47	↓
	26 juin 2003	3,52	0,65	2,51	2,03	1,78	0,69
Route 369 section #2	14 mars 2003	1,42	↓	1,71	↓	1,60	↓
	26 juin 2003	0,96	0,46	0,76	0,95	1,13	0,47

Tableau 2 : IRI pour chacune des bandes passantes

Les valeurs d'IRI pour chacune des bandes passantes peuvent nous renseigner sur le type de mécanisme causant la distorsion du revêtement. Les **faibles longueurs d'onde**, de 1 à 3 m, sont généralement causées par des problèmes prenant place dans la **partie supérieure de la chaussée**. Ils regroupent entre autre les nids-de-poule, les bosses et le désenrobage. Les déformations correspondant à de **grandes longueurs d'onde**, de 5 à 30 m, sont généralement associées aux mouvements différentiels des **couches inférieures de la chaussée** et de **l'infrastructure**. Ils regroupent les tassements, les dépressions et les ondulations. Donc, le type de longueurs d'onde d'une déformation de surface de la chaussée peut aider à identifier quels mécanismes sont impliqués dans la dégradation de la chaussée.

Classification des sinusôides selon leurs amplitudes et leurs longueurs d'onde avec le logiciel *Profan*

Profan est un logiciel d'ingénierie spécialisé dans l'analyse et la visualisation de pseudo-profil longitudinaux de revêtement de chaussées conçu et réalisé par le groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval

En plus de permettre la visualisation de pseudo-profil longitudinal de route, de calculer l'IRI à l'aide du modèle du quart de véhicule, d'offrir deux possibilités de filtrage (par moyenne mobile ou par l'utilisation du filtre Butterworth) ainsi que de permettre la comparaison de pseudo-profil dans un même graphique, le logiciel *Profan* peut calculer et classer tous les trous et les bosses d'un pseudo-profil selon leur longueur d'onde et leur amplitude. Cet outil s'appelle l'analyse de profil et il fonctionne sur la moyenne des élévations des 2 voies de la route.

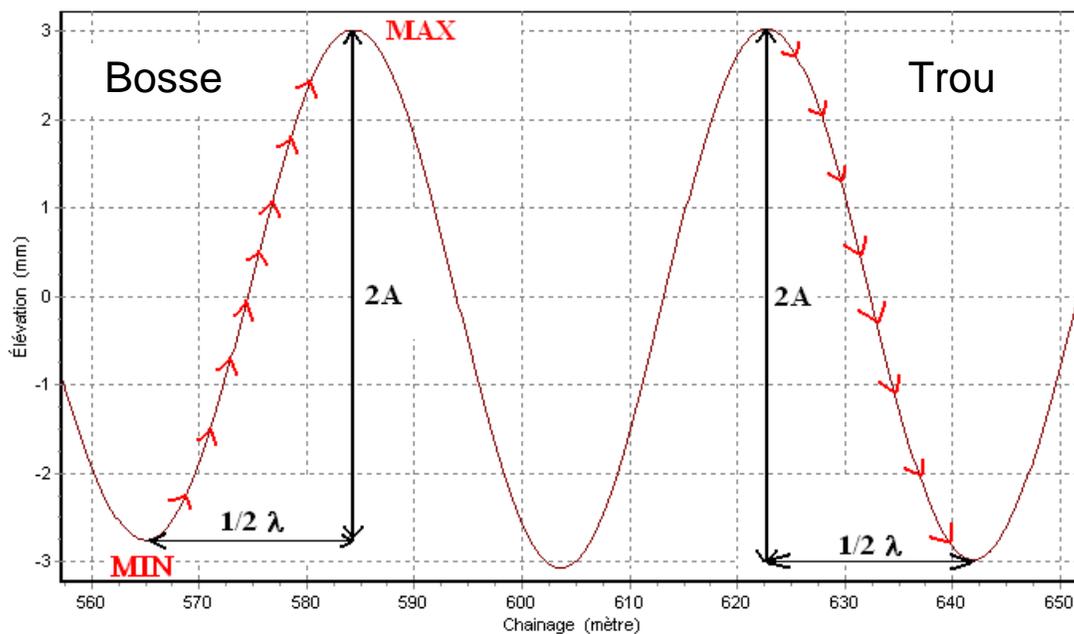


Figure 7 : Principe de l'analyse de profil dans *Profan*

Le fonctionnement de l'analyse de profil dans *Profan* est très simple. L'outil permet de rechercher des bosses ou des trous contenus dans le pseudo-profil (Figure 7). Par exemple, lors de la recherche de bosses, le logiciel recherche les élévations minimales et calcule la différence d'élévation entre la valeur minimale trouvée et la valeur maximale suivante. Cette différence correspond à 2 fois l'amplitude de la longueur d'onde recherchée. La distance en terme de chaînage séparant les élévations extrêmes correspond à la moitié de la longueur d'onde. Le logiciel peut ainsi trier l'ensemble des longueurs d'ondes en ordre de grandeur et afficher les amplitudes correspondant selon leur rang (Figure 8). Le positionnement de l'anomalie correspond au chaînage de l'amplitude maximum pour une bosse et minimum pour un trou. Il est également important de rappeler que les longueurs d'onde recherchées doivent être un multiple de 0,15 mètre pour respecter l'intervalle de mesure du profilomètre inertiel.

Information sur l'analyse		Information sur la case	
Type d'analyse:	Recherche d'anomalies	Amplitude:	10,4395 mm
Nom:	Analyse1	Chainage:	225,45 m
Titre:	Recherche d'anomalies (Bosses) sur Source1	Chainage début:	225,3 m
Historique:	{exemple.PP1}-{Source1}	Ligne dans la source:	#1504
Notes:		Amplitude limite (mm):	0

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Demie longueur d'onde (m)	0,300	0,600	0,900	1,200	1,500	1,800	2,100	2,400	2,700	3,000	3,300	3,600	3,900
Pleine longueur d'onde (m)	0,600	1,200	1,800	2,400	3,000	3,600	4,200	4,800	5,400	6,000	6,600	7,200	7,800
Amplitude limite (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chainage #1 (mm)	10,440	2,349	4,762	4,584	7,506	9,500	5,956	15,163	8,000	6,184	14,884	8,725	17,029
Chainage #2 (mm)	2,184	2,235	3,759	4,052	5,232	6,299	5,461	7,633	6,782	6,082	14,274	7,658	12,484
Chainage #3 (mm)	1,944	2,121	3,683	2,769	5,054	4,381	4,076	6,401	6,426	5,410	7,455	5,829	5,613
Chainage #4 (mm)	1,588	1,892	3,428	2,489	4,509	4,292	3,239	4,077	6,096	5,308	6,959	5,753	4,839
Chainage #5 (mm)	1,435	1,878	3,112	2,210	4,304	4,014	3,124	3,975	5,296	5,118	6,642	5,296	4,737
Chainage #6 (mm)	1,334	1,829	3,022	2,159	3,975	3,987	3,035	3,861	5,271	4,890	5,664	4,762	4,559
Chainage #7 (mm)	1,321	1,499	2,616	2,146	2,934	3,340	2,705	3,822	5,105	4,762	5,182	3,936	3,595
Chainage #8 (mm)	1,283	1,499	2,603	2,108	2,832	2,883	2,667	3,289	4,572	4,573	3,188	3,441	3,506
Chainage #9 (mm)	1,243	1,486	2,553	2,045	2,680	2,832	2,591	2,528	4,331	4,102	3,061	1,943	3,302
Chainage #10 (mm)	1,219	1,397	2,464	2,033	2,603	2,616	2,489	2,514	3,797	3,366	2,515	1,410	3,239
Chainage #11 (mm)	1,143	1,384	2,286	1,994	2,502	2,578	2,337	2,502	3,784	3,263	2,476	-	2,756
Chainage #12 (mm)	1,117	1,334	2,159	1,944	2,248	2,350	2,299	2,387	3,722	3,201	1,804	-	2,667
Chainage #13 (mm)	1,093	1,257	2,007	1,905	2,159	2,223	2,197	2,210	3,696	2,896	1,803	-	1,943
Chainage #14 (mm)	1,092	1,220	1,842	1,803	2,147	2,184	2,070	2,045	3,581	2,857	-	-	-
Chainage #15 (mm)	1,041	1,220	1,816	1,601	2,146	2,108	1,866	2,044	3,213	2,654	-	-	-
Chainage #16 (mm)	1,028	1,220	1,689	1,587	2,006	2,045	1,740	1,917	2,667	2,146	-	-	-
Chainage #17 (mm)	1,016	1,181	1,575	1,562	2,006	1,905	1,689	1,803	2,476	1,968	-	-	-
Chainage #18 (mm)	0,978	1,143	1,537	1,473	1,930	1,779	1,689	1,790	2,425	1,550	-	-	-

Figure 8 : Exemple d'analyse de profil dans *Profan*

Pour que cet outil fonctionne bien, l'analyse doit se faire sur des ondes composées de signaux sinusoïdaux élémentaires. De là l'utilité d'utiliser le filtre Butterworth car une telle analyse effectuée sur un pseudo-profil brut ne pourrait pas fonctionner. Effectivement, le pseudo-profil brut est constitué de toute la gamme de longueurs d'onde. Les ondes courtes empêcheraient l'analyse de cibler les grandes et les moyennes ondes à cause de leurs faibles amplitudes et de leur omniprésence dans le pseudo-profil.

Le logiciel *Profan* permet à l'utilisateur d'insérer des amplitudes limites pour chacune des longueurs d'onde. Pour déterminer ces limites, les régressions de type polynomial du deuxième degré peuvent être utilisées pour les courbes correspondant à une force de contact de 30% de l'essieu arrière et ce pour des vitesses variant entre 70 et 120 km/h (essais réalisés sur des sinusoides à l'aide du logiciel *CarSim*). Le logiciel *Profan* permet également la visualisation des zones où les amplitudes dépassent les limites établies par l'utilisateur (zones en rouge dans la figure 9).

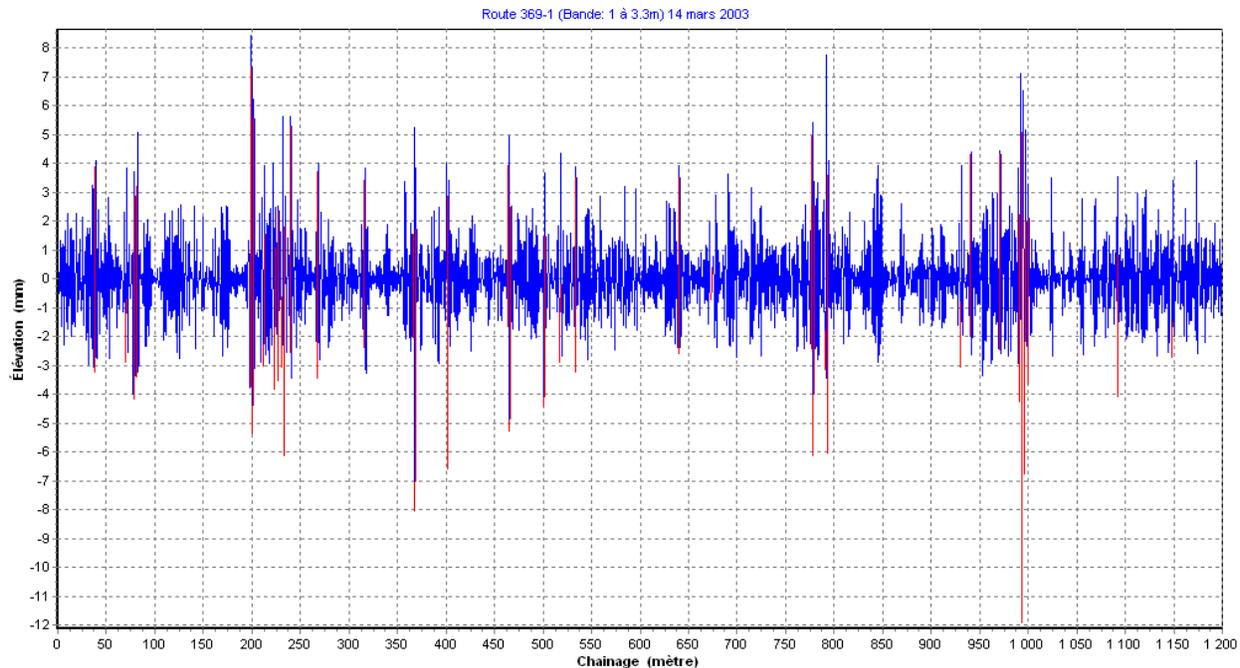


Figure 9 : Exemple : Route 369-1 (Bande passante : 1 à 3.3m) 14 mars 2003 avec affichage des zones où les amplitudes des bosses > amplitudes limites

Concordance entre les défauts identifiés par l'analyse avec *Profan* et les zones où la force de contact est < 30% (*CarSim*)

Lors de l'analyse des sinusoides variant en amplitudes et longueurs d'onde insérées dans un profil sans rugosité, réalisé à l'aide du logiciel *Carsim*, il a été remarqué que les pertes d'adhérence se produisaient toujours entre l'élévation maximale et environ les 3 quarts de la longueur d'onde. En effet, pour vérifier si les amplitudes dépassant les limites trouvées avec le logiciel *Profan* concordaient avec les zones où la force de contact est inférieure à 30% selon le logiciel *CarSim*, toutes les longueurs d'onde ont été définies par le chaînage de l'élévation maximale ou minimale (bosse ou trou) et un chaînage d'une demie longueur d'onde plus grand. Ces limites, indiquant la position de toutes les ondes potentiellement dangereuses, ont été analysées pour vérifier si elles coïncidaient avec les zones où la force de contact est inférieure à 30% dans *CarSim*. De plus, lors de l'analyse des sinusoides au début de l'étude, il a été observé que les pertes d'adhérence se produisaient, la plupart du temps, au niveau des pneus de l'essieu

arrière du véhicule. C'est pour cette raison que les régressions utilisées pour les analyses correspondent à l'essieu arrière.

Il s'est avéré, en utilisant la régression de type polynomial du deuxième degré et une valeur critique de force de contact de 30% de l'essieu arrière et ce pour une vitesses de 90 km/h dans *Profan*, que presque aucune déformation dangereuse n'était identifiée. Pourtant, plusieurs avaient été identifiées avec le logiciel *CarSim*. Ce phénomène s'explique probablement par le fait que le logiciel *CarSim* est un logiciel puissant qui tient compte de toute la dynamique du véhicule. Plusieurs autres analyses ont été effectuées, mais cette fois-ci, en utilisant des régressions polynomiales rattachées à des pertes d'adhérence plus élevées (figure 10). Donc, les régressions rattachées à des valeurs de force de contact inférieures à 60% ne révélaient pas suffisamment de zones dans *Profan* et les régressions rattachées à des valeurs de force de contact supérieures à 60% révélaient trop de zones non potentiellement dangereuses dans *CarSim*. La régression polynomiale correspondant à une force de contact de 60% semble donc optimale. Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Il est important de mentionner que la somme des zones potentiellement dangereuses trouvées pour chacune des bandes passantes ne correspond pas nécessairement au nombre total de zones potentiellement dangereuses trouvées pour tout le pseudo-profil, car un secteur peut être à la fois affecté par une déformation de faible amplitude et par une autre d'une plus grande dimension.

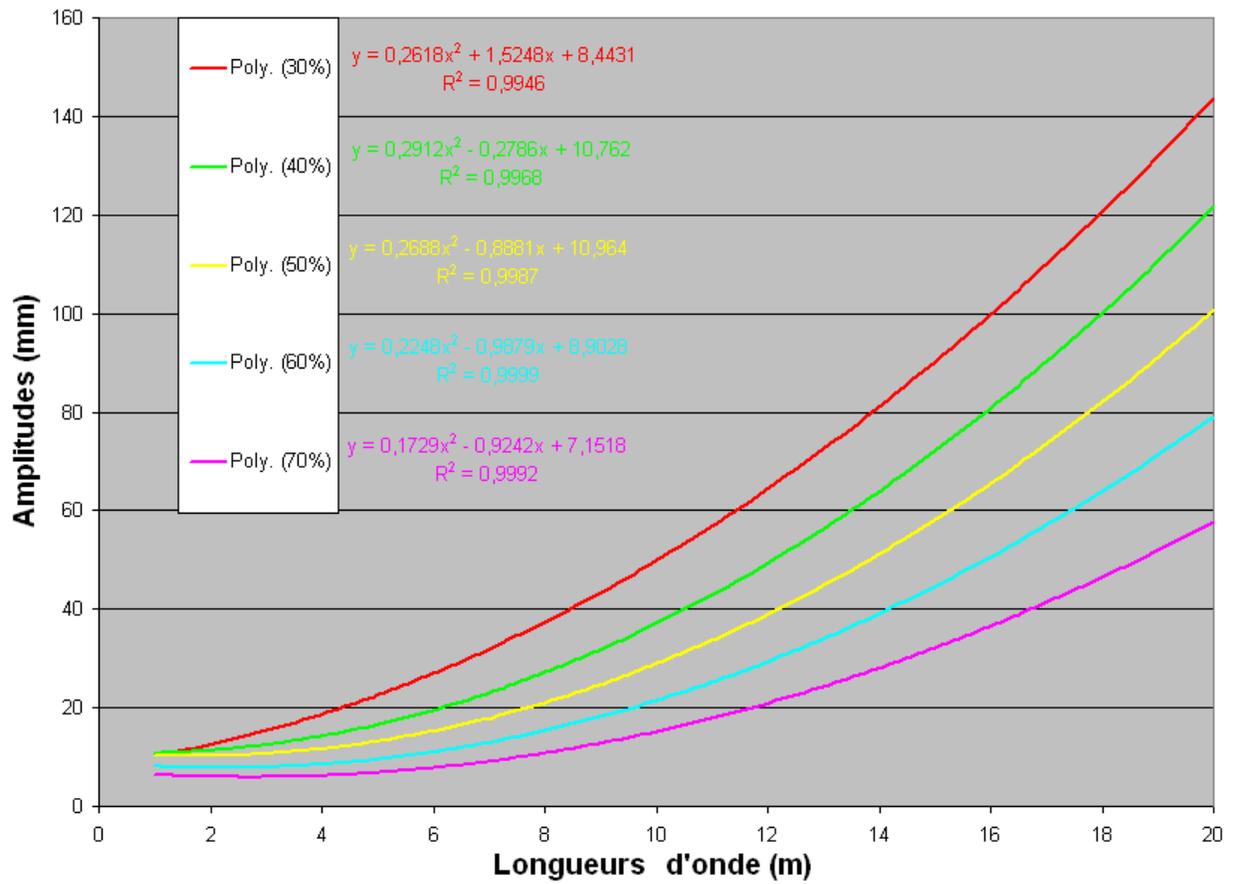


Figure 10 : Régressions de type polynomial du deuxième degré de l'amplitude en fonction de la longueur d'onde correspondant à des valeurs de force de contact variant entre 30 et 70 % pour l'essieu arrière et ce pour une vitesse de 90 km/h.

Filtre Butterworth par bandes passantes									
Sites	Dates	Zones où l'adhérence est inférieure à 30%	Ondes courtes 1m à 3,3m		Ondes moyennes 3,3m à 13m		Ondes longues <i>(liées au confort plutôt qu'à la sécurité)</i> 13m à 40m		Secteurs trouvés au total
			bosses	trous	bosses	trous	bosses	trous	
Autoroute 40	29 avril 2003	0 (0m / 1200m)							
	26 juin 2003	0 (0m / 1200m)							
Route 367 section #1	13 février 2003	44 (18m / 1700m)	2 dangereux 6 non dangereux (25%)	5 dangereux 2 non dangereux (71%)	23 dangereux 26 non dangereux (62%)	0 dangereux 47 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	27 trouvés sur 44 réels (61%)
	26 juin 2003	1 (0,25m / 1700m)	0 dangereux 1 non dangereux (0%)	0 dangereux 1 non dangereux (0%)	0 dangereux 3 non dangereux (0%)	0 dangereux 1 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 trouvés sur 1 réels (0%)
Route 367 section #2	7 avril 2003	9 (10,75m / 1200m)	1 dangereux 4 non dangereux (20%)	1 dangereux 1 non dangereux (50%)	2 dangereux 3 non dangereux (40%)	0 dangereux 7 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	2 trouvés sur 9 réels (18%)
	26 juin 2003	4 (6,25m / 1200m)	0 dangereux 2 non dangereux (0%)	0 dangereux 1 non dangereux (0%)	0 dangereux 2 non dangereux (0%)	0 dangereux 3 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 trouvés sur 4 réels (0%)
Route 369 section #1	14 mars 2003	53 (73,5m / 1200m)	6 dangereux 10 non dangereux (38%)	2 dangereux 12 non dangereux (14%)	14 dangereux 38 non dangereux (27%)	10 dangereux 46 non dangereux (18%)	1 dangereux 0 non dangereux (100%)	1 dangereux 0 non dangereux (100%)	21 trouvés sur 53 réels (40%)
	26 juin 2003	7 (7m / 1200m)	1 dangereux 10 non dangereux (9%)	4 dangereux 4 non dangereux (50%)	1 dangereux 12 non dangereux (8%)	0 dangereux 7 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	5 trouvés sur 7 réels (71%)
Route 369 section #2	14 mars 2003	8 (7,75m / 1700m)	0 dangereux 1 non dangereux (0%)	0 dangereux 1 non dangereux (0%)	5 dangereux 1 non dangereux (83%)	0 dangereux 11 non dangereux (0%)	0 dangereux 0 non dangereux (0%)	0 dangereux 1 non dangereux (0%)	5 trouvés sur 8 réels (63%)
	26 juin 2003	0 (0m / 1700m)							

Tableau 3 : Vérification de la concordance entre les ondes dépassant les amplitudes limites (*Profan*) et les zones où la force de contact est < 30% (*CarSim*)

Analyse des résultats

Autoroute 40

En ce qui concerne l'autoroute 40 aucune vérification n'a été faite puisque ce site ne comportait aucune zone où la force de contact était inférieure à 30% (*CarSim*). L'absence de zone s'explique facilement par la très bonne condition de la route qui se reflète dans les faibles valeurs d'IRI obtenues sur les deux pseudo-profil (**tableau 1**). La stabilité remarquable de l'IRI entre le pseudo-profil du 29 avril et celui du 26 juin 2003 démontre bien la quasi absence de soulèvements différentiels sur cette route. De plus, l'IRI calculé sur chacune des bandes passantes du filtre Butterworth démontre bien cette stabilité puisque les indices de rugosité sont presque similaires (**tableau 2**).

Route 367 section #1

Premièrement, la grande quantité de zones (44) où la force de contact est inférieure à 30% pour le pseudo-profil du 13 février (**tableau 3**) s'explique par un IRI élevé de 4.6 mm/m. Cette section de route, construite sur des tills hétérogènes, a subi plusieurs épisodes de pavage. Elle exhibe des problèmes importants de soulèvement de fissures. Ceci se confirme par un IRI, pour le pseudo-profil du 13 février, de 3.52 mm/m pour la bande passante de 1 à 3.3 m (bande qui a d'ailleurs l'IRI le plus élevé). Le fait que l'IRI diminue de 1.97 mm/m entre le 13 février et le 26 juin pour la bande correspondant aux ondes courtes démontre bien le phénomène de fermeture des fissures (**tableau 2**). La méthode a pu trouver, pour les longueurs d'onde comprises entre 1 et 3.3 m, 2 zones potentiellement dangereuses sur 6 pour la recherche de bosses, c'est-à-dire que 6 amplitudes dépassant les limites établies ne correspondaient pas aux zones de perte d'adhérence du logiciel *Carsim* et 5 zones potentiellement dangereuses sur 2 pour la recherche de trous. En ce qui concerne les ondes moyennes du 13 février, 23 amplitudes se sont avérées correspondre pour les bosses et 0 pour les trous (**tableau 3**). Ce taux élevé de secteurs pour les moyennes longueurs d'onde reflète également des problèmes de soulèvement différentiel sur cette route. La valeur d'IRI élevée de 3.24 mm/m pour le 13 février qui passe à 1.44 mm/m pour le 26 juin correspond avec la fonte au printemps des lentilles de glace formées durant l'hiver (**tableau 2**). Au total, 61 % des zones où la force de contact est inférieure à 30% pour le pseudo-profil du 13 février ont été trouvées (27 sur 44). Ce total correspond à la plus grande quantité de zones trouvées parmi les cinq sites. Pour le pseudo-profil du 26 juin, la seule zone de faible adhérence n'a pas été trouvée. Il faut dire que cette zone mesurait ¼ de mètre sur un profil de 1.7 kilomètre. Encore une fois, cette faible quantité de zone se justifie par un IRI assez faible de 2.2 mm/m pour le pseudo-profil brute du 26 juin 2003.

Route 367 section #2

Cette section a été construite à la limite entre des tills hétérogènes et des dépôts marins d'eau peu profonde constitués de sable et gravier (**5**). Fait intéressant, le nombre de zones de faible adhérence calculé dans *CarSim* diminue seulement d'environ la moitié du 7 avril au 26 juin. Ceci est attribuable à une portion de route de 130 mètres située au début du profil vieille de 20 ans. Cette portion contient à elle seule 7 des 9 zones et 2 des 4 zones où la force de contact est inférieure à 30% pour les pseudo-profil du 7 avril et 26 juin respectivement (**tableau 3**). Elle présente d'importantes fissurations par fatigue, longitudinales et transversales qui se manifestent le 7 avril 2003 par un IRI très critique de 9 mm/m juste pour ces 130 mètres. Lorsque l'indice de rugosité est calculé sur les pseudo-profil en entier (1200 m), il démontre une assez bonne

condition de la route (tableau 1). Si chacune des bandes du filtre Butterworth est analysée, les ondes moyennes ressortent avec l'IRI le plus élevé, mais pas beaucoup plus que les ondes courtes (tableau 2). Les deux secteurs trouvés au total se retrouvent dans les catégories des ondes courtes et moyennes et font partie de la vieille section. Ceci peut être dû aux deux phénomènes présents dans cette portion de route, soit l'important niveau de fissuration (ondes courtes) et l'apparition de soulèvements différentiels à partir du 14 mars (ondes moyennes). En ce qui concerne le pseudo-profil du 26 juin, aucune zone n'a été trouvée parmi les quatre secteurs de faible adhérence établis par *CarSim*. Ceci peut s'expliquer par le faible indice de rugosité de 2.0 mm/m pour ce profil d'été.

Route 369 section #1

Cette section construite sur la terrasse fluviale de la Rivière–Jacques Cartier près de la ville de Shannon est très vieille. Les deux pseudo-profils rattachés à cette portion de route affichent les valeurs d'IRI les plus élevées des 5 sites (tableau 1). Pour cette même raison, le logiciel *CarSim* a détecté plus de zones où la force de contact est inférieure à 30% que les autres sites. Lorsque l'IRI est calculé sur chacune des bandes passantes du filtre Butterworth (tableau 2), les moyennes longueurs d'onde ressortent avec l'IRI le plus élevé (4.54 mm/m) pour le pseudo-profil du 14 mars. Ceci est dû aux nombreuses ondulations, présentes sur cette route, provoquées par le soulèvement différentiel. En effet, l'uni de la section se rétablit d'une façon extrême en ce qui concerne le pseudo-profil du 26 juin, dû à la fonte des lentilles de glace, car l'IRI affiche une valeur de 2.51 mm/m (une baisse de 2 mm/m). Pour appuyer ces résultats, les longueurs d'onde entre 3.3 et 13 m, dépassant les limites établies à l'aide du logiciel *Profan*, ont permis de trouver la majorité des 21 zones de faible adhérence détectées (tableau 3). L'IRI des ondes courtes n'est guère mieux, car le pseudo-profil d'hiver affiche une valeur de 4.17 mm/m (tableau 2). D'ailleurs, 8 zones ont été trouvées dans cette catégorie (tableau 3). Il s'agit d'une route présentant de nombreuses fissures longitudinales et transversales ainsi que des lézardes (5). L'IRI de 3.52 mm/m des ondes courtes en saison estivale confirme ses affirmations. En effet, cette faible baisse de rugosité (diminution de 0.65 mm/m) face à la fissuration démontre encore une fois l'âge de la route. La majorité des zones détectées dans *Profan* durant l'été font partie de cette catégorie (tableau 3). Fait intéressant, pour la première et seule fois, l'analyse a détecté une zone potentiellement dangereuse en ce qui concerne la catégorie des ondes longues pour le pseudo-profil d'hiver (tableau 3). Cette zone correspond à un endroit où une importante dénivellation associée au gel et à la présence d'un ponceau. Les valeurs d'IRI de grandes longueurs d'onde sont les plus élevées des 5 sites.

Route 369 section #2

Cette section de route a été construite sur des dépôts fluviaux faisant parfois contact avec des dépôts marins. Cette section récemment pavée, ne démontre pas de fissuration. D'ailleurs, l'IRI des ondes courtes est de 1.42 mm/m pour le pseudo-profil d'hiver, ce qui est très faible (tableau 2). Les seuls phénomènes affectant l'uni sont des soulèvements différentiels dus à des contacts géologiques. L'IRI est effectivement plus élevé pour les moyennes longueurs d'ondes que les deux autres catégories de bande passante. Encore une fois, la méthode confirme les mécanismes de dégradation de chaussée car les seules zones trouvées à l'aide de *Profan* font partie de cette catégorie. Au total, 5 zones de faible adhérence sur 8 ont été identifiées (tableau 3). En ce qui concerne le pseudo-profil du 26 juin 2003, aucune analyse n'a été réalisée puisque le logiciel *CarSim* n'a détecté aucune zone où la force de contact est inférieure à 30% (tableau 1).

Discussion

Pour l'ensemble des sites, les calculs d'IRI effectués sur les 3 bandes passantes reflètent le peu d'influence qu'exercent les ondes longues (tableau 2). Cette constatation se vérifie par le faible taux de zones trouvées à l'aide de la méthode dans la catégorie des grandes longueurs d'onde. Ceci est dû au fait que les ondes longues sont liées au confort plutôt qu'à la sécurité (2).

Dans tous les cas, lorsque le nombre de zones trouvées par le logiciel *CarSim* est faible, la méthode n'identifie également pas beaucoup de zones. Il est évident que le logiciel *Profan* peut faire ressortir des longueurs d'onde ayant des amplitudes dépassant les limites qui ne provoquent pas de perte d'adhérence puisqu'il ne tient pas compte des effets dynamiques du véhicule. En effet, l'étude ne tient pas compte de l'effet de déformations combinées. Une déformation extrême pourrait être amortie par une autre déformation qui serait juxtaposée.

En soit, le fait d'identifier des zones qui ne sont pas dangereuses n'est pas trop grave. Il semble plus important de retrouver le maximum de secteurs à risque potentiel dans un pseudo-profil pour pouvoir prévenir les accidents et corriger le problème. Pour l'instant, le succès de la méthode varie d'un site à l'autre, allant de 18 à 71% des zones ciblées où la force de contact est inférieure à 30%.

Conclusion

Le projet a permis de développer une méthode pour quantifier le risque de perte d'adhérence associé à un mauvais uni de chaussée. La quantification du risque a pu être réalisée à l'aide du logiciel de simulation du comportement des véhicules « Carsim ». Dans la première partie du projet, l'utilisation de « Carsim » a permis de déterminer l'amplitude de bosses de différentes longueurs d'onde entraînant une perte de force de contact du pneu jugée critique. La seconde partie du projet a permis de développer un utilitaire simple du logiciel d'analyse des profils routiers « Profan » permettant de localiser les bosses dangereuses dans un profil de chaussée. Il est évident que la méthode ne cible pas toutes les zones de faible adhérence et ce n'était pas le but de l'étude. La méthode permet d'affirmer en général qu'en divisant un pseudo-profil en ondes sinusoïdales élémentaires et en attribuant à chacune d'elle une amplitude limite, il est possible de déterminer à quel endroit il y aura perte d'adhérence. Ainsi, plus l'amplitude d'une déformation est élevée, plus l'accélération verticale du véhicule sera grande.

Références

- (1) G Awasthi, T Singh, Dr A Das, On pavement roughness indices, IE (I) Journal.CV, Mai 2003, Vol. 84.
- (2) M Vaillancourt, D Perraton, P Dorchies et G Doré, Décomposition du pseudo-profil et analyse de l'indice de rugosité international (IRI), Can. J. Civ. Eng., Octobre 2003, Vol. 30, p.923-933.
- (3) Editor T McNinch, Evaluating Pavement Surfaces: LISA and RQI, MDOT's Lightweight Inertial Surface Analyzer (LISA) & the Michigan Ride Quality Index (RQI), M&T Research Record, Juin 1993, Issue Number 79.
- (4) Mechanical Simulation Corporation, Brochure Version 6 *CarSim*, 912 North Main, Suite 210, Ann Arbor, [Internet : http://www.carsim.com/downloads/pdf/cs_brochure.pdf].
- (5) Hébert S., 2003, Évolution hivernale de l'uni de la chaussée, Projet de fin d'études, département de génie géologique, Université Laval