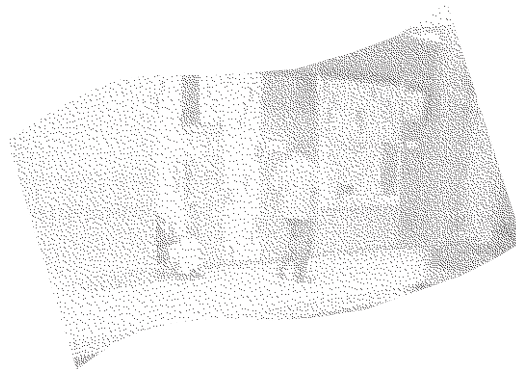


**Évaluation
du profil de la surface
des pistes de roulement
du métro de Montréal**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Marc J. Richard

R-344

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent pour vous !*

MISSION

- ▶ Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- ▶ Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- ▶ Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.

Abonnement : 1-817-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
octobre 2003.

Évaluation du profil de la surface des pistes de roulement du métro de Montréal

Marc J. Richard,
Département de génie mécanique, Université Laval

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles de l'auteur.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

**Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.**

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	5
1. Contexte	7
1.1 <i>Pertinence d'un profilomètre</i>	8
1.2 <i>Utilisation d'un « dipstick manuel »</i>	9
2. Profilométrie des chaussées	11
2.1 <i>Fiabilité du dipstick</i>	13
2.2 <i>« Filtrage des profils »</i>	15
2.3 <i>Nombre d'ondes (cycle / unité de longueur)</i>	18
2.4 <i>Indice de planéité IRI (« International Roughness Index »)</i>	18
2.5 <i>Indice de qualité de route RN (« Ride Number »)</i>	20
2.6 <i>Densité spectrale de puissance (DSP)</i>	20
2.7 <i>La qualité de roulement</i>	24
3. Le logiciel « ROADRUF »	27
3.1 <i>Objectifs du logiciel ROADRUF</i>	27
3.2 <i>Propriétés des indices IRI et RN</i>	31
4. Analyse des résultats	34
4.1 <i>Logiciel ROADRUF</i>	34
4.2 <i>Logiciel DADISP</i>	39
4.3 <i>Analyse spectrale avec le logiciel ROADRUF</i>	43
5. Conclusion	45
6. Remerciements	46
7. Références	46
ANNEXE A	47
ANNEXE B	51
ANNEXE C	57

Résumé

Introduction

- En juillet 2002, suite à une demande de la Société de transport de Montréal (STM), l'IRSST débutait une étude sur les caractéristiques d'exposition vibratoire des opérateurs de motrices MR-63 et MR-73. Dans le cadre de ce projet, l'IRSST désirait entreprendre des démarches afin de mesurer les profils longitudinaux des pistes de roulement du métro de Montréal. Par conséquent, l'objectif de ce projet consistait à ausculter quelques pistes et à évaluer la qualité du profil des pistes de roulement qui existent actuellement sur le réseau.
- Nous savons que l'uni des pistes constitue l'un des principaux indicateurs de la condition des pistes de roulement, en raison de son impact sur les coûts d'utilisation des motrices et sur le confort au roulement ressenti par les usagers.

Méthodologie

- Les mesures de profil à l'intérieur du métro de Montréal furent enregistrées par un inclinomètre très précis appelé « dipstick manuel ». Les données ont été prélevées le 15 août 2002 sur la piste d'essais (voie 21) à la tour Youville et dans la nuit du 19 août 2002 entre les stations Cadillac et Langelier sur la ligne 1 du métro de Montréal.
- L'indicateur retenu afin d'évaluer la planéité des pistes de roulement est l'indice **IRI** (« International Roughness Index »). L'indice IRI (exprimé en m/km) est un indicateur d'uni qui est proportionnel aux déplacements verticaux cumulés de l'axe d'une roue par rapport au châssis d'un véhicule. Il varie entre 1 m/km pour une surface presque parfaite et 8 m/km pour une chaussée revêtue passablement dégradée.
- Le Ministère des transports du Québec (MTQ) a établi des normes pour les routes au Québec de l'indice IRI qui oscillent entre 2.2 et 4 m/km. Lors de nos essais sur les deux pistes de roulement du métro de Montréal, nous avons obtenu des valeurs de confort au roulement IRI, en moyenne, inférieures à 1.5 m/km.

Conclusion

- Les mesures prélevées sur les pistes de roulement du métro de Montréal se situent bien en deçà des normes de tous les ministères des transports en Amérique du Nord (incluant ceux du Ministère des transports du Québec).
- En adoptant l'hypothèse que l'ensemble du réseau est comparable aux deux sites que nous avons évalués, nous constatons, que d'une manière générale, les défauts de planéité des pistes de roulement du métro de Montréal sont très faibles.
- Dans le cadre du projet sur les vibrations globales du corps des opérateurs du métro de Montréal, nous pouvons conclure que les pistes de roulement du réseau contribuent très peu aux vibrations ressenties par les utilisateurs du métro.

1 Contexte

En juillet 2002, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) débutait une étude sur l'aménagement des postes de travail des opérateurs du métro de Montréal. Dans ce projet, il était proposé de mesurer les caractéristiques d'exposition vibratoire des opérateurs dans les loges actuelles d'une motrice et de définir les caractéristiques spectrales de l'environnement vibratoire propre aux motrices dans l'utilisation normale d'une unité de métro. Lors d'un sondage qui a été effectué auprès des opérateurs de métro (147 personnes) de la Société de Transport de Montréal, nous avons constaté que 91% des répondants disaient avoir déjà été soumis à des vibrations ou des secousses et pour 64% des répondants, cette contrainte était perçue comme spécialement difficile ou pénible. Notons qu'il s'agissait de la deuxième source de pénibilité en importance, la première étant la qualité de l'air déficiente (72%) et la troisième les postures inconfortables (54%). Par ailleurs, 40% des répondants rapportaient avoir été incommodés par le sautellement d'un train dans les sept jours précédant l'enquête. Parmi eux, on retrouvait une surreprésentation des opérateurs affectés à la ligne 1 au cours de la même période. Notons également que la ligne est un facteur très important ou assez important lors du choix de l'assignation pour 85% des répondants, contre 51% en ce qui concerne le choix de la motrice (MR73 versus MR 63).

L'influence de plusieurs facteurs opérationnels dont la vitesse, la charge transportée, les parcours utilisés et la surface de roulement devaient être évalués de même que la performance d'atténuation des vibrations par les strapontins (sièges) et le système de suspension des motrices. Bien entendu, cette étude se divisait en plusieurs sous-projets. Par conséquent, dans le cadre de ce projet, l'IRSST désirait entreprendre des démarches afin de concevoir un profilomètre manuel de haute précision qui pouvait mesurer de façon précise les profils longitudinaux d'une chaussée. Puisque le profil des surfaces des pistes de roulement était une donnée essentielle pour l'analyse des phénomènes vibratoires, les agents de l'IRSST, responsables du projet des vibrations, songeaient ainsi à utiliser les résultats de cet appareil afin d'établir le réel profil des pistes de roulement à l'intérieur du réseau du métro de Montréal.

La figure 1.1 représente une coupe typique du tunnel du métro de Montréal avec ses composantes et les voies sur lesquelles voyagent les unités de train du métro. Notons que les pistes de roulement permettent le roulement des pneus porteurs. Ces pistes sont formées d'une série de dalles de béton de 18 pieds de longueur qui sont fixées directement sur le radier. Les spécifications des niveaux de tolérance pour les pistes de roulement du métro de Montréal sont disponibles à l'annexe A. De plus, sur la figure 1.1, nous pouvons entre autres apercevoir les pistes de roulement, le radier, les rails de sécurité ainsi que les barres de guidage. L'objectif principal de ce projet consistait donc à concevoir un profilomètre avec lasers capable d'ausculter et d'évaluer la qualité du profil des pistes de roulement qui existent actuellement dans le réseau du métro de Montréal.

1.1 Pertinence d'un profilomètre

L'équipement en question devait être un profilomètre manuel qui permettait la mesure des déformations de la surface des chaussées. Ce type de mesure était essentiel pour l'analyse des vibrations et devait aussi servir à analyser le soulèvement et les tassements différentiels causés par le déplacement répétitif des wagons de train du métro de Montréal. Compte tenu des implications financières associées à la prise de données sur des lignes de métro en service, l'appareil requis devait permettre des mesures rapides. La dimension généralement restreinte des sections étudiées ne justifiait cependant pas l'acquisition d'un appareil à grand rendement. Un appareil roulant, propulsé et opéré manuellement, constituait un bon compromis pour ce type de recherche. L'appareil dispendieux proposé par AARB Transport Research était le seul modèle disponible commercialement. Les deux autres appareils connus qui auraient satisfait à nos exigences n'étaient plus disponibles sur le marché en raison de problèmes techniques du « Rolling Dipstick » ou en raison de la réorientation des activités de la compagnie CSC Profilair.

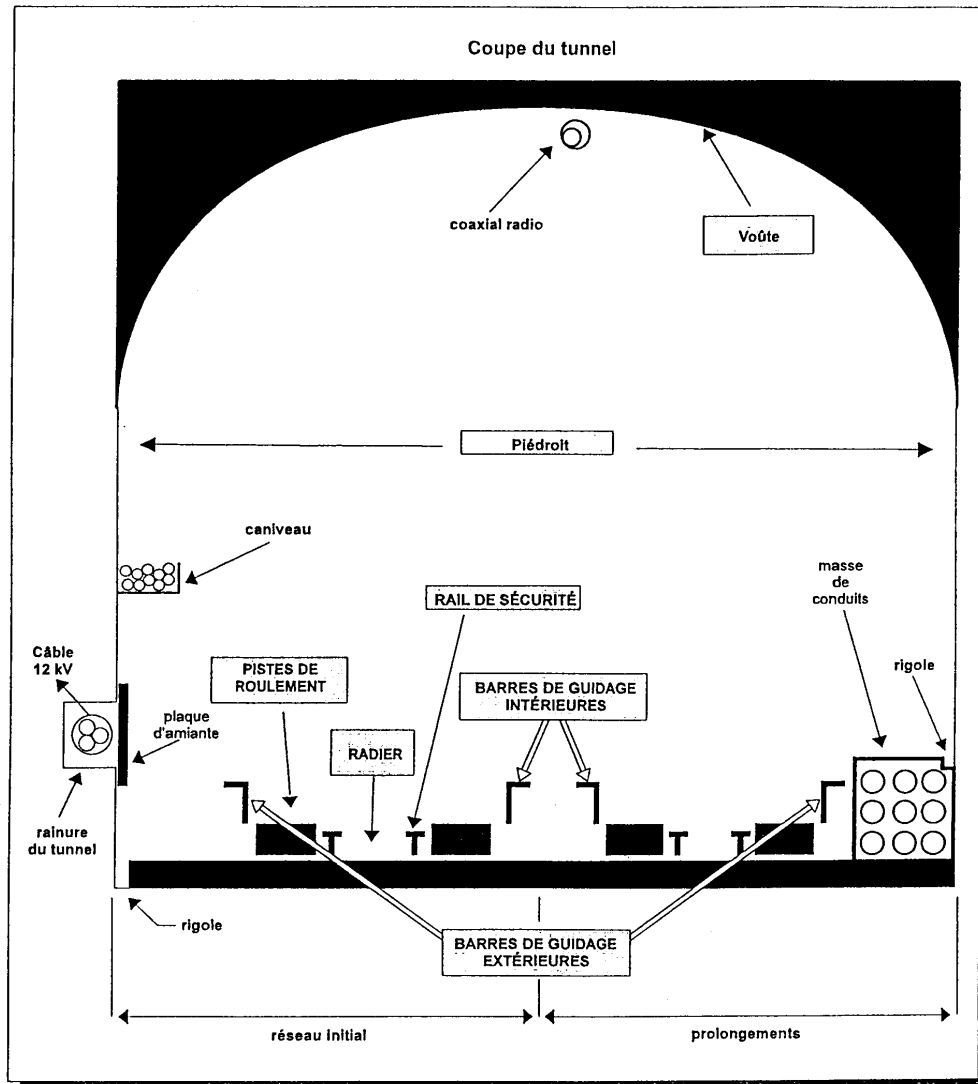


Figure 1.1 Composantes du tunnel et des voies.

La mesure précise du profil de la surface nous aurait ainsi permis d'étudier l'évolution de phénomènes tels que les soulèvements différentiels et les affaissements résultant d'une usure excessive causée par les unités de train à l'intérieur du métro. La forme, la longueur d'onde et l'amplitude des déformations mesurées par l'appareil auraient pu être associées aux caractéristiques des sols et des matériaux ainsi qu'aux mécanismes de distorsion et de détérioration en cause. Ces mesures pouvaient donc permettre d'améliorer les connaissances sur des paramètres importants et développer des modèles de simulation basés sur la qualité de roulement de la chaussée. Ces mesures nous auraient permis également de calculer des indices de planéité afin de mieux quantifier le comportement des pistes de roulement. Le profilomètre devait donc permettre de mesurer et d'enregistrer le profil de la surface d'une piste de roulement avec une précision, une résolution et un pas de mesure qui étaient conformes aux spécifications de la classe I selon la norme ASTM-E950-98. Il devait ainsi permettre de mesurer et de suivre l'évolution des distorsions résultant de soulèvements ou d'affaissements de la piste de roulement. Le profilomètre constituait une alternative économique et efficace aux fastidieux relevés de nivellement.

1.2 Utilisation d'un « dipstick manuel »

Heureusement, avant même de procéder à la conception finale et à l'achat des différents équipements nécessaires pour l'instrumentation du profilomètre avec lasers, nous avons communiqué avec les agents du Ministère des Transports du Québec qui oeuvrent dans le domaine de l'évaluation des chaussées pour le réseau routier québécois. Ceux-ci nous ont suggéré d'utiliser un « dipstick manuel », capable de nous fournir d'excellents résultats préliminaires, afin de justifier la nécessité de concevoir un nouveau type de profilomètre très sophistiqué et dispendieux adapté pour les pistes de roulement du métro de Montréal.

Il existe plusieurs types d'appareil de mesure profilométrique. Le comité technique C-1 de l'Association mondiale de la route [1] (AIPCR/PIARC) a complété en 2002 une étude comparative des principales méthodes et appareils de mesure d'uni utilisées dans le monde. L'étude illustre les approches utilisées dans différents pays lors de mesures de profil longitudinal et transversal.

Pour nos mesures de profil à l'intérieur du métro de Montréal, nous avons utilisé un « dipstick manuel » de la compagnie FACE située à Norfolk en Virginie U.S.A. Le « dipstick manuel » représenté à la figure 1.2 est utilisé par un opérateur à une vitesse de marche très lente. Cet appareil est constitué d'un inclinomètre de haute précision qui enregistre des valeurs d'inclinaison entre deux supports, normalement séparés de 0.3 mètre, et mesure un écart d'élévation de profil entre deux points de mesure successifs. Le système exploite un accéléromètre gravitationnel LCM100, provenant de la compagnie JEWELL Instruments de Manchester au New-Hampshire U.S.A., capable de détecter de très petits angles par rapport à la verticale. Afin de déterminer le profil d'une surface, l'opérateur appuie l'appareil jusqu'à ce que tout le poids soit sur le support avant, ensuite il soulève le support arrière, effectue une rotation de 180° par rapport au support avant et pose le support sur la chaussée, un signal sonore (« beep ») se fait entendre et l'opérateur recommence la procédure le long du profil à mesurer.

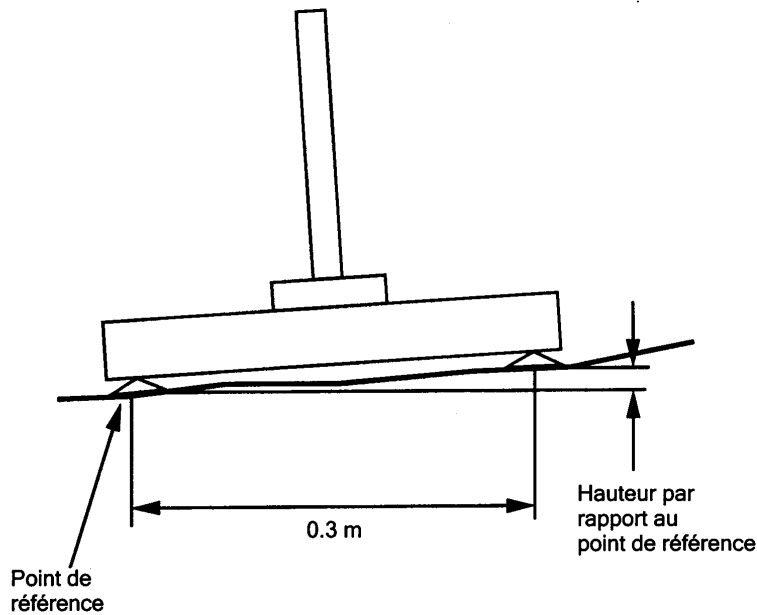


Figure 1.2 Dipstick manuel.

Le « dipstick manuel » fut utilisé à deux reprises; (1) le 15 août 2002 sur la piste d'essais (voie 21) à la tour Youville et (2) dans la nuit du 19 août 2002 entre les stations Cadillac et Langelier sur la ligne 1 du métro de Montréal. Il est à noter que notre profilomètre était un appareil manuel et que nous étions limités dans les distances à parcourir sur les pistes. Par conséquent, nous devons effectuer un choix représentatif et judicieux des pistes à analyser.

Le premier site sur la voie 21 fut retenu car celui-ci nous avait été recommandé par le personnel de la Société de transport de Montréal (STM). Les pistes de roulement qui ont été choisies et évaluées sur ce site, nous semblaient être comparables aux autres pistes sur l'ensemble du réseau. De plus, cette piste d'essais était considérée comme une portion normale du réseau. Le rationnel pour le choix du deuxième site (près de la station Cadillac) fut très simple. Vu qu'approximativement 90% des motrices qui étaient rapportées avec de hauts niveaux de vibration perceptibles (avec sautilllements) pour les usagers provenaient de la ligne verte « Angrignon – Beaugrand », nous avons discuté à nouveau avec quelques employés de la STM qui nous ont tous indiqué que les sautilllements perceptibles semblaient s'accroître vers la fin de la ligne verte entre les stations Cadillac et Langelier. Suite à ces discussions, nous avons finalement choisi cette portion de piste pour notre deuxième site représentatif.

Finalement, ce rapport traite de la théorie de base dans le domaine de la profilométrie des chaussées et analyse les résultats compilés par le « dipstick manuel » pour les deux sites mentionnés précédemment à partir des logiciels ROADRUF [2,3] et DADISP conçus par l'Institut de recherche en transports de l'Université du Michigan (« University of Michigan Transportation Research Institute, U.M.T.R.I.») et le centre CONCAVE de l'Université Concordia à Montréal, respectivement.

2 Profilométrie des chaussées

En premier lieu, il serait important de définir ce que nous entendons par « profil et uni d'une chaussée ». Le profil, montré en figure 2.1, est défini comme une tranche perpendiculaire bidimensionnelle d'une surface de chaussée.

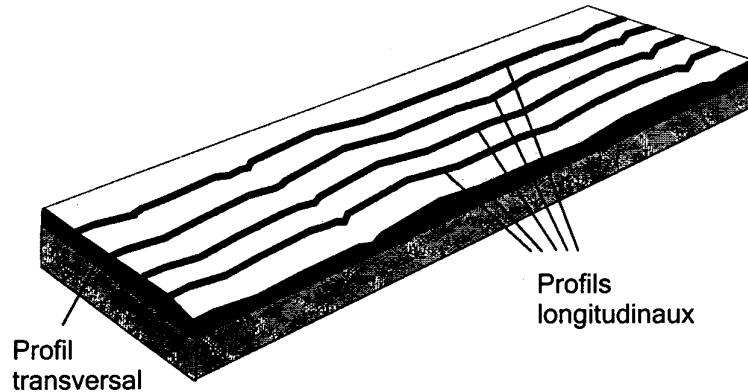


Figure 2.1 Profils d'une chaussée.

Le profil enregistré le long d'une coupe transversale démontre les élévations et les ornières des chaussées, tandis que les profils longitudinaux nous procurent de l'information sur la qualité, la planéité et la texture de la chaussée. À l'intérieur de ce rapport, nous analyserons les profils longitudinaux. Le profil d'une route ou d'une chaussée peut être enregistré le long d'une multitude de lignes imaginaires sur la surface. Donc, à moins de suivre la même ligne, il est toujours difficile d'obtenir le même profil. Par contre, il existe toujours un « vrai profil » pour chaque ligne.

L'un des principaux attributs de la qualité d'une chaussée est son uni. En effet, l'uni est souvent la principale qualité d'une chaussée que perçoit l'utilisateur lorsqu'il circule, car elle influence son confort. Notons toutefois que les effets de l'uni sont plus nombreux puisque l'uni a aussi une incidence sur la sécurité et sur le coût de fonctionnement des véhicules.

Les caractéristiques de l'uni des pistes de roulement ont un effet important sur le niveau de service d'un réseau routier. Elles affectent particulièrement les éléments suivants :

1. **Le confort des usagers** : en général les grandes longueurs d'ondes causent des oscillations de l'habitacle du véhicule, tandis que les plus courtes occasionnent des vibrations au volant et au plancher.
2. **La sécurité** : les défauts d'uni contribuent à accroître le risque d'accident lorsque les oscillations dynamiques appliquées en freinage ou en accélération sont anormalement élevées.
3. **Le coût de fonctionnement des véhicules** : les ondulations de la chaussée font grimper le coût de la maintenance des suspensions et elles ont également un impact négatif sur le taux d'usure des véhicules.

L'uni est un indice reflétant la condition de surface d'une chaussée. Il qualifie la variation du profil en long de la piste par rapport à un profil fictif qui serait

parfaitement lisse. Par contre, le concept d'uni n'englobe pas les variations de profil résultant de la topographie du terrain ou de la macrostructure du revêtement. Afin d'éliminer l'effet parasite de ces phénomènes, l'évaluation de l'uni ne considère que les irrégularités dont la longueur d'onde est comprise entre 0.8 et 40 m.

Au Québec, l'uni est mesuré au moyen d'un appareil de type profilomètre inertiel, lequel est intégré au véhicule d'auscultation multifonction du Ministère. Les données obtenues sont traduites, à tous les 100 m en un indice de planéité ou de confort au roulement appelé **IRI** (« **I**nternational **R**oughness **I**ndex »), qui sera défini à la section 2.4) exprimé en m/km. L'IRI varie généralement entre 1 m/km et 8 m/km représentant, respectivement, une chaussée presque parfaite et une chaussée complètement détériorée sur laquelle on ne peut circuler qu'à basse vitesse.

Le Ministère des transports du Québec (MTQ) a développé des seuils de déficience pour les différentes classes de route au Québec (autoroute, nationale, régionale et collectrice). Chaque fois qu'un segment de chaussée présente une condition qui excède le seuil de la classe à laquelle il appartient, celui-ci est considéré déficient. Pour qu'un segment de chaussée soit considéré déficient, sa valeur moyenne d'IRI doit excéder les seuils que le Ministère a établis au début des années 1990 et qui sont présentés dans le tableau 2.1.

CLASSE FONCTIONNELLE	SEUIL DE DÉFICIENCE
Autoroute	IRI > 2.2 m / km
Nationale	IRI > 2.5 m / km
Régionale	IRI > 3.0 m / km
Collectrice	IRI > 3.5 m / km

Tableau 2.1 Valeurs d'IRI au-delà desquelles la chaussée est considérée déficiente par le Ministère des transports du Québec.

L'établissement de seuils représentatifs pour le Québec, en terme de confort au roulement s'est effectué en considérant trois intrants majeurs. La première partie consistait en une étude de la perception des usagers de la route du niveau d'inconfort au-delà duquel une intervention était requise. La deuxième composante consistait en une revue du niveau de dégradation des chaussées au moment de la réalisation d'une intervention et, finalement, une revue des valeurs utilisées par d'autres ministères des transports en Amérique du Nord. Par la suite, les seuils de reconstruction ont été harmonisés avec les valeurs utilisées dans le cadre des études de réfection des chaussées.

2.1 Fiabilité du dipstick

Il existe plusieurs types d'appareils afin d'enregistrer les profils d'une chaussée. Tous les profilomètres compilent et exploitent les trois mêmes paramètres : (1) une élévation de référence, (2) la hauteur par rapport à la référence et (3) la distance longitudinale. La plupart sont des profilomètres inertiels et utilisent des lasers avec des accéléromètres afin d'éliminer les différentes perturbations qui peuvent provenir de la chaussée. Ces instruments de mesure génèrent rarement le « vrai profil » avec les « vraies élévations ».

Il n'est pas toujours facile de visualiser des résultats provenant d'un profilomètre inertiel car celui-ci détecte rarement une pente continue sur la chaussée. La figure 2.2 [4,5] représente trois profils différents pour une même chaussée provenant du dipstick et des profilomètres inertiels laser ICC et K.J. Law.

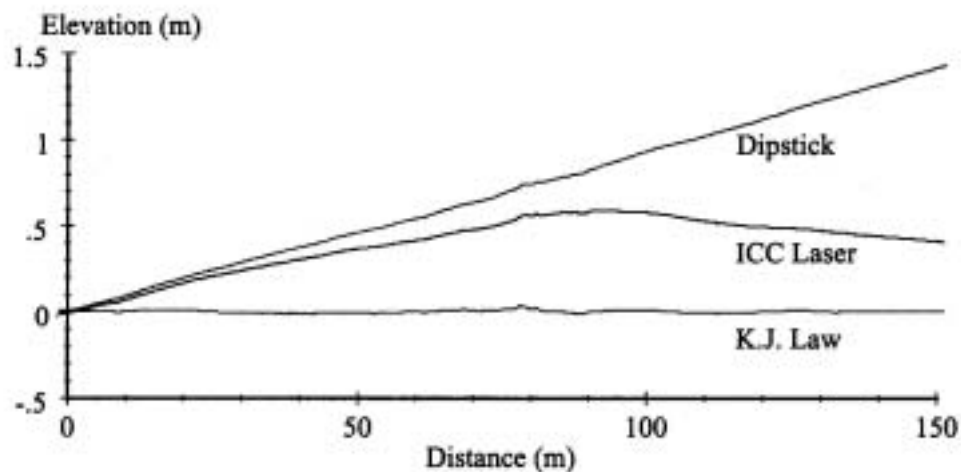


Figure 2.2 Profils mesurés par trois appareils différents.

Le dipstick capte et enregistre une pente positive de 1 mètre vertical par 100 mètres longitudinal. Le laser ICC, nous montre une pente de 0,5 mètre vertical par 100 mètres longitudinal tandis que l'instrument de K.J. Law enregistre un profil plutôt uniforme. Nous pouvons rapidement constater que le taux de changement en élévation et les ondulations sur des dizaines de mètres ne sont pas nécessairement mesurés d'une façon précise par aucun de ces instruments. Néanmoins, le dipstick est celui qui procure des résultats le plus près de la réalité. Maintenant, si nous effectuons une comparaison en terme de planéité montrée dans la figure 2.3, nous constatons une excellente correspondance entre le dipstick, le profilomètre inertiel K.J. Law et le laser ICC.

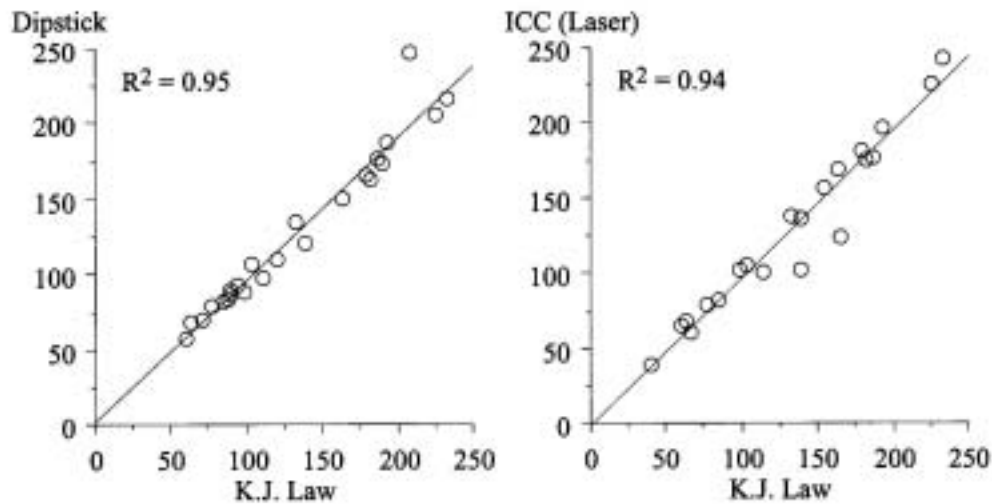


Figure 2.3 Statistiques de planéité du dipstick et du laser ICC par rapport au profilomètre K.J. Law.

La validité d'un profilomètre est fonction de la zone d'utilisation dans laquelle nous désirons l'exploiter. Chacun des profilomètres possède des plages d'application limitées. Par exemple, le dipstick est excellent pour déterminer le **IRI** et le **RN** (« Ride Number », que nous allons définir à la section 2.5). Par contre, il ne peut pas identifier de légères fissures sur une chaussée. La figure 2.4 nous démontre bien ce phénomène en comparant les mesures du dipstick et le profilomètre inertiel PRORUT (conçu par le « Federal Highway Administration, Washington D.C. »). Suite à une translation des résultats du PRORUT de 6 mm pour fin de comparaison, nous remarquons que chacun enregistre la forme de base du profil mais le capteur PRORUT qui prélève des échantillons à des intervalles de 2 po (50 mm) détecte les deux fissures à 147 m et 156.5 m.

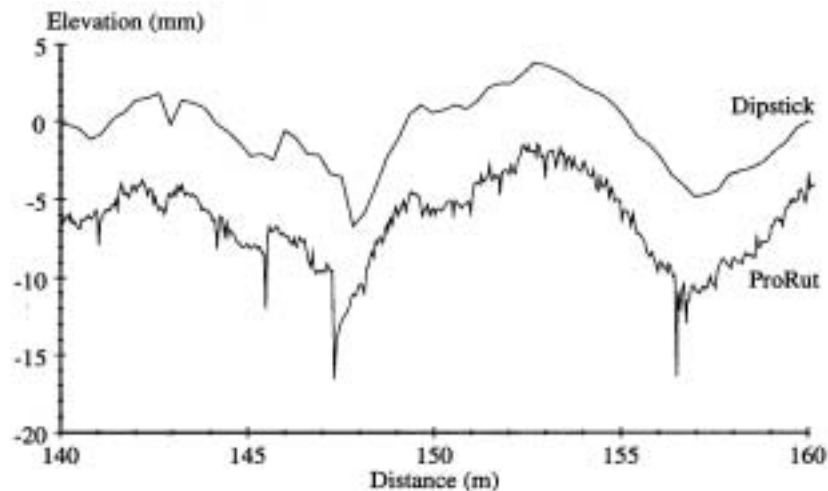


Figure 2.4 Comparaison de profils entre le dipstick et le profilomètre PRORUT.

Le dipstick utilise un intervalle d'échantillonnage ajustable qui, dans notre cas, était fixé à 0.3 m. Si l'intervalle d'échantillonnage Δx représente des mètres, alors nous

aurons $1000 / \Delta x$ échantillons par kilomètre. Dans la pratique, nous recherchons un intervalle d'échantillonnage assez élevé car celui-ci nous fournit d'aussi bons résultats en terme de planéité en réduisant le nombre de chiffres à traiter.

2.2 « Filtrage » des profils

Nous sommes conscients qu'un « profil réel » est toujours continu et nous l'avons défini auparavant comme une tranche longitudinale d'une portion de surface. Les instruments qui produisent des mesures en continu sont appelés instruments « analogiques » car ceux-ci sont « analogiques » aux variables d'intérêt. Par contre, une variable en continu est souvent représentée par un nombre fini de valeur que nous appelons « représentation digitale ». Les mesures enregistrées par le dipstick sont toujours digitales.

Nous sommes tous familier avec l'utilisation d'un filtre à la maison pour retirer des particules d'un fluide ou bien épurer l'eau de la salade, spaghetti, etc. Dans le domaine de l'électronique, les composantes ou circuits qui modifient le voltage continuellement sont appelés des « filtres ». En général dans ce domaine, nous tentons d'éliminer du bruit. Il devient donc évident que nous devons utiliser des filtres mathématiques afin d'extraire l'information pertinente des séquences de chiffres qui proviennent des profilomètres et, en tant qu'utilisateur, il ne sera pas nécessaire de comprendre à fond tous les développements mathématiques de ces transformées. Par contre, il sera important de bien saisir la signification d'un « filtre » qui est une partie intégrante de la profilométrie.

Revenons à l'exemple de la figure 2.2 qui trace trois profils de mesure différents. Les détails de la planéité des profils sont presque imperceptibles dans la figure 2.2 pour les profils non-filtrés. Étonnamment, la figure 2.6, nous montre les trois mêmes profils de la figure 2.2 suite à l'insertion des données dans un filtre qui retire la pente et les longues ondulations de la route.

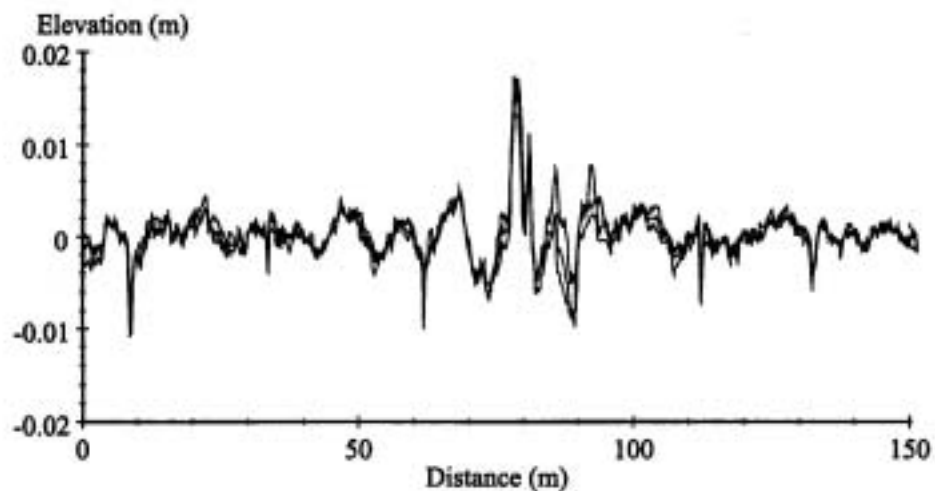


Figure 2.6 Profils filtrés de la figure 2.2.

Nous remarquons un important dos d'âne situé à 80 m. Celui-ci n'est presque pas visible dans la figure 2.2 car les bornes de l'échelle verticale sont trop élevées. Par

contre, avec une échelle de ± 20 mm, la figure 2.6 nous révèle une bonne perturbation qui retiendrait certainement l'attention de plusieurs chauffeurs sur la route.

Afin d'effectuer une analyse spectrale d'un profil d'une piste donnée, nous devons d'abord filtrer le profil selon différentes longueurs d'ondes de façon à pouvoir isoler la proportion de l'IRI attribuable aux différentes plages de longueurs d'ondes. Il existe de nombreux types de filtres pour traiter un signal. Les filtres les plus efficaces pour traiter un signal numérique comme ceux représentés par les profils des chaussées, sont les filtres numériques. Un tel filtre est défini comme étant un algorithme mathématique qui transforme une série de nombres (le signal) en une nouvelle série de nombres.

Il existe également de nombreux filtres numériques dont l'utilité est surtout liée aux domaines associés au génie électrique et mécanique. Puisque l'étude effectuée dans ce rapport consiste à analyser grossièrement la répartition de l'IRI sur les pistes afin d'obtenir une tendance globale, nous n'avons pas besoin d'utiliser un filtre complexe avec une très grande efficacité de traitement. Pour le traitement des pseudo-profilés des pistes de roulement qui nous intéresse, nous avons choisi d'utiliser un filtre relativement simple, que l'on nomme la « moyenne mobile ».

Nous avons choisi ce type de filtre pour ses caractéristiques avantageuses telles que : sa simplicité, sa facilité de programmation et le fait qu'il permette de tracer les graphiques intermédiaires de chacun des pseudo-profilés. Pour un profil $p(j)$ qui a été recueilli à des intervalles Δx , le filtre des moyennes mobiles est défini par la somme suivante :

$$p_{fL}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j)$$

où $p_{fL}(i)$ représente le filtre passe-bas du profil (« low-pass filtered profile »), B est la longueur de base des moyennes mobiles (ou la longueur d'onde étudiée), X est l'intervalle entre deux données et N est le nombre de valeurs comprises dans la sommation. L'effet d'un filtre utilisant la moyenne mobile a pour objectif de réduire les valeurs extrêmes en prenant une moyenne des points sur une étendue B donnée et contribue à lisser la courbe.

Ce filtre consiste en fait à remplacer chaque point du profil par la valeur moyenne d'un certain nombre de points adjacents (en fonction des longueurs d'ondes que l'on désire éliminer du profil). Par exemple, si nous désirons éliminer les longueurs d'onde de moins de 1.2 m, et que les données sont toutes espacées de 0.3 m, nous devons remplacer chaque point du profil par la valeur moyenne de cinq points adjacents. Dans ce cas-ci, nous prendrions, en plus du point considéré, les deux points précédents ainsi que les deux points suivants le point à remplacer. De cette façon, nous perdons alors quatre points du profil initial dans ce processus, soit deux au début du profil et deux à la fin.

Ce filtre a donc pour conséquence d'atténuer le profil en éliminant les longueurs d'onde inférieures, à la longueur d'onde du filtre, dans le profil. Par exemple, si nous utilisons un filtre ayant une longueur d'onde de 3.6 m, les longueurs d'ondes

inférieures à 3.6 m, seront éliminées du profil initial. Par contre, puisque le filtre n'est pas parfait (il n'existe pas de filtre parfait), une partie des longueurs d'ondes qui devraient être éliminées du profil par le filtrage sont encore présentes dans celui-ci après le filtrage. De plus, le filtre peut également entraîner un effet parasite dans le profil en distordant quelque peu le signal restant. Cet effet parasite est plus important lorsque les valeurs d'IRI sont faibles. Mais puisque nous ne voulons obtenir qu'une tendance générale de la répartition de l'IRI sur les pistes, nous nous contenterons de ce type de filtrage.

Dans la plupart des cas, nous sommes peu intéressés à regarder une courbe qui nous indique seulement si la route possède un gradient positif ou négatif. Par contre, il existe beaucoup d'intérêt dans le domaine des chaussées pour les écarts qui existent par rapport à la courbe filtrée. Après tout, ce sont ces écarts qui affectent la qualité des routes et importunent les chauffeurs. Par conséquent, nous pouvons procéder à une simple modification du filtre des moyennes mobiles en soustrayant le profil lissé de l'original :

$$p_{fH}(i) = p(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j)$$

Nous remarquons que dans ce cas, un indice H sera utilisé afin d'identifier un filtre passe-haut (« high-pass filtered profile »).

Le filtre des moyennes mobiles nous procure une méthode simple et intuitive de lisser des courbes qui est facilement programmable. Cette méthode de lissage est aussi très efficace comme méthode de calcul car aussitôt que le premier point moyen est calculé, les valeurs subséquentes peuvent être obtenues par le biais de la relation suivante :

$$p_{fL}(i) = p_{fL}(i-1) + \frac{1}{N} \left[p\left(i + \frac{B}{2\Delta X}\right) - p\left(i - \frac{B}{2\Delta X} - 1\right) \right]$$

Ainsi, même si la moyenne couvre des centaines de points, nous n'avons qu'à nous préoccuper des profils d'entrée et de sortie des intervalles.

2.3 Nombre d'ondes (cycle / unité de longueur)

Afin de mieux interpréter les résultats de l'analyse des profils des pistes de roulement, il est important de bien définir les termes utilisés pour décrire un déplacement sinusoïdal. Une courbe sinusoïdale telle que représentée à la figure 2.7 est caractérisée par sa longueur d'onde (λ), son amplitude (A) et la phase (X_0).

$$Y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(X - X_0)\right)$$

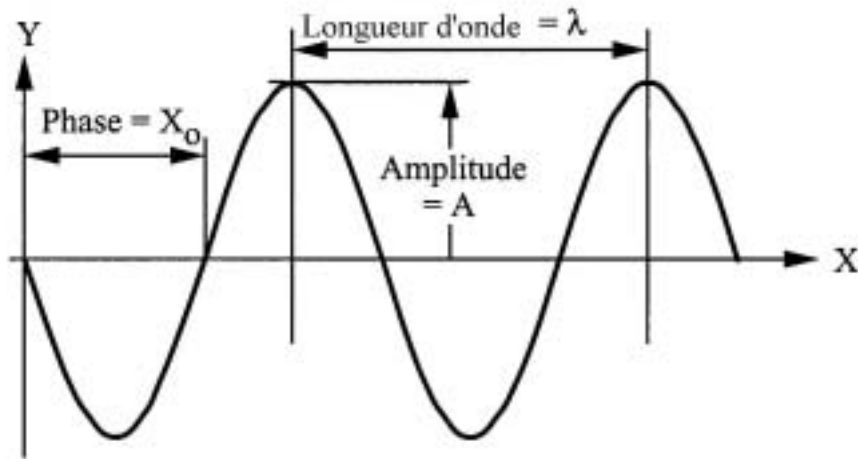


Figure 2.7 Graphique représentant la forme sinusoïdale.

Une méthode alternative afin d'identifier les valeurs sur l'abscisse des graphiques consiste à déterminer le nombre de cycles que renferme chaque unité de longueur. Pour plusieurs applications lors d'un traitement de signal, la forme sinusoïdale est définie en fonction du temps, plutôt que la distance, et la norme consiste à définir un mouvement sinusoïdal en fonction de la fréquence des cycles par seconde, appelée Hertz (Hz). Néanmoins, lorsque le mouvement sinusoïdal est défini en fonction de la distance, la fréquence des cycles par longueur est appelée **nombre d'ondes** $\nu = 1 / \lambda$. Dans le domaine de la profilométrie, le « nombre d'ondes » est souvent utilisé car il spécifie le nombre de cycles par unités de longueur (cycle/m ou cycle/pi).

2.4 Indice de planéité IRI (« *International Roughness Index* »)

L'indice de planéité IRI a été proposé par la Banque Mondiale de développement (« World Bank ») dans les années 1980. Celui-ci est utilisé par le Federal Highway Administration au États-Unis (comparable au Ministère des transports du Canada) depuis 1990. Dans le but de développer un indice de mesure de l'uni des chaussées qui serait commun à tous les pays du monde, la Banque Mondiale de développement a organisé un grand événement baptisé « The International Road Roughness Experiment » en 1982. Plusieurs appareils de mesure ont été testés sur différentes pistes d'essais et on a pu remarquer la similitude des divers appareils après calibration à un étalon commun. On retient finalement comme roulemètre étalon, un modèle mécanique développé par l'Institut de Recherche en Transport de l'Université du Michigan « l'UMTRI », que l'on nomme « *golden-car* ». On a alors défini l'indice

IRI comme étant la réponse que produirait le roulemètre étalon s'il circulait à une vitesse de 80 km/h sur la chaussée.

L'indice IRI est facile à calculer. Il est exportable sur tous les appareils de mesure et il est très stable en fonction du temps. L'indice simule un quart de véhicule qui se déplace sur le profil mesuré. Donc, le IRI n'est qu'un filtre basé sur un modèle mathématique d'un quart de véhicule montré en figure 2.8. Le filtre calcule les déflexions des suspensions et effectue une simulation d'un système mécanique comparable à une automobile. Les mouvements de la suspension sont enregistrés (additionnés) et divisés par la distance parcourue afin d'établir un indice qui possède les unités d'une pente (normalement des m/km ou des po/mi, etc.).

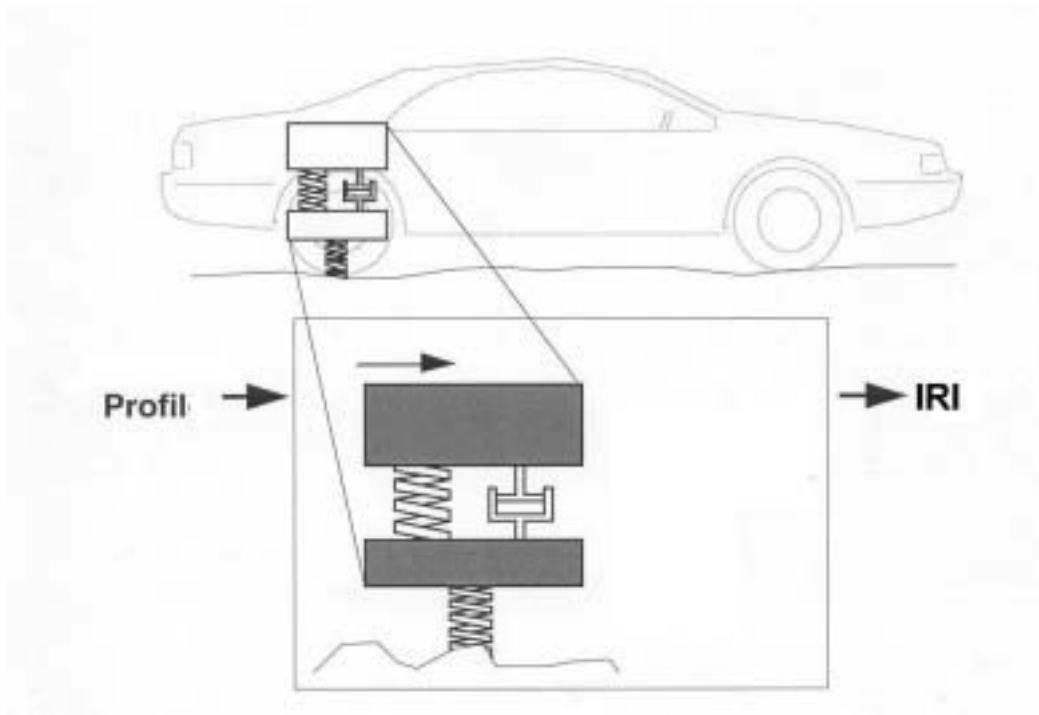


Figure 2.8 Représentation mécanique de l'indice IRI.

Le modèle de quart de véhicule utilisé à l'intérieur de l'algorithme de l'IRI est exactement ce que son nom implique : le modèle d'un coin (un quart) de véhicule. Il contient un pneu représenté par un ressort vertical, la masse de l'essieu supportée par le pneu, un ressort et amortisseur qui représentent la suspension, et la masse du solide qui repose sur la suspension.

Le modèle d'un quart de véhicule est ajusté afin de maximiser la corrélation avec une réponse type d'un système de mesure de planéité. Les paramètres utilisés à l'intérieur de l'algorithme sont choisis de façon à obtenir des simulations comparables à la performance de la plupart des automobiles sur nos routes. Le seul paramètre qui est différent de celui d'un véhicule est le coefficient d'amortissement qui est supérieur à celui que nous retrouvons dans la plupart des systèmes de suspension. Ce paramètre élevé sert à prévenir la résonance avec certaines portions de profils.

En somme, l'indice de planéité **IRI** (« **I**nternational **R**oughness **I**ndex ») comporte certains avantages tels que :

- il est comparable dans le temps ;
- il est applicable à tous les types de route et de piste ;
- il peut être calculé à partir de relevés réalisés avec n'importe quel type d'appareil ;
- il bénéficie d'une reconnaissance internationale.

Malgré ces avantages, l'IRI possède tout de même certaines limites. L'IRI ne fournit qu'un indice global pour représenter la dégradation de l'ensemble du tronçon de piste étudié. Puisque l'IRI est le résultat de l'effet de l'ensemble des déformations d'une surface de chaussée par rapport à son profil longitudinal théorique, celui-ci ne fournit alors aucune indication réelle concernant le type de dégradation que l'on retrouve sur la piste. En effet, un même indice de planéité peut représenter une piste affectée par de très courtes ondulations aussi bien qu'une piste affectée par des ondulations de plus grandes longueurs d'ondes. Il est par conséquent impossible de déterminer la ou les causes de la dégradation de la piste à partir de l'IRI.

2.5 Indice de qualité de route RN (« Ride Number »)

Depuis le début des années soixante, les ingénieurs responsables des chaussées ont toujours été intéressés par l'opinion du public sur la qualité du confort de nos routes. L'indice de qualité de route RN est un indice qui identifie le niveau de planéité basé sur l'opinion de plusieurs techniciens. Une étude de Janoff et son équipe en 1980 devait déterminer de quelle façon les profils de route étaient reliés à l'opinion subjective des chauffeurs. Ils ont donc développé un formulaire de type sondage (« MPR » pour « mean panel rating ») qu'ils distribuaient aux techniciens qui travaillaient à la réfection des routes et ils compilaient les résultats pour différents tronçons de route. L'échelle utilisée était simple et variait de 0 à 5, 5 étant un profil parfait et 0 étant le maximum de défauts de planéité possible. L'état de la route était évalué et compilé en utilisant le barème suivant ; de 4 à 5 - excellent, de 3 à 4 - très bon, de 2 à 3 - bon, de 1 à 2 - acceptable et de 0 à 1 - non acceptable. À ce moment, l'indice de planéité IRI n'avait pas encore été développé.

En 1995, une autre étude devait permettre de développer un algorithme mathématique afin d'obtenir l'indice de qualité de route RN. Cette méthode devait aussi être exportable comme l'indice IRI mais surtout utilisé pour prédire la qualité de la route (« MPR ») de 0 à 5. Le logiciel fut vérifié et validé sur différents profils avec plusieurs instruments dont le profilomètre inertiel de K.J. LAW. Le logiciel ROADRUF exploite ce nouvel algorithme.

2.6 Densité spectrale de puissance (DSP)

Au chapitre 4, nous pourrions constater que le profil des pistes de roulement du métro de Montréal ne ressemble en rien à un mouvement sinusoïdal. Par contre, celui-ci renferme une multitude de forme sinusoïdale que nous pouvons additionner dans le but de reconstituer le profil exact. La figure 2.9 démontre bien ce phénomène. Par exemple, la fonction échelon de la figure 2.9 peut être reconstituée mathématiquement en additionnant une série de forme sinusoïdale avec différentes longueurs d'ondes, amplitudes et phases.

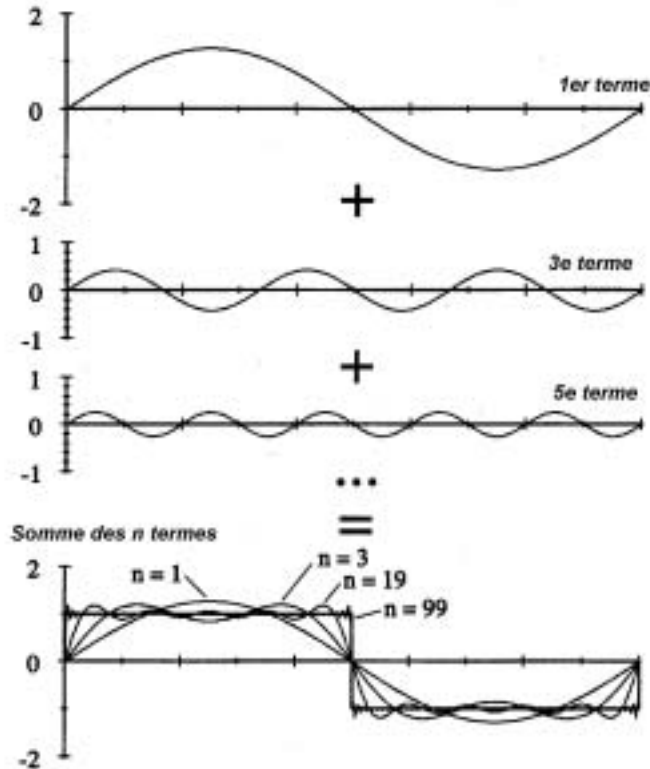


Figure 2.9 Reconstitution d'une fonction échelon à partir de formes sinusoïdales.

La densité spectrale de puissance (DSP) est une représentation statistique de l'importance des divers nombres d'ondes. Par définition, la fonction DSP [6] représente la moyenne des carrés des valeurs de la partie d'une élévation qui passe par un filtre à bande étroite de fréquence centrale donnée, par unité de largeur de bande lorsque cette largeur de bande tend vers zéro et le temps vers l'infini. Il faut noter que la densité spectrale de puissance est un terme générique employé sans se soucier de la grandeur physique représentée dans le temps. Par exemple, lorsque l'on veut décrire le spectre d'accélération, on utilise librement le terme densité spectrale d'accélération. Pour un régime stationnaire, la densité spectrale de puissance est le double de la transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation [6]. Dans le domaine de la profilométrie, la densité spectrale de puissance représente simplement la distribution de la variance en fonction des nombres d'ondes.

La fonction DSP a initialement été développée afin de caractériser les sources de voltages. Heureusement, les mêmes artifices de calcul ont pu être appliqués sur les profils des chaussées. Il existe deux différences majeures entre le DSP du profil des chaussées et celui du voltage; (1) la variance possède des unités d'élévation aux carrés, plutôt que de voltage aux carrés, et (2) la distribution s'effectue en fonction des nombres d'ondes (cycles/m) plutôt que de la fréquence (cycles/sec). Notons aussi que la densité spectrale de puissance (DSP) ne possède aucune relation avec la « puissance » proprement dite. Le terme puissance provient des premières applications de cette fonction en électronique car la variance du voltage était proportionnelle à la puissance dans une résistance et, ainsi, la DSP représentait la

distribution de la « puissance électrique » versus la fréquence. Par conséquent, la DSP des profils des chaussées n'a aucune relation avec la puissance.

A titre d'exemple, examinons deux profils de chaussées, tracés dans la figure 2.10, avec des indices de planéité similaires mais avec des profils différents. Le profil du site 4 possède de longues ondulations typiques des routes bitumineuses tandis que le site 7 démontre moins de fluctuations avec plus d'aspérités. La figure 2.11 trace la fonction DSP pour chacune des courbes du site 4 et du site 7. À première vue, les deux courbes DSP sont très similaires. Néanmoins, puisque les amplitudes DSP renferment plusieurs niveaux d'élévations, nous remarquons qu'en général les amplitudes DSP sont supérieures pour des petits nombres d'ondes et diminuent au fur et à mesure que le nombre d'ondes croît. Même avec ces tendances communes, nous pouvons facilement déceler que la courbe du site 4 génère de plus grandes amplitudes que la courbe du site 7 pour des nombres d'ondes inférieurs à 0.08 cycle/m ce qui correspond aux ondulations visibles de la figure 2.10. Par contre, la courbe du site 4 semble posséder des amplitudes inférieures à la courbe du site 7 pour des nombres d'ondes supérieurs à 0.2 cycle/m.

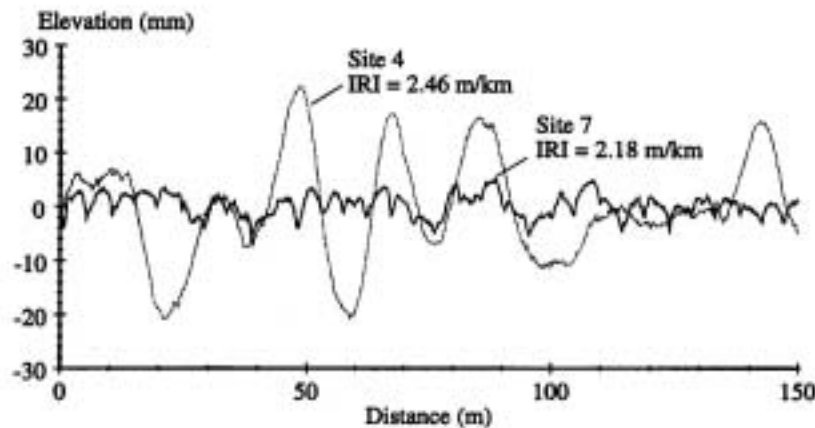


Figure 2.10 Tracés de deux profils avec des IRI sensiblement similaires.

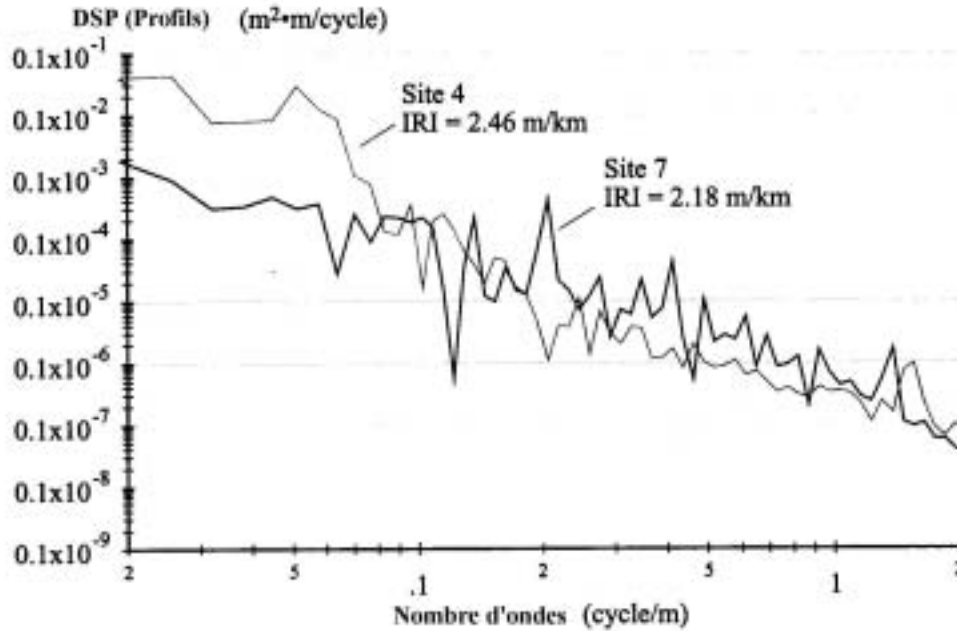


Figure 2.11 Tracés de la fonction DSP pour les profils des sites 4 et 7.

La relation exacte entre l'amplitude et le nombre d'ondes (ou son inverse, la longueur d'onde) varie d'un profil à l'autre. Par contre, tous les profils de chaussées démontrent la même tendance, que l'amplitude décroît rapidement avec le nombre d'ondes. Ainsi, les spécialistes dans le domaine exploitent fréquemment la **DSP de la pente** plutôt que la DSP du profil. En effet, il est possible de générer la fonction DSP pour les dérivées (pentes) des profils d'élévations. La fonction DSP de la pente représente mieux les différences qui existent en terme de confort car elle uniformise le spectre des défauts de planéité sur l'étendue des nombres d'ondes. La figure 2.12 représente les fonctions DSP de pentes pour notre exemple (sites 4 et 7).

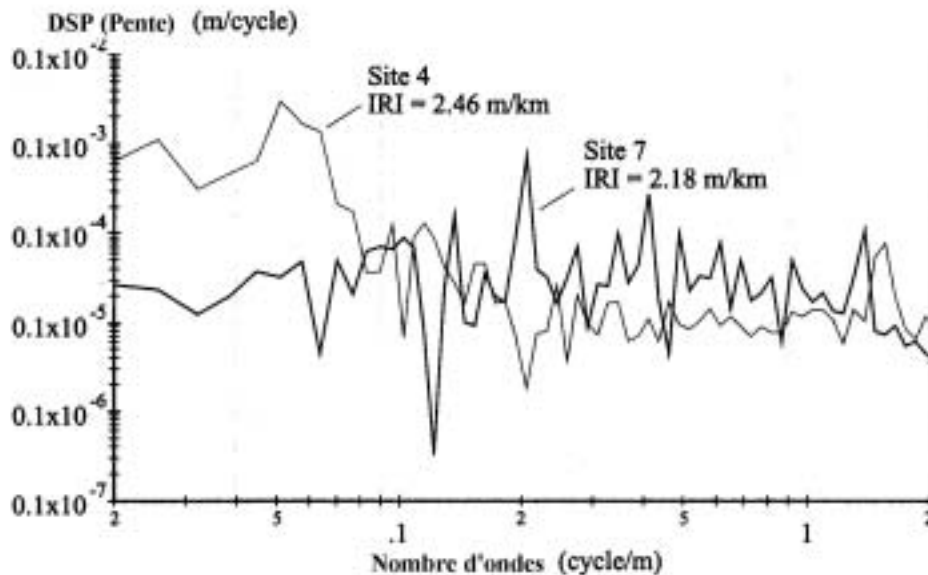


Figure 2.12 Tracés de la fonction DSP pour les pentes des sites 4 et 7.

De la figure 2.12, nous pouvons clairement identifier que le site 4 possède un niveau de défaut de planéité plus important pour les nombres d'ondes inférieurs à 0.08 cycle/m, et devient moins rugueux entre 0.2 et 1 cycle/m.

2.7 La qualité de roulement

Les définitions des indices de planéité et d'analyses spectrales nous amènent à discuter des notions de « confort ». Les spécialistes des chaussées tentent continuellement d'amasser de l'information sur la qualité des routes qui pourrait éventuellement les aider à estimer la satisfaction du public en terme de « confort » sur nos routes. Malheureusement, le jugement du public dépend en grande partie de l'expérience personnelle de chacun des conducteurs à l'intérieur de leur automobile. Donc, il est difficile de déterminer le degré de perception des imperfections que pourra ressentir un utilisateur et son estimation (favorable ou non) de la qualité de la chaussée.

Les ingénieurs mesurent souvent les accélérations sur les sièges à l'intérieur des véhicules afin d'évaluer la performance des suspensions. Ces mesures servent à déterminer et à contrôler les plages des fréquences des vibrations les plus nocives pour le corps humain. Plusieurs études sur le sujet ont été effectuées [7,8] (dont celle récemment de l'IRSST [9,10]). La figure 2.13, tiré des normes ISO – 1997 (International Standard Organization) [11], illustre bien le niveau de sensibilité du corps humain aux vibrations verticales (sur le graphique de gauche) et le niveau de sensibilité du corps humain aux vibrations transversales (sur le graphique de droite).

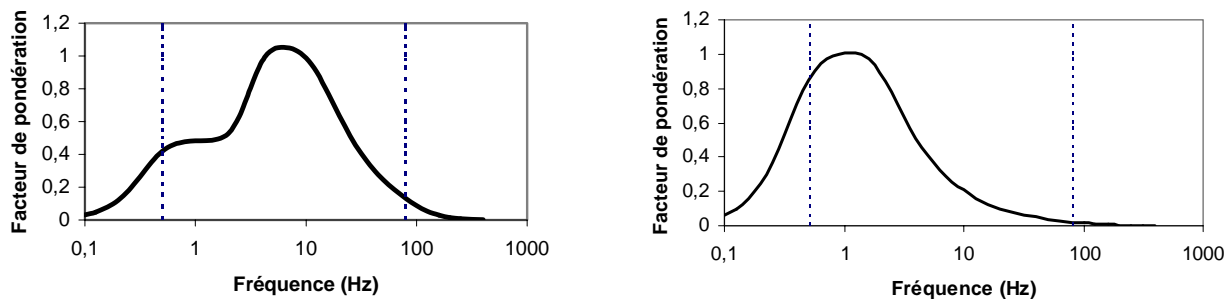


Figure 2.13 Niveau de sensibilité du corps humain aux vibrations verticales (à gauche) et transversales (à droite).

Il est généralement bien connu dans le domaine de la santé et sécurité au travail que le corps humain possède très peu de tolérance aux vibrations verticales aux environs de 6 - 7 Hz car, à cette fréquence, la cavité abdominale de l'humain entre en résonance avec le système de suspension. Par conséquent, les véhicules sont conçus de façon à minimiser les effets de transmission de la route en déplaçant les fréquences des suspensions entre 1 - 2 Hz et la résonance de sautellement des roues entre 10 - 15 Hz. Notons que pour des conditions de vibrations verticales très faibles, la sensibilité du corps humain près de 5 Hz est moins importante. Pour de faibles accélérations verticales, la sensibilité du corps humain a tendance à s'élargir en terme de fréquences aux alentours de 5 Hz, comme nous le démontre la figure 2.14 [4].

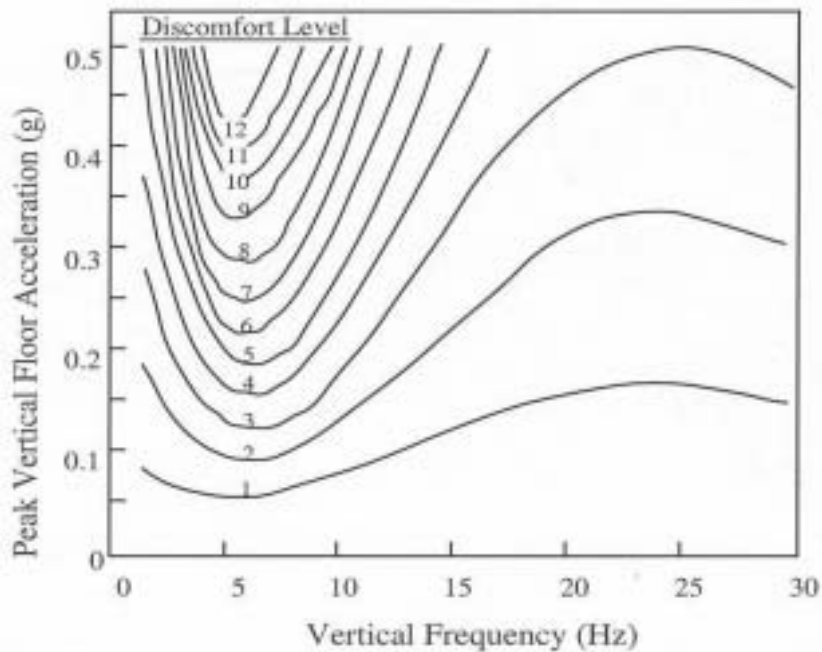


Figure 2.14 Niveaux de non confort pour des accélérations verticales.

Au niveau le plus élémentaire, les véhicules s'apparentent au modèle d'un quart de véhicule tel que montré en figure 2.15. La suspension et la souplesse des pneus contribuent à isoler le corps humain des hautes fréquences d'excitation que nous retrouvons sur les chaussées.

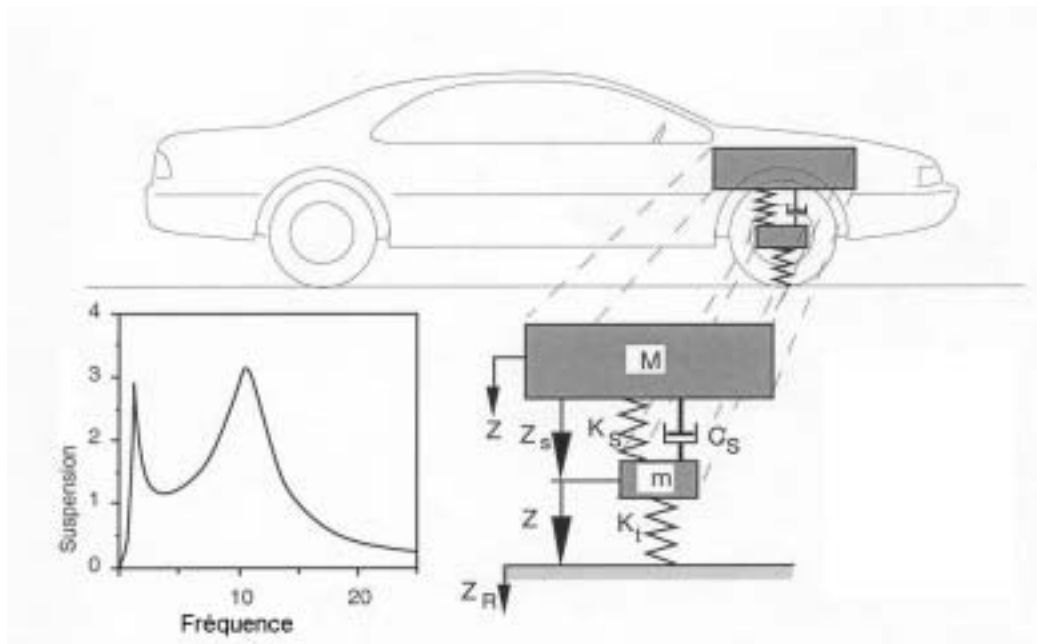


Figure 2.15 Le quart de véhicule possède des caractéristiques dynamiques similaires à une automobile.

Les filtres de quart de véhicule ne dépendent pas de la géométrie. Ceux-ci sont plutôt fonction de la dynamique temporelle. Nous pouvons affirmer que la réponse en fréquence d'un véhicule est presque indépendante de la vitesse, si la fréquence est définie avec des unités de cycle/sec. Néanmoins, si nous la traitons en fonction des

nombre d'ondes, alors la réponse dépend directement de la vitesse à partir de la relation suivante :

$$f = Vv = \frac{V}{\lambda}$$

où f représente la fréquence en cycle/sec, V est la vitesse en m/sec, v est le nombre d'ondes en cycle/m et λ est la longueur d'onde.

La figure 2.16 représente la performance d'une suspension typique afin de limiter l'effet de transmissibilité (capacité d'isoler le véhicule). Lorsque l'accélération spectrale du défaut de planéité de la chaussée, sur la figure 2.16 à gauche, est introduite à l'intérieur du filtre de la suspension, nous obtenons une accélération spectrale, à droite sur la figure 2.16, pour le véhicule. La courbe du milieu de la figure 2.16 représente la réponse en fréquence du véhicule avec le gain exprimé en unités DSP. Même si l'accélération d'entrée est amplifiée près de 1 Hz, les autres accélérations au-delà de cette fréquence sont fortement atténuées. Nous observons aussi une deuxième pointe d'accélération près de 10 Hz qui est causée par le sautiller des pneus (« wheel-hop resonance »). Finalement, nous remarquons une importante diminution des vibrations aux environs de 5 Hz, sur la figure 2.16 à droite, qui est la fréquence pour laquelle le corps humain est le plus sensible.

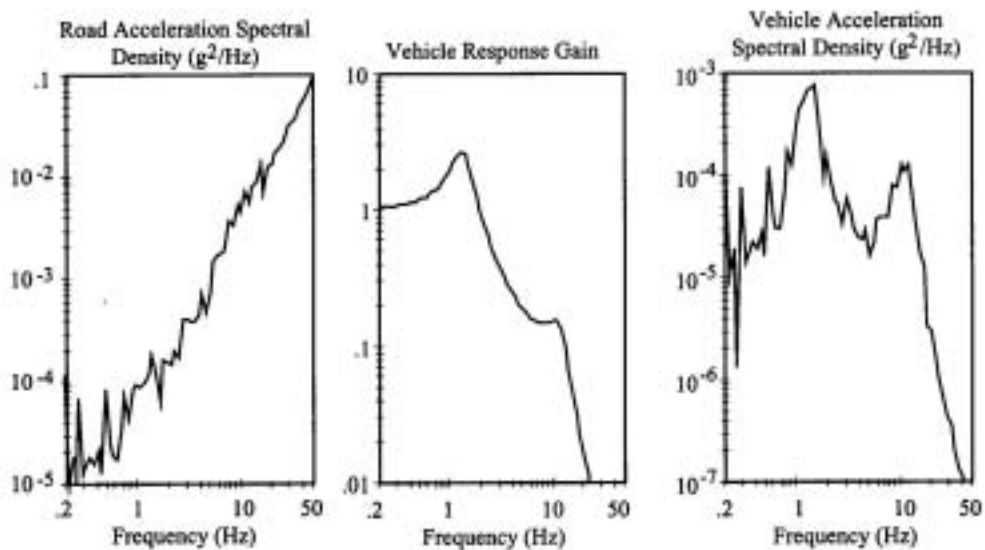


Figure 2.16 Réponse en fréquence typique d'une suspension.

3 Le logiciel « ROADRUF »

Le logiciel ROADRUF représente un ensemble d'outils informatiques utilisés pour l'analyse et l'interprétation des données des profils longitudinaux des chaussées. La figure 3.1 est une réplique identique de l'écran initial de ROADRUF et démarre les différentes fonctions du logiciel.

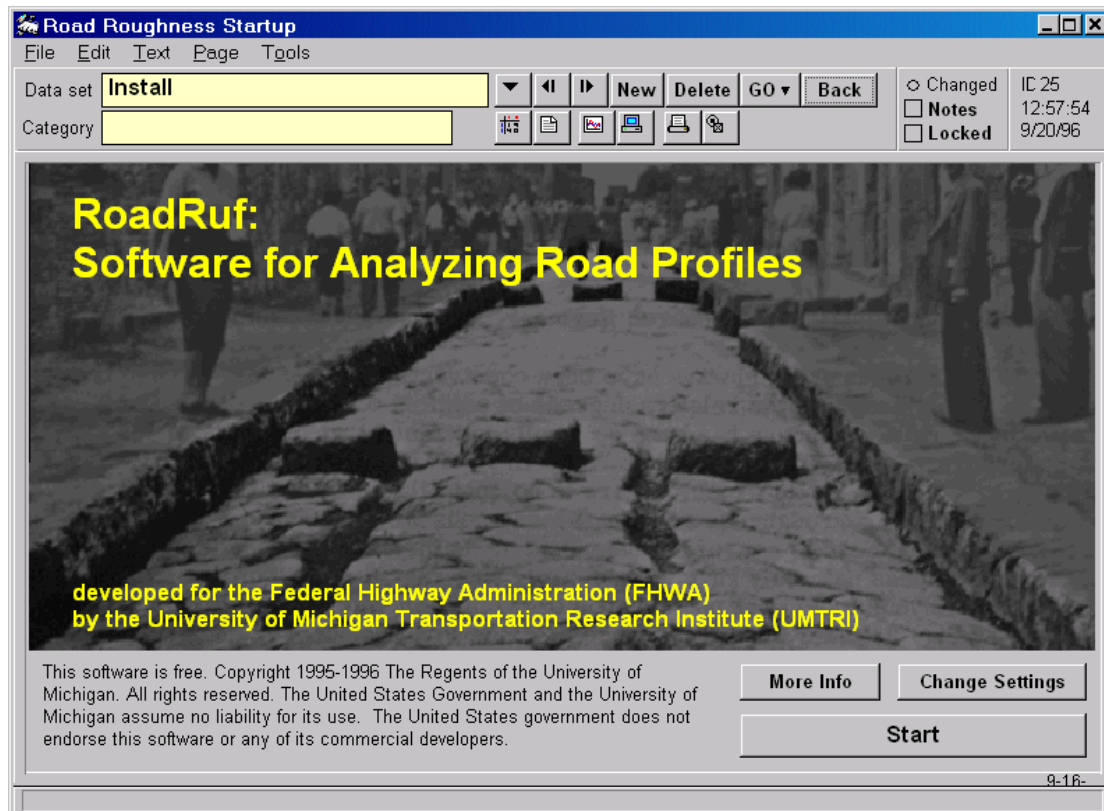


Figure 3.1 Écran initial du logiciel ROADRUF.

En appuyant sur le bouton « start », nous obtenons l'écran d'analyse de ROADRUF, représenté à la figure 3.2, qui gère l'accès aux profils des données, aux tracés des courbes et aux filtres mathématiques.

3.1 Objectifs du logiciel ROADRUF

Un des objectifs du logiciel consiste entre autres à calculer les indices de planéité IRI et l'indice de qualité de route RN dans un environnement simple et convivial (« user friendly ») pour l'utilisateur. En plus d'effectuer des analyses des indices IRI et RN, le logiciel est capable de tracer une multitude de courbes X-Y avec une variété de filtres et d'effectuer des analyses spectrales.

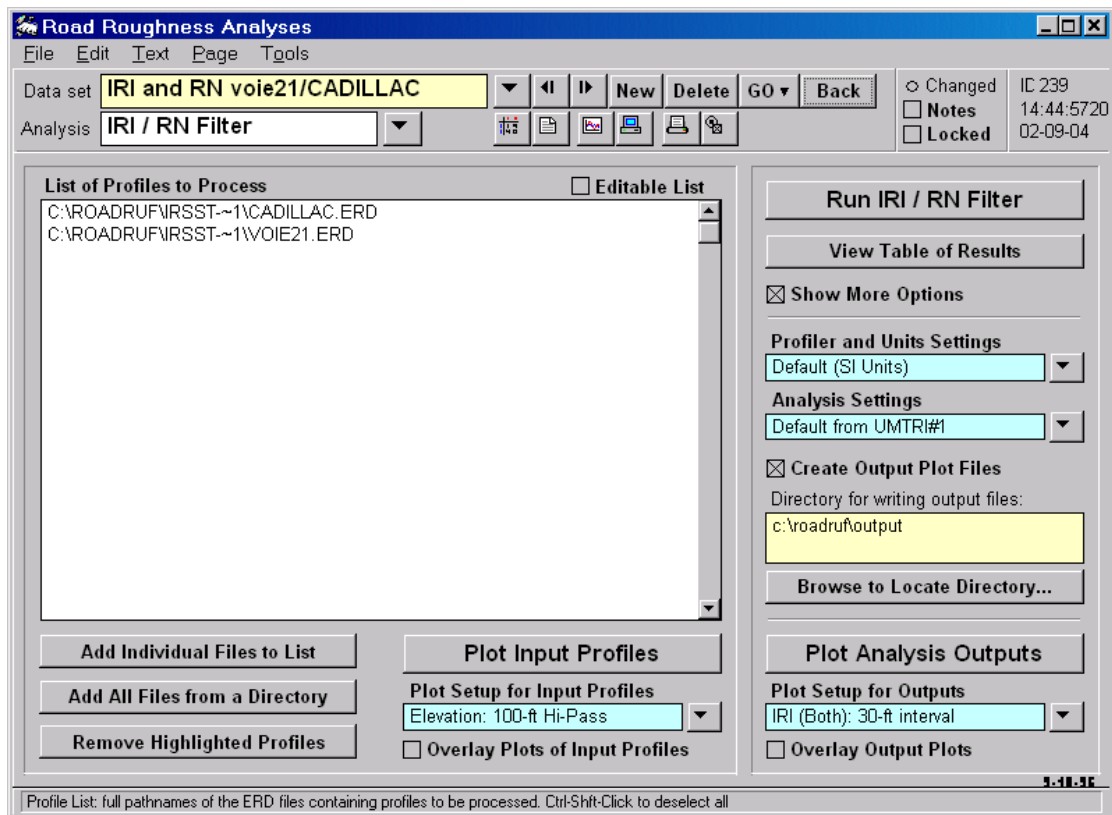


Figure 3.2 Écran d'analyse du logiciel ROADRUF.

Le logiciel est facile d'utilisation puisque celui-ci exploite un système graphique interactif (« graphical user interface, GUI »). Dans l'ensemble, ces outils permettent facilement à un novice dans le domaine de la profilométrie des chaussées (1) de tracer une multitude de courbes de même profil en utilisant différents instruments de mesure, (2) de calculer les indices IRI et RN de plusieurs profils simultanément, (3) de générer des ensembles de courbes superposés, (4) d'appliquer des filtres passe-haut et passe-bas à différents profils, (5) d'identifier des mesures de profils erronés et de localiser d'importantes perturbations, (6) de visualiser les ondulations et fréquences des profils en effectuant une analyse spectrale, et (7) de calculer les indices des profils par rapport au nombre d'onde (« wave number »).

L'utilisation du logiciel est très simple. Il s'agit de bien choisir les fichiers à analyser en se servant des boutons qui donnent accès aux fichiers des profils à traiter comme le démontre la figure 3.3. Suite à l'insertion de la liste des fichiers dans le logiciel, il devient possible de tracer les profils enregistrés tel que montré dans la figure 3.4. Par la suite, il s'agit de bien identifier les paramètres qui seront utilisés pour l'analyse des profils que nous retrouvons à la figure 3.5. Nous pouvons constater qu'il existe une multitude de paramètres disponibles qui peuvent être modifier à plusieurs endroits à l'intérieur du logiciel. Finalement, lorsque les paramètres sont fixés, il est possible d'effectuer quatre types d'analyses ; (1) IRI et RN, (2) quart de véhicule, (3) Butterworth et (4) spectrale. La figure 3.6 représente, à titre d'exemple, des analyses IRI et RN effectuées par les ingénieurs de l'UMTRI.

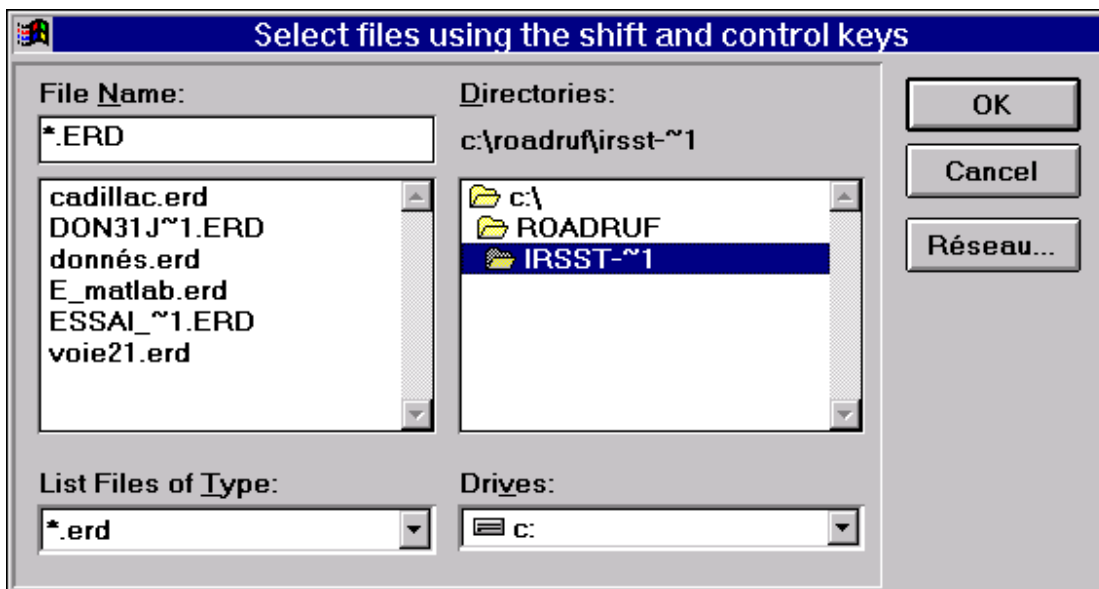


Figure 3.3 Sélection des fichiers .ERD pour le logiciel ROADRUF.

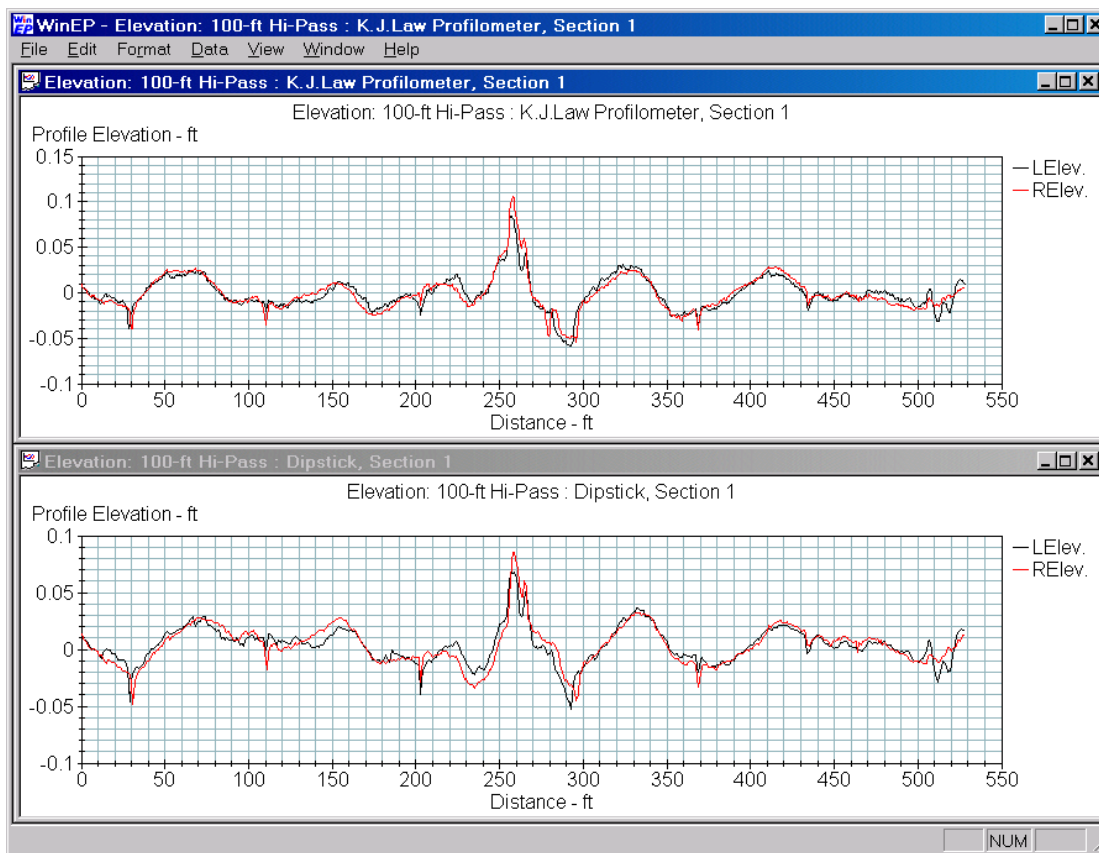


Figure 3.4 Représentations graphiques du même profil avec dipstick et laser K.J. Law.

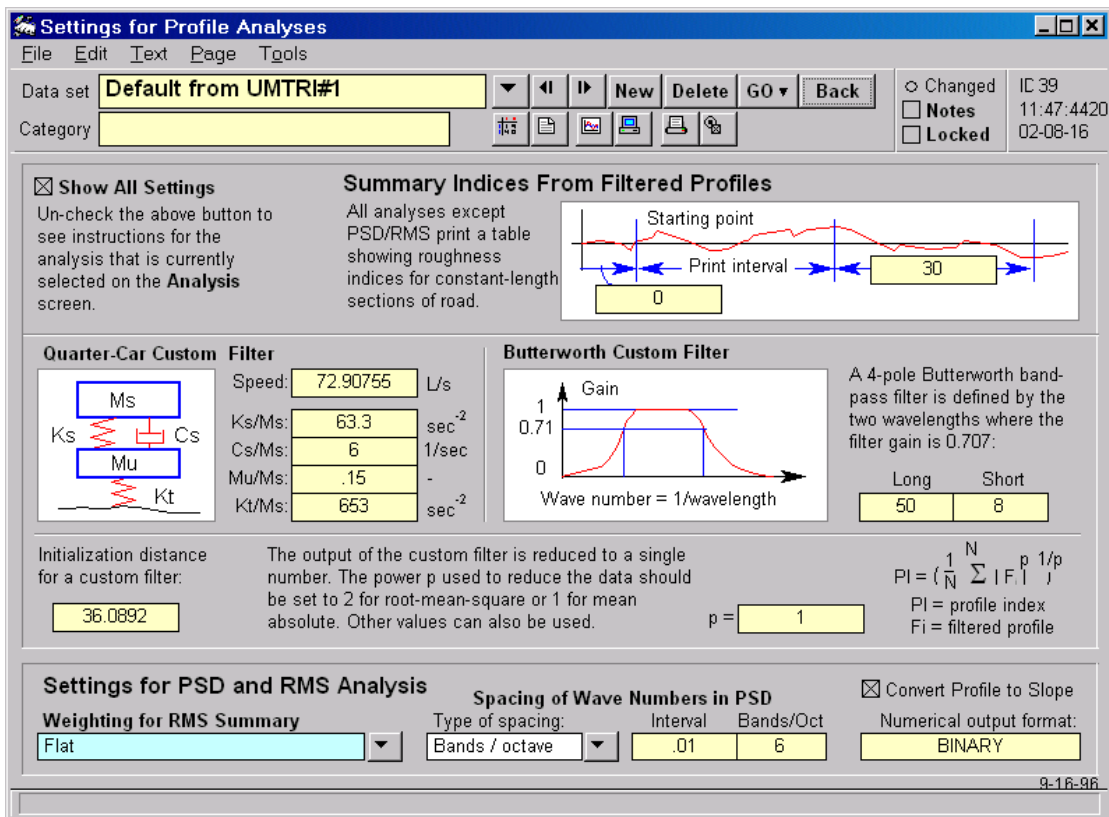


Figure 3.5 Quelques paramètres disponibles du logiciel ROADRUF.

Filename	Start: ft	End: ft	IRI: LElev.	(in/mi) RElev.	RN: 0-5 LElev.	RElev.	Both
C:\ROADRUF\PROFILES\TUTORIAL\DIPSTKS1.ERD							
	.00	528.00	165.92	142.85	2.67	2.71	2.69
	.00	100.00	135.83	97.31	2.65	2.95	2.79
	100.00	200.00	107.96	104.67	3.44	3.20	3.31
	200.00	300.00	315.55	313.03	1.79	1.73	1.76
	300.00	400.00	119.79	134.57	3.42	3.27	3.34
	400.00	500.00	84.18	74.24	3.65	3.44	3.54
	500.00	528.00	378.99	104.23	2.09	3.54	2.58
C:\ROADRUF\PROFILES\TUTORIAL\KJLAW1.ERD							
	.00	528.50	183.32	165.33	2.65	2.64	2.65
	.00	100.00	127.05	106.45	2.98	3.17	3.07
	100.00	200.00	111.71	120.95	3.48	3.21	3.34
	200.00	300.00	371.79	371.06	1.78	1.57	1.67
	300.00	400.00	146.07	158.37	3.02	3.06	3.04
	400.00	500.00	91.76	80.58	3.39	3.61	3.49
	500.00	528.50	410.73	114.09	1.92	3.31	2.40

Figure 3.6 Résultats des calculs pour les indices IRI et RN.

Le logiciel ROADRUF est facile à utiliser et très versatile. Il permet au personnel responsable de l'évaluation des chaussées d'obtenir les indices de planéité et d'effectuer rapidement plusieurs types d'analyse. Il a été conçu afin d'établir une norme dans le domaine de la profilométrie des chaussées. Les algorithmes utilisés dans le logiciel sont les mêmes qui ont été exploités durant des années par les chercheurs de l'UMTRI (Sayers, Karamihas et Gillespie). Les algorithmes IRI et RN sont utilisés à travers le monde et ont été adoptés par la société ASTM (« American Society for Testing and Materials ») ainsi que le « Federal Highway Administration » comme des nouveaux critères de référence pour l'analyse longitudinal des profils.

3.2 Propriétés des indices IRI et RN

Comme il a été mentionné auparavant, l'indice de planéité IRI est un indicateur qui permet de mesurer le confort de roulement. Il indique le cumul des dénivellations le long des traces de roues sur un segment de piste (en m/km). Notons que l'indice IRI est influencé par des nombres d'ondes variant de 1.2 à 30.5 m (4 à 100 pieds). Donc, l'uni ne considère que les irrégularités dues aux longueurs d'ondes affectant la sécurité et le confort des usagers. En effet, le graphique de la figure 3.7 montre l'accroissement adimensionnel (ou le gain) de la déformation de la réponse du quart de véhicule selon les nombres d'ondes des défauts d'uni du profil.

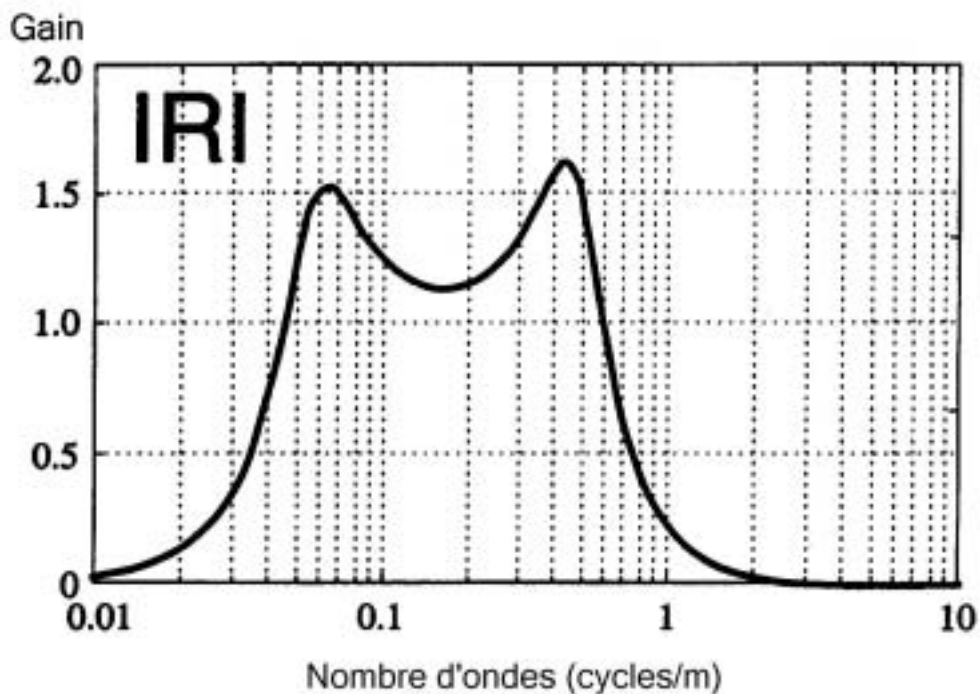


Figure 3.7 Gain adimensionnel des pentes pour l'indice IRI.

Comme on peut le voir sur la figure 3.7, le filtre IRI possède une sensibilité maximale au environ de 0.065 cycle/m (pour une longueur d'ondes de 15 m) et 0.42 cycle/m (pour une longueur d'ondes de 2.4 m). Le système élimine une très grande partie des longueurs d'ondes inférieures à 1.25 m (nombre d'ondes de 0.8 cycle/m), tout comme celles supérieures à 30.5 m (nombre d'ondes de 0.033 cycle/m), car la réponse produira un gain inférieur à 0.5 .

Notons aussi que l'échelle de l'indice IRI est proportionnelle au degré de défaut de planéité des profils. Si toutes les valeurs d'un profil mesuré sont augmentées d'un certain pourcentage, alors l'indice IRI augmentera exactement du même pourcentage.

Chacun des profils est filtré avec une moyenne mobile. La moyenne mobile consiste en un filtre passe-bas avec une longueur de base de 250 mm (9.85 po). Ces profils sont par la suite traduits en indice IRI qui représente le comportement d'une suspension standardisée d'un quart de véhicule parcourant le profil mesuré avec une vitesse de 80 km/h. Les paramètres du quart de véhicule pour l'indice IRI sont :

$$\frac{k_s}{m_s} = 63.3 \quad , \quad \frac{k_t}{m_s} = 653 \quad , \quad \frac{c}{m_s} = 6 \quad , \quad \frac{m_u}{m_s} = 0.15$$

En utilisant ces paramètres, le logiciel ROADRUF fournit une valeur unique pour chaque tronçon de piste. C'est donc sur la base de cette valeur que seront interprétés les résultats concernant la qualité des pistes de roulement du métro de Montréal.

Nous savons aussi que l'indice de qualité de route RN exploite les mêmes méthodes de base pour filtrer les profils. Néanmoins, l'indice RN calcule une valeur entre 0 pour une défaut d'uni maximale et 5 pour une surface parfaite. Notons de plus que l'indice RN est une transformée nonlinéaire d'un autre indice PI (« profile index »). Comme nous pouvons le constater sur la figure 3.8, les indices PI et RN sont sensibles à des longueurs d'ondes plus courtes que l'IRI.

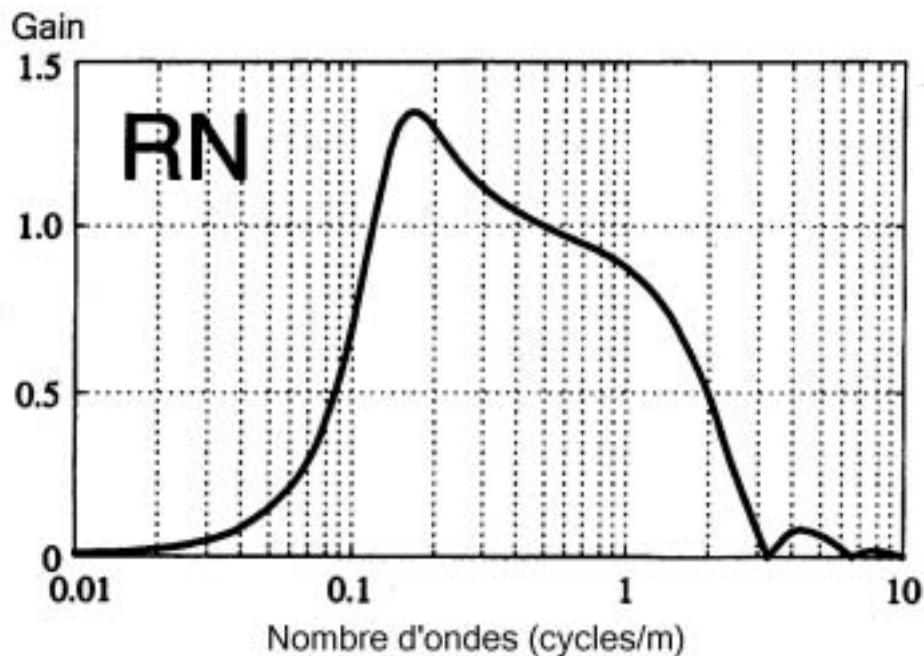


Figure 3.8 Gain adimensionnel des pentes pour l'indice RN.

Il est possible de calculer l'indice de qualité de route RN pour une ou deux portions de profil simultanément. Tout comme l'indice IRI, le profil est filtré par une moyenne

mobile avec une longueur de base de 250 mm (9.85 po). L'indice RN exploite le même modèle dynamique d'un quart de véhicule. Néanmoins, des coefficients différents sont utilisés afin de se maintenir à l'intérieur d'une plage utile, telle que montrée à la figure 3.8. Les nouveaux paramètres du quart de véhicule pour l'indice RN sont donc :

$$\frac{k_s}{m_s} = 390 \quad , \quad \frac{k_t}{m_s} = 5120 \quad , \quad \frac{c}{m_s} = 17 \quad , \quad \frac{m_u}{m_s} = 0.036$$

En premier lieu, le profil filtré calcule une valeur efficace (valeur RMS, « Root Mean Square value ») qui est l'indice PI en unité de pente adimensionnelle (m/m). L'indice PI est par la suite transformé en indice RN avec l'aide de l'équation suivante :

$$RN = 5 e^{-160 (PI)}$$

Si nous traitons un seul profil, l'indice PI sera transformé directement. Par contre, si nous voulons évaluer deux profils simultanément (profils de gauche et de droite), nous devons effectuer une moyenne à partir de l'équation suivante :

$$PI = \sqrt{\frac{PI_g^2 + PI_d^2}{2}}$$

Les détails de tous les calculs pour l'obtention de l'indice RN sont programmés à l'intérieur du logiciel ROADRUF.

4 Analyse des résultats

Lors de nos études de défaut d'uni pour les pistes de roulement du métro de Montréal, nous avons utilisé un dipstick manuel du Ministère des transports du Québec. Nous l'avons utilisé lors de deux séances de prélèvement qui ont eu lieu le 15 août et le 19 août 2002. La première séance de mesure du 15 août était localisée sur la voie 21 de la ligne 5 sur la file intérieur gauche entre les points kilométriques 0830 et 0950 (120 m) que nous appellerons « VOIE 21 » (voir annexe B). La deuxième séance de mesure avait lieu entre les stations de métro Cadillac et Langelier sur la voie 1 de la ligne 1 sur la file intérieur gauche entre les points kilométriques 41 670 et 41 790 (120 m) que nous appellerons « CADILLAC » (voir annexe C).

4.1 Logiciel ROADRUF

A partir de l'ordinateur HP-200 du dipstick, nous avons dû transformer les listes des données recueillies et les modifier en fichier .ERD afin que ces listes soient lisibles et accessibles pour le logiciel ROADRUF. La figure 4.1 représente les données filtrées pour les mesures prélevées sur la voie 21. Dans ce cas, le profil est relativement plat et nous observons que les minima et maxima des élévations varient entre -3.5 mm et 11 mm sur une distance de 120 m. A première vue, le profil semble très irrégulier et dentelé avec beaucoup d'aspérités mais ceci est causé par la petite échelle de 12 mm à l'ordonnée versus une échelle de 120 m sur l'abscisse qui crée un facteur d'agrandissement de $120/0.012 = 10,000$ sur l'axe verticale.

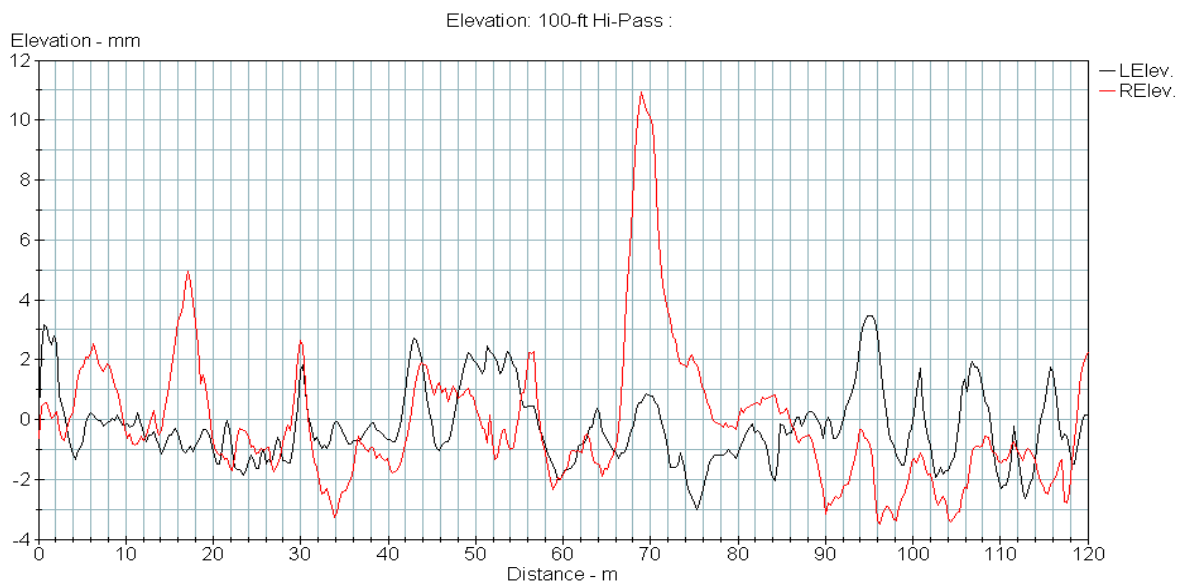


Figure 4.1 Élévations de droite et de gauche des mesures prélevées sur la voie 21.

La figure 4.2 trace le profil filtré des pistes de roulement près de la station Cadillac. Ici, nous remarquons une importante dépression au début des lectures qui influencera très peu le niveau de planéité des pistes. Le profil, au total, varie entre -135 mm et 55 mm sur une même étendue de 120 m. Par contre, si nous tirons une épreuve élargie des élévations du profil entre 60 m et 120 m, représentée dans la figure 4.3, nous obtenons approximativement le même type de profil que nous avons relevé à la figure 4.1 pour la voie 21.

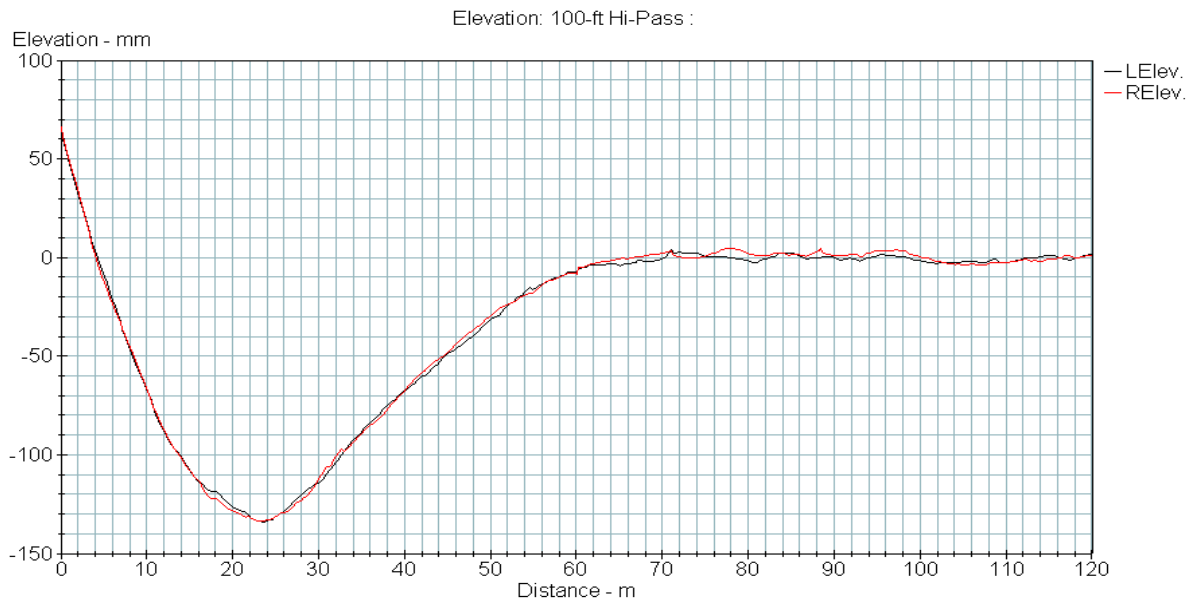


Figure 4.2 Élévations de droite et de gauche des mesures effectuées près de la station de métro CADILLAC (de 0 à 120 m).

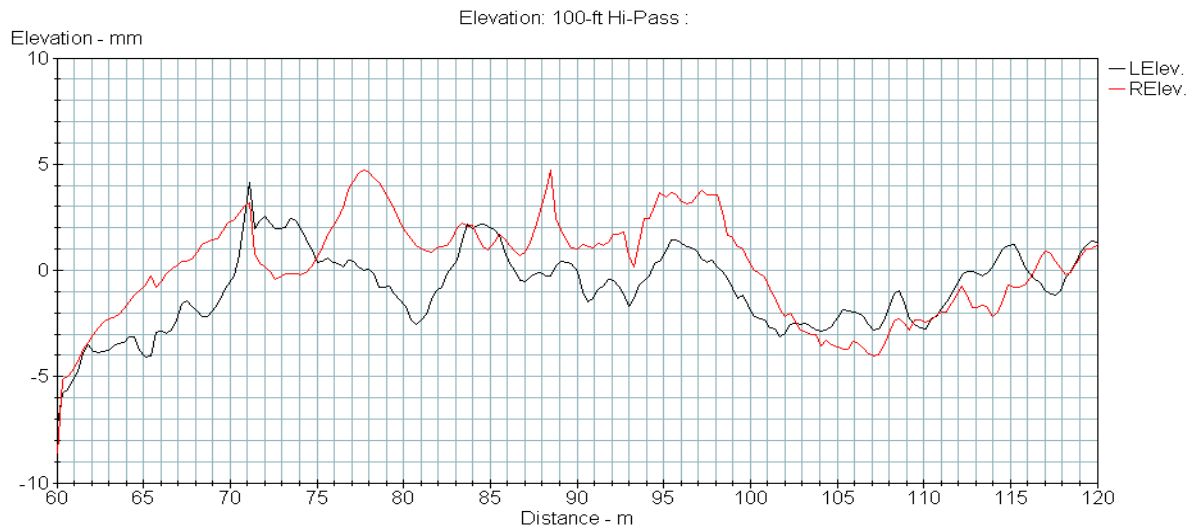


Figure 4.3 Élévations de droite et de gauche des mesures effectuées près de la station de métro CADILLAC (de 60 à 120 m).

Lorsque les graphiques des profils furent bien enregistrés à l'intérieur du logiciel ROADRUF, les données recueillies ont été traitées par les filtres IRI et RN. Le tableau 4.1 représente une copie des résultats obtenus lors de cette analyse.

Start: m	End m	IRI: (m/km)		RN: 0-5		Both
		LElev.	RElev.	LElev.	RElev.	

C:\ROADRUF\IRSST-~1\CADILLAC.ERD						
0.00	120.00	1.31	1.28	3.89	3.82	3.85
0.00	30.00	1.77	1.65	3.66	3.63	3.64
30.00	60.00	1.18	1.08	4.00	3.97	3.98
60.00	90.00	1.20	1.32	3.82	3.66	3.74
90.00	120.00	1.11	1.08	4.19	4.11	4.15

C:\ROADRUF\IRSST-~1\VOIE21.ERD						
0.00	120.00	1.12	1.21	4.02	3.94	3.98
0.00	30.00	1.05	1.15	4.00	4.06	4.03
30.00	60.00	1.02	1.13	4.11	3.87	3.98
60.00	90.00	0.87	1.47	4.27	3.79	3.99
90.00	120.00	1.52	1.09	3.78	4.07	3.91

Tableau 4.1 Valeurs des IRI et des RN pour les deux sections du métro de Montréal.

Dans le tableau 4.1, nous pouvons d'ailleurs remarquer que les indices de planéité IRI varie entre 0.87 et 1.77 m/km. Ce niveau de rugosité est très faible et, à ce taux de sinuosité, l'indice IRI considère que le profil mesuré est une surface pratiquement parfaite. Si nous comparons avec les indices IRI de nos routes qui oscillent entre 2.2 et 4 m/km, il est clair que les pistes de roulement du métro sont supérieures en terme de confort. Nous remarquons le même phénomène pour l'indice de qualité de route RN qui oscille toujours près de 4. Rappelons-nous qu'une surface parfaite (comme un miroir) obtiendrait un indice RN près de 5. Par conséquent, si nous traçons les indices de planéité IRI en continu pour les quatre pistes superposées, nous ne dépassons pratiquement jamais la valeur de 2 m/km. Les figures 4.5 et 4.6 tracent les valeurs des IRI en continu évaluées à des intervalles de 100 pieds et 30 pieds respectivement pour les quatre sections de voies étudiées.

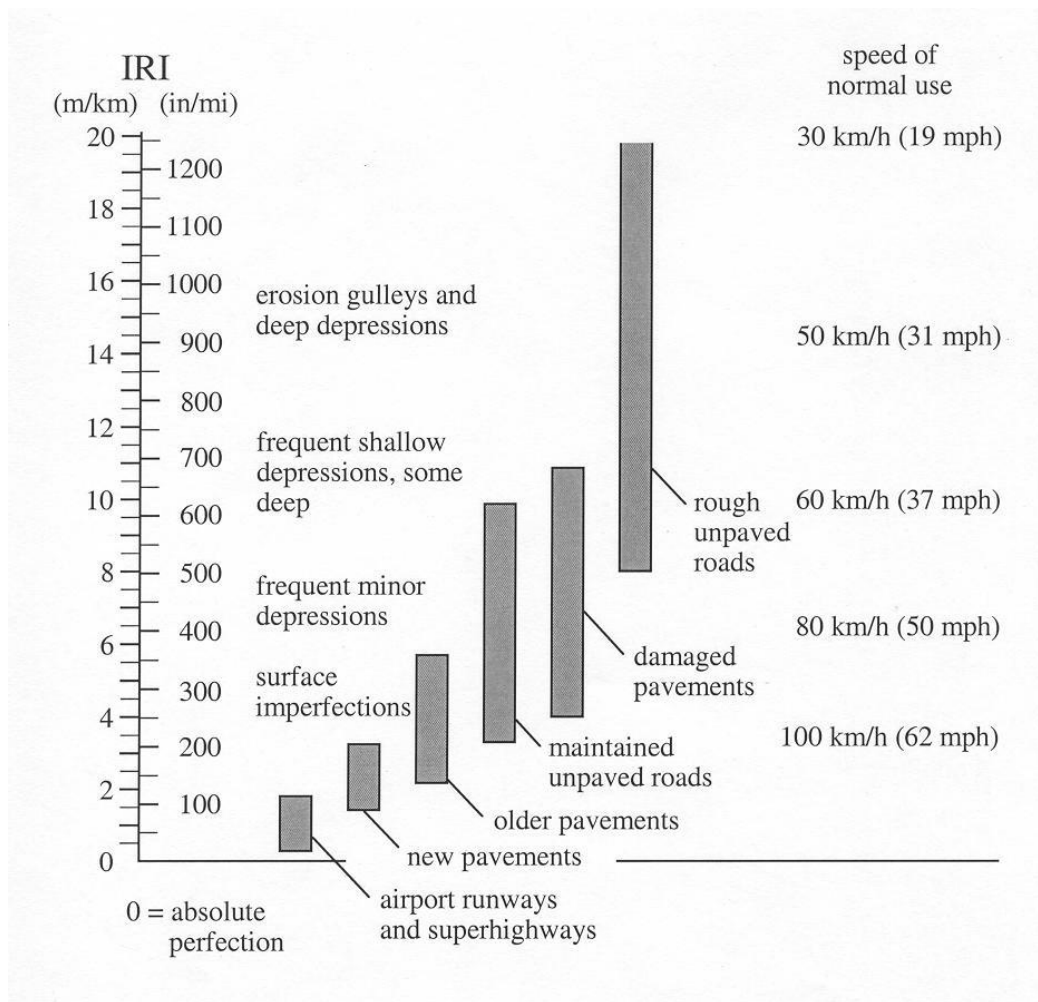


Figure 4.4 Norme du FHWA de l'indice de planéité IRI.

Si nous comparons les valeurs des IRI avec la norme, tirée de [4], établie par le « Federal Highway Administration FHWA » dans la figure 4.4, il devient évident que le niveau de défaut d'un des pistes de roulement du métro de Montréal est très faible. L'IRI s'échelonne de 0 à 10 m/km pour les routes pavées, 0 correspondant à une route parfaitement lisse et 10 m/km, à une route presque impraticable. Un indice de 5 m/km est généralement jugé inacceptable au point de vue du confort des usagers, et une réhabilitation est alors de mise, quoique cette valeur soit tout à fait arbitraire et dépende du type de route en question.

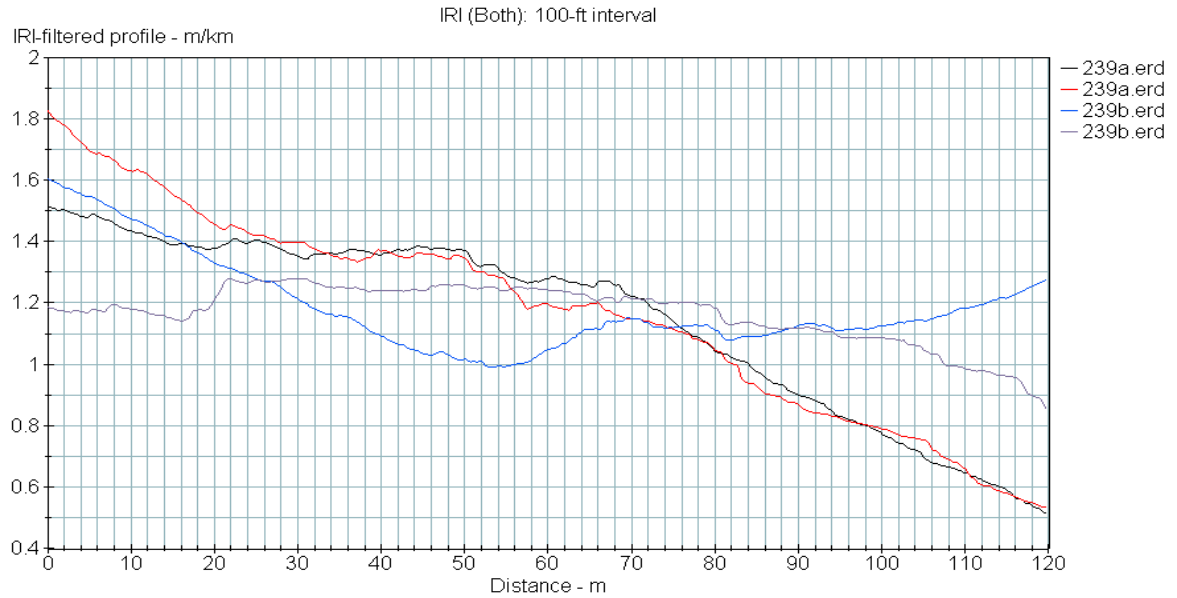


Figure 4.5 Valeurs des IRI en continu évaluées par tranche de 100 pieds pour les mesures effectuées sur la voie 21 et près de la station CADILLAC.

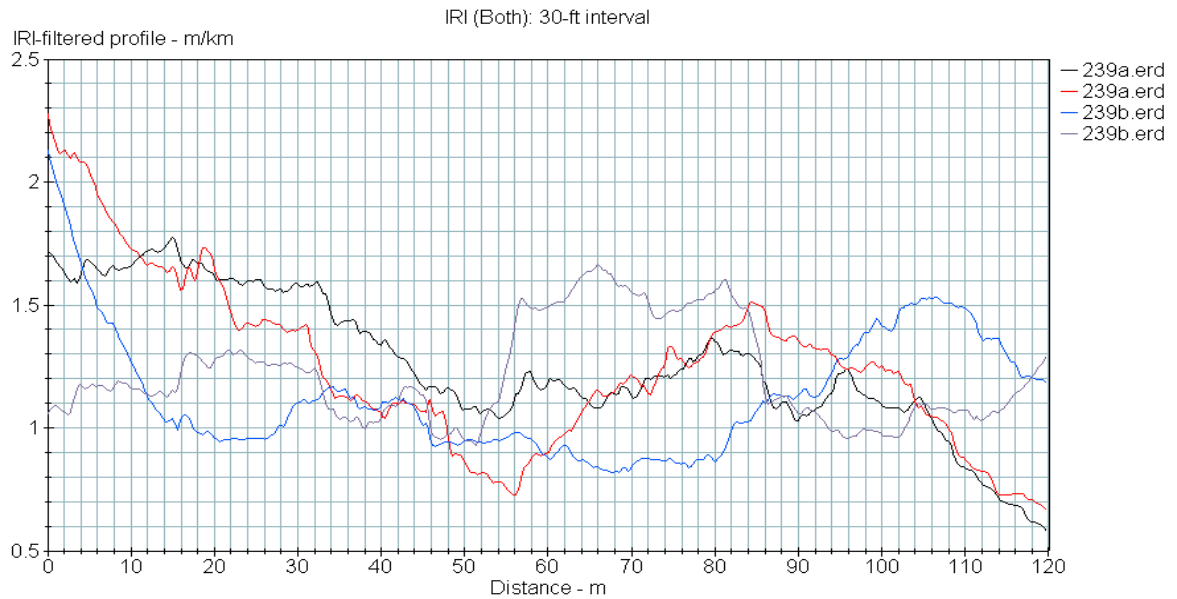


Figure 4.6 Valeurs des IRI en continu évaluées par tranche de 30 pieds pour les mesures effectuées sur la voie 21 et près de la station CADILLAC.

4.2 Logiciel DADISP

Dans le but de corroborer nos résultats, nous avons aussi exploité le logiciel DADISP conçu à l'Université Concordia. Le logiciel DADISP exploite le concept de la valeur efficace (concept bien connu des électriciens, en anglais, valeur R.M.S. «Root Mean Square value») qui sous-tend également la notion «d'énergie vibratoire». Le logiciel peut calculer la valeur efficace en prenant la racine carrée de la moyenne, sur la distance R, du carré de la valeur instantanée ; lorsque celle-ci est le profil, il devient :

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{R} \int_0^R x^2(r) \cdot dr}$$

Ainsi, l'ensemble des valeurs efficaces par bande de fréquences permet de tracer le spectre fréquentiel de la vibration qui est surtout utilisé pour formuler un diagnostic sur l'origine des vibrations. Par contre, pour le profil des pistes de roulement, il est d'usage d'employer la densité spectrale de puissance (DSP) de préférence à la valeur efficace par bande de fréquences. À un coefficient multiplicatif près (qui est un facteur de forme des filtres de l'analyseur), la fonction DSP peut être égale au carré de la valeur efficace par bandes de fréquences divisé par la largeur de bande à la fréquence considérée. Dans le cas du logiciel DADISP qui analyse un profil stationnaire, la DSP est représentée par le carré des transformées de Fourier de la fonction d'auto-corrélation [6] et s'exprime en $m^3 / cycle$. Le logiciel DADISP a généré la fonction DSP des quatre profils qui sont tracés dans la figure 4.7.

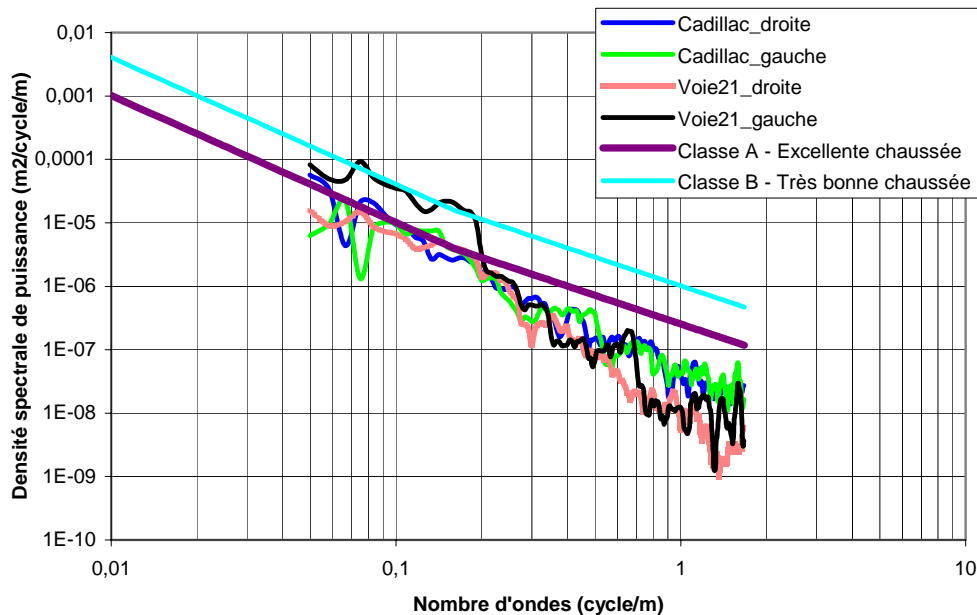


Figure 4.7 Fonctions DSP des pistes de roulement (logiciel DADISP) près de la station Cadillac et voie21.

En premier lieu, les données ont été examinées afin d'évaluer le taux des pentes des quatre profils que nous avons enregistrés. Il existait très peu de pentes pour les pistes de roulement de la voie 21 à comparer à celles obtenues près de la station Cadillac. Les données mesurées ont ainsi été filtrées afin d'éliminer les effets des pentes résiduelles. Ce nouvel ensemble de données fut, par la suite, traité par le logiciel DADISP afin de tracer la DSP de chacun des profils en fonction des nombres d'ondes (cycle / m) qui sont dessinés à l'intérieur de la figure 4.7. Une moyenne mobile de sept points fut appliquée afin d'atténuer les valeurs des densités spectrales de puissance et notons, de plus, que les DSP qui correspondaient à de très petits nombres d'ondes furent éliminées puisque celles-ci provenaient d'infimes pentes locales qui n'ont pas été éliminées lors des filtres initiaux.

La figure 4.7 illustre très bien le faible niveau de vibration généré par les pistes de roulement du métro de Montréal. Nous avons ajouté à la figure originale les limites ou frontières acceptables proposées par «l'International Standard Organization, ISO» [12] qui sont des courbes quasi-linéaires pour une excellente chaussée (classe A) et une très bonne chaussée (classe B). Nous remarquons d'ailleurs que les fonctions DSP sont pratiquement toujours inférieures à la norme de la classe A à l'exception de la voie 21 gauche.

Les données de défaut d'uni prélevées sur les pistes de roulement peuvent aussi être transformées dans le spectre temporel en considérant un véhicule qui se déplace sur ces profils à 30, 50 et 90 km/h. Les données sont analysées avec le logiciel DADISP en relation avec les routines de densité spectrale de puissance, DSP. La durée totale du signal variera en fonction de la vitesse du véhicule. Pour une distance de 120 m, des intervalles de temps (T) de 14.4 sec., 8.66 sec. et 4.8 sec. ont été obtenus et correspondaient aux vitesses de 30, 50 et 90 km/h, respectivement. Les courbes DSP pour chacune des vitesses sont représentées dans les figures 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11. L'analyse a été effectuée en utilisant un nombre total de 800 lignes spectrales pendant que la résolution fréquentielle était appliquée à $(1 / T)$. Dans ce spectre temporel, une moyenne mobile de sept points a aussi été utilisée afin de lisser les courbes des densités spectrales de puissance, DSP.

En plus de nous procurer d'excellent résultats, le logiciel DADISP a contribué à nous fournir une deuxième analyse afin de vérifier nos résultats. Évidemment, les résultats abondent dans le même sens que ceux obtenus à partir du logiciel ROADRUF. Nous pouvons observer des tendances communes sur les quatre figures 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11. La densité spectrale de puissance DSP généralement décroît avec la fréquence et passe de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-8} $m^3 / cycle$ pour une variation de 1 à 10 Hz. Ces valeurs DSP sont bien en deçà des valeurs normalement calculées dans le domaine de la profilométrie. Finalement à partir des figures 4.8 à 4.11, nous observons que le véhicule qui se déplace à 90 km/h va subir des vibrations un peu plus importantes que le véhicule qui se déplace à 30 km/h, ce qui est raisonnablement prévisible.

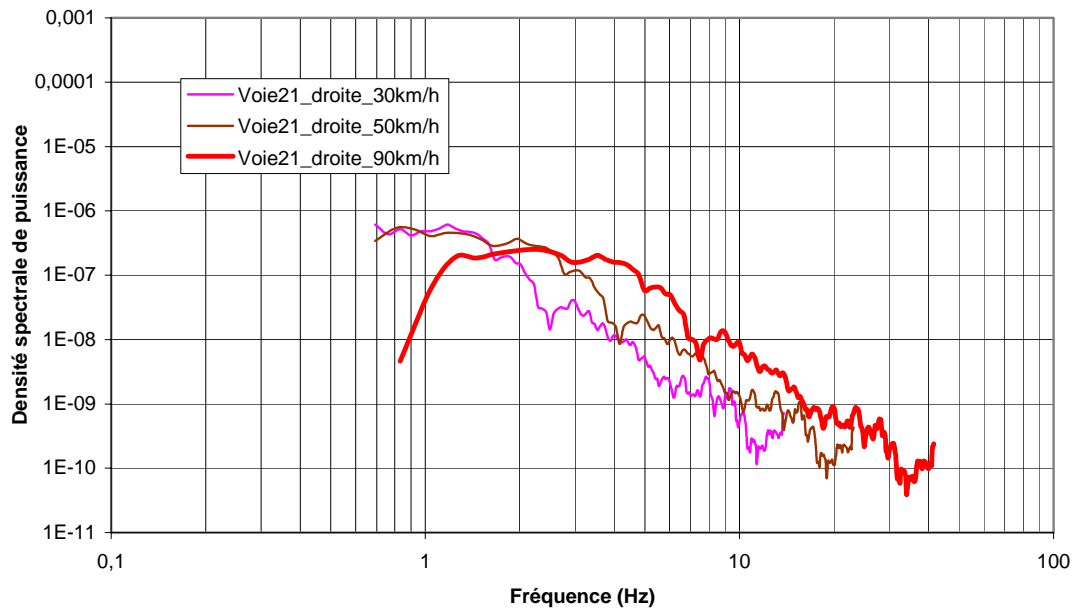


Figure 4.8 Fonctions DSP de la piste de roulement à droite sur la voie21 (30 km/h, 50 km/h et 90 km/h).

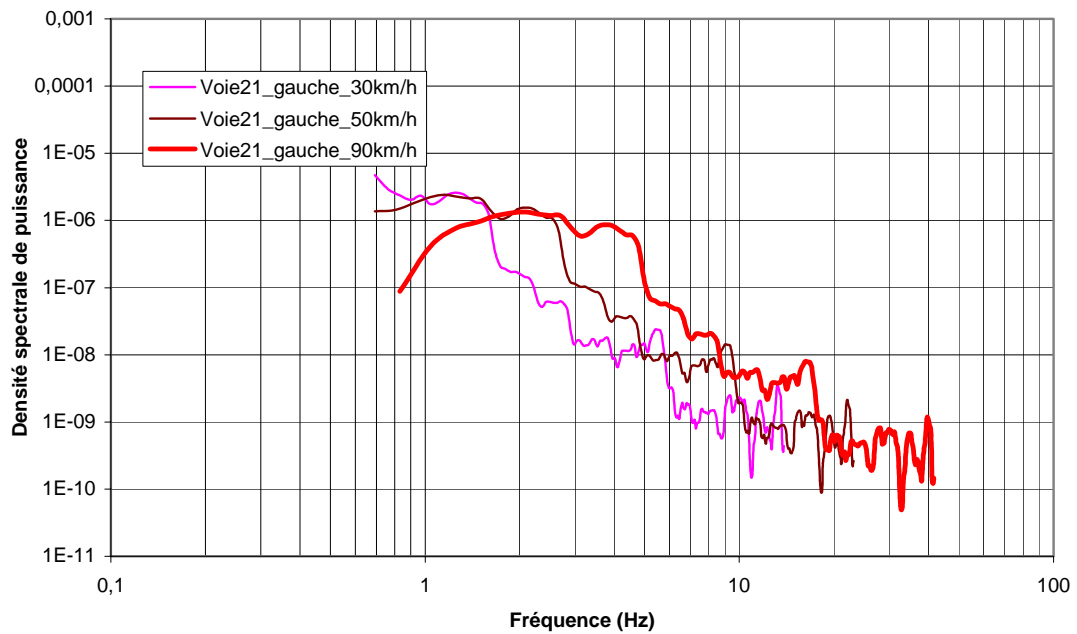


Figure 4.9 Fonctions DSP de la piste de roulement à gauche sur la voie21 (30 km/h, 50 km/h et 90 km/h).

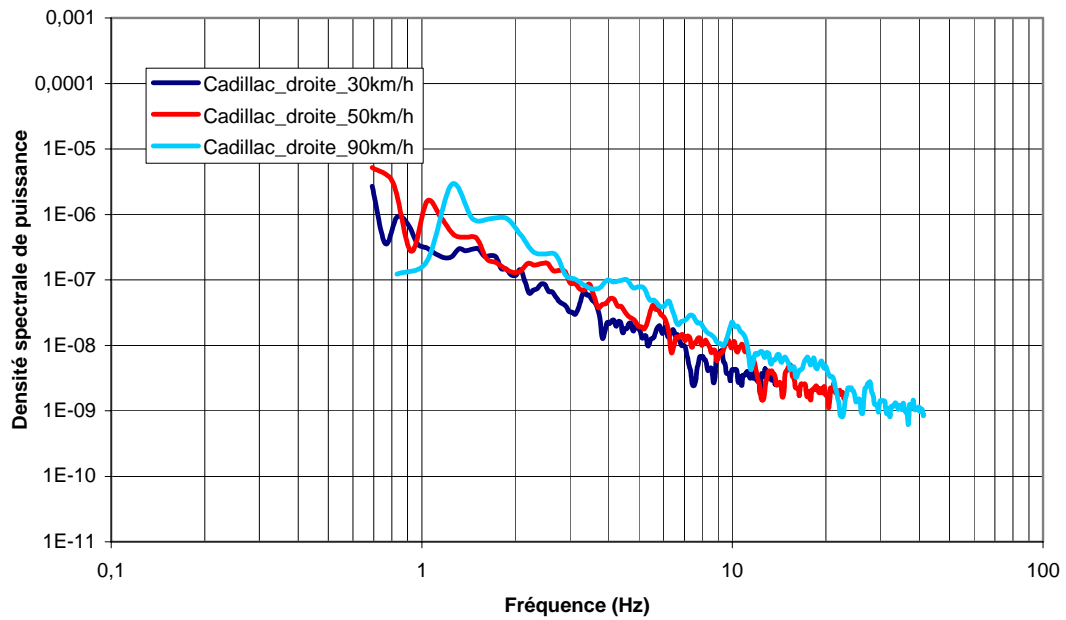


Figure 4.10 Fonctions DSP de la piste de roulement à droite près de la station Cadillac (30 km/h, 50 km/h et 90 km/h).

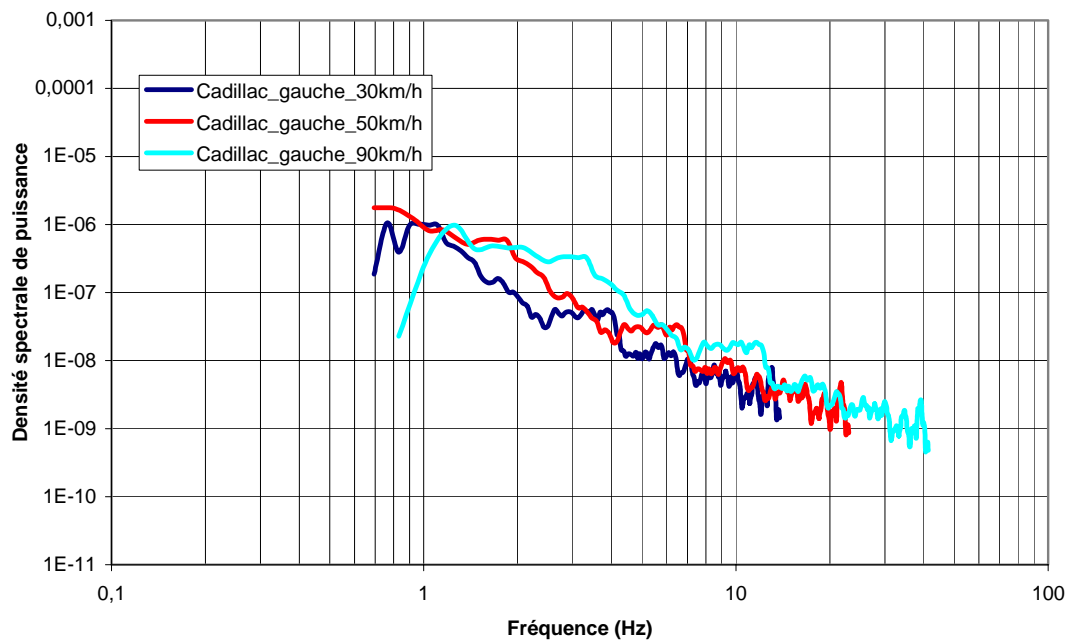


Figure 4.11 Fonctions DSP de la piste de roulement à gauche près de la station Cadillac (30 km/h, 50 km/h et 90 km/h).

4.3 Analyse spectrale avec le logiciel ROADRUF

Au chapitre 2, nous avons démontré que les fonctions DSP pouvaient être calculées pour les dérivées des profils d'élévations, tel que les pentes et les rayons de courbure. Les fonctions DSP des pentes des profils sont capables de mieux représenter les différences qui existent entre les profils car celles-ci calculent un spectre de défaut de planéité plus uniforme par rapport au nombre d'ondes. Suite à l'analyse spectrale du logiciel ROADRUF, nous obtenons le tableau 4.2 qui représente les valeurs efficaces (RMS) des pentes pour les deux portions de pistes mesurées dans le métro de Montréal. De plus, le logiciel nous calcule les fonctions DSP pour les pentes près de la station Cadillac et les pentes de la voie 21 qui sont tracées, respectivement, à l'intérieur des figures 4.13 et 4.14.

Nous observons que dans ce genre d'analyse spectrale, il devient évident que pour des nombres d'ondes inférieurs à 0.1 cycle / m dans les figures 4.13 et 4.14, les pistes de roulement près de la station Cadillac sont un peu plus rugueuses que celles de la voie 21. Néanmoins, nous obtenons toujours des résultats qui sont inférieurs à la norme dans le domaine de la profilométrie.

```
* Spectrum Analyzer Weighted RMS Calculation
* Last modified at UMTRI September 16, 1996
* Copyright (c) 1996 The Regents of the University of
Michigan. All Rights Reserved.
```

Filename	Weighted RMS:	
	LSlope	RSlope
C:\ROADRUF\IRSST-~1\CADILLAC.ERD	.365235E-02	.365703E-02
C:\ROADRUF\IRSST-~1\VOIE21.ERD	.126054E-02	.139384E-02

Tableau 4.2 Valeurs efficaces (RMS) des pentes pour les deux sections du métro de Montréal.

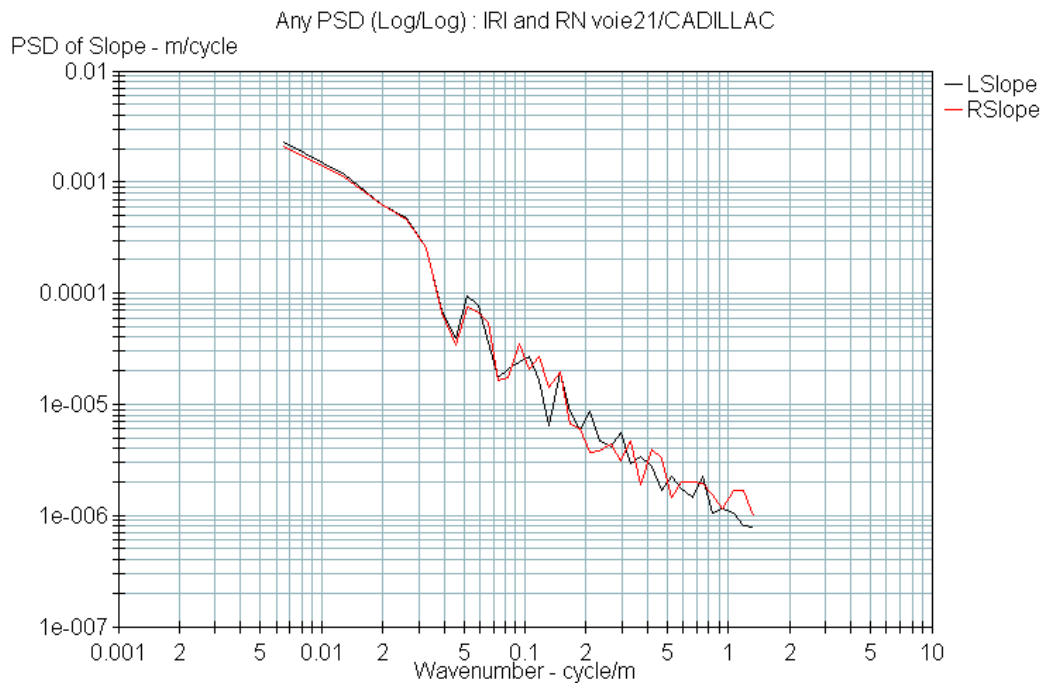


Figure 4.12 Fonctions DSP des pentes gauche et droite près de la station Cadillac

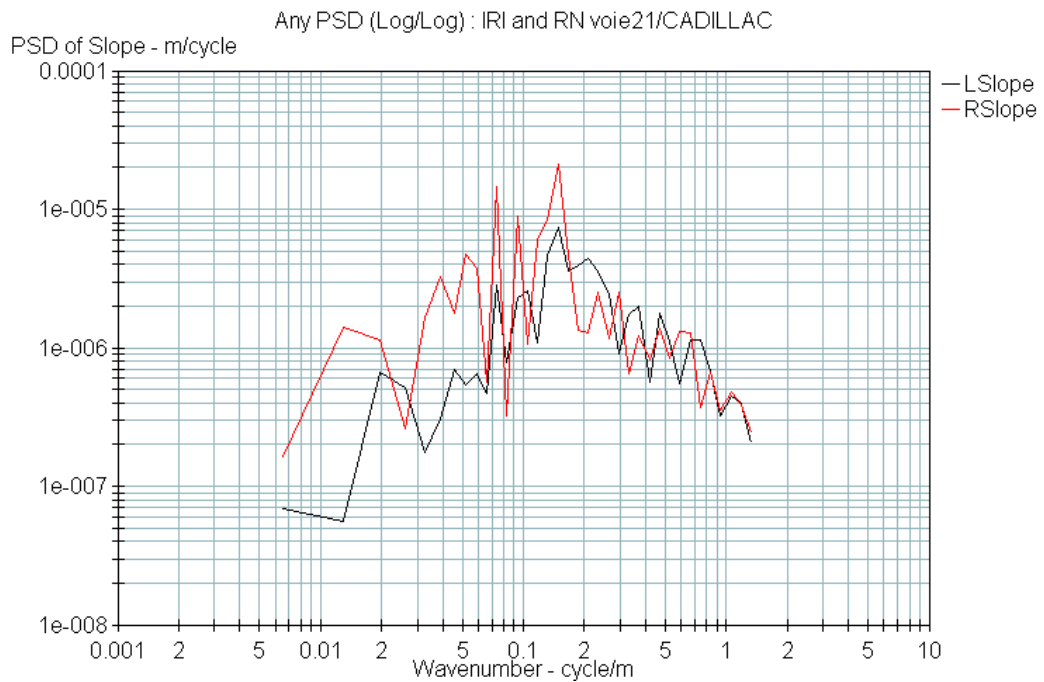


Figure 4.13 Fonctions DSP des pentes gauche et droite sur la voie 21

5 Conclusion

Ce rapport présente toute la méthodologie utilisée pour le calcul des indices de confort au roulement exprimé sous forme d'IRI et en densité spectrale de puissance pour deux tronçons de pistes évalués à l'intérieur du réseau du métro de Montréal. Il importe de considérer que l'estimation de ces indicateurs est largement tributaire de la qualité des données d'auscultation et des modèles de dégradation utilisés.

Dans cette dernière partie du projet, nous constatons que d'une manière générale, le niveau de défaut de planéité des pistes de roulement du métro de Montréal est très faible. Basé sur les résultats obtenus, il devient évident que les pistes de roulement ne contribuent pas d'une façon significative aux différents niveaux de vibration des motrices du métro de Montréal.

Considérant que l'échelle de l'indice de planéité IRI varie entre 0 (pour une surface parfaite) et 20 m/km (pour une surface très rugueuse) et que la norme de l'indice sur nos routes varie entre 2.2 et 4 m/km, nous pouvons facilement observer à partir des figures 4.5 et 4.6 que les valeurs des indices IRI sont inférieures à 2 m/km et oscillent autour de 1 m/km. Ce niveau de défaut d'uni est considéré comme étant très faible et négligeable pour la plupart des spécialistes qui oeuvrent dans le domaine de l'évaluation des chaussées pour le transport en commun.

Notons que cette étude ne présente que des informations relatives au confort au roulement et à la densité spectrale de puissance, lesquels ne sont que deux indicateurs de la condition générale des pistes. Le type et l'étendue des fissurations, la profondeur des ornières, s'il y a lieu, ou la capacité de support sont, à titre d'exemple, d'autres indicateurs importants de la condition des dalles de béton qui forment les pistes de roulement. Ceux-ci pourraient être graduellement considérés dans un bilan futur, si ce n'est déjà fait, par les équipes de réfection des pistes de roulement de la Société de transport de Montréal (STM). Notons, par contre, que les équipes de maintenance de la STM affectées aux pistes de roulement appliquent, d'ores et déjà, des normes de qualité des pistes qui sont très sévères. Entre chaque dalle de béton de 18 pieds de longueur la tolérance à respecter doit toujours être inférieure à 3 mm (voir annexe A pour les spécifications). De plus, lors de nos nombreuses sorties en tunnel, nous avons pu observer et constater que les espaces approximatives entre chaque dalle de béton étaient de l'ordre de ± 1 mm. Par conséquent, puisqu'il existe toujours un contrôle très important sur la qualité des pistes de roulement à l'intérieur du métro de Montréal, nous pouvons conclure que les mesures effectuées sur les quatre portions de piste retenues constituent une bonne représentation de la qualité de l'ensemble du réseau.

Dans le cadre du projet de vibration des loges des opérateurs du métro de Montréal, nous pouvons aussi conclure que les pistes de roulement du réseau contribuent très peu aux vibrations ressenties par les utilisateurs du métro de Montréal. Nous pensons que les vibrations intenses que subissent parfois les utilisateurs sont plutôt engendrées par un mauvais équilibrage des roues des motrices et des remorques. Par conséquent, l'évaluation des systèmes de suspension des unités de métro devra être considérée lors de prochaines études vibratoires.

6 Remerciements

Je tiens à remercier l'IRSST ainsi que mes précieux collaborateurs, sans qui, ce projet n'aurait jamais vu l'aboutissement et aurait été difficilement réalisable. Sincères remerciements à M. **Paul-Émile Boileau**, sécurité-ingénierie, bruit et vibrations de l'IRSST, M. **Jean-Pierre Amesse**, Santé Sécurité et environnement, conseiller corporatif - hygiène de la STM et M. **Normand Duhaime**, Ingénierie-équipements et systèmes de la STM ainsi que le professeur **Subhash Rakheja** du Centre CONCAVE de l'Université Concordia .

7 Références

1. « Expérience internationale de comparaison et d'harmonisation des mesures d'uni longitudinal et transversal » : Comité AIPCR des caractéristiques de surface C-1, Association mondiale de la route, ISBN 2-84060-140-0, 80 pages, 2002.
2. « TUTORIAL Roadruf : Software for Analyzing Road Profiles » : University of Michigan Transportation Research Institute (U.M.T.R.I.), 65 pages, October 1997.
3. « ROADRUF USER REFERENCE MANUAL : Software for Analyzing Road Profiles » : University of Michigan Transportation Research Institute (U.M.T.R.I.), 112 pages, October 1997.
4. SAYERS, M.W. and KARAMIHAS, S.M. « The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles » : The Regent of the University of Michigan, 100 pages, september 1998.
5. SAYERS, M.W. and KARAMIHAS, S.M. « Interpretation of Road Roughness Profile Data » : Federal Highway Administration – Contract DTFH 61-92-C00143, 163 pages, June 1996.
6. BENDAT, J.S. and PIERSOL, A.G. « Random Data : Analysis and Measurement Procedures » : John Wiley & Sons, 2nd edition, 566 pages, 1986.
7. FAIRLEY, T.E. and GRIFFIN, M.J. « The apparent mass of the seated human body : vertical acceleration » : *Journal of Biomechanics*, vol. 22, pp. 81-94, 1989.
8. « International Organization for Standardization 2000 » : International Standard, ISO/DIS-5982. Mechanical Vibration and Shock-Range of Idealized Values to Characterize Seated-Body Biodynamic Response under vertical vibration, 2000.
9. RAKHEJA, S. , STIHARU, I. and BOILEAU, P.E. « Seated Occupant Apparent Mass Characteristics under Automotive Postures and Vertical Vibration » : *Journal of Sound and Vibration*, vol. 253, pp. 57-75, 2002.
10. BOILEAU, P.E., RAKHEJA, S. and WU, X. « A Body Mass Dependent Mechanical Impedance Model for Applications in Vibration Seat Testing » : *Journal of Sound and Vibration*, vol. 253, pp. 243-264, 2002.
11. « International Organization for Standardization 1997 » : International Standard, ISO2631-1. Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, 1997.
12. WONG, J.Y. « Theory of Ground Vehicles » : *A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons*, 1978.

ANNEXE A

Spécifications des niveaux de tolérances pour les pistes de roulement du métro de Montréal

Trois documents influencent la qualité du nivellement des pistes de roulement. D'abord, le devis d'installation « E9.0 – Pose des équipements de voie sur radier » prescrit les tolérances d'installation des pièces de roulement lors de la construction de la voie. Ensuite, la méthode de travail « MF-M-75-4004 – Pièce de roulement et resurfaçage – Remplacement et réparation en tunnel » prescrit aux cantonniers comment réparer ou remplacer une pièce existante. Enfin, la note technique « TN-M-75-410001 - Prescriptions d'inspection du chemin de roulement dans le tunnel » prescrit les défauts qui requièrent une intervention corrective du chemin de roulement. Le tableau qui suit résume les tolérances prescrites par ces 3 documents.

tolérance	À l'installation	Au remplacement	À l'inspection
Nivellement de la pièce par rapport au rail le plus près	-0 mm, +3 mm	-0 mm, +3 mm	
Nivellement transversal d'une pièce par rapport à elle-même (gauche)	±2 mm		
Nivellement transversal d'une pièce par rapport à la pièce de l'autre file	±2 mm		
Nivellement au joint des pièces	± 2 mm	±3 mm	6 mm. Si de haut à bas et 3 mm si de bas à haut : intervention planifiée ±30 jours
Espacement entre les pièces	6 mm ± 2mm		> 12 mm : intervention planifiée ou programme de réfection
Bosse ou creux		1.5 mm	
Largeur d'une fissure transversale dans le chemin de roulement			> 36 mm : intervention urgente; entre 24 et 36 mm : intervention planifiée ou programme de réfection; entre 12 et 24 mm : programme de réfection ou inspection de suivie.

Le niveau du chemin de roulement ne varie généralement pas de plus de 2 mm sur une courte distance.

ANNEXE B

**Liste des données relevées sur la voie 21
(Fichier .ERD pour le logiciel ROADRUF)**

```

ERDFILEV2.00
2, -1, -1, 1, 5, 0.300000 , -1,
SHORTNAME Elev. RElev.
LONGNAME Left Elevation Right Elevation
UNITSNAME mm mm
GENNAME Elevation Elevation
XLABEL Distance
XUNITS m
END

```

0	0.0000	0.0000	18.3	-1.0017	2.9050
0.3	2.0633	1.0968	18.6	-0.7894	1.6502
0.6	2.9755	1.1419	18.9	-0.5772	1.9953
0.9	2.8878	1.1871	19.2	-0.5649	1.6404
1.2	2.5000	0.9322	19.5	-0.7527	0.7856
1.5	2.3123	0.6773	19.8	-1.1404	0.0307
1.8	2.6245	0.7225	20.1	-1.4282	-0.3242
2.1	2.3368	0.8676	20.4	-1.7159	-0.4790
2.4	0.6490	0.3128	20.7	-1.7037	-0.5339
2.7	0.3613	-0.0421	21	-1.1914	-0.4888
3	0.0735	-0.0970	21.3	-0.5792	-0.6436
3.3	-0.4142	0.2482	21.6	-0.2669	-0.5985
3.6	-0.9020	0.5933	21.9	-0.5547	-0.8533
3.9	-1.2897	0.8384	22.2	-1.2424	-1.0082
4.2	-1.4775	1.4836	22.5	-1.8302	-0.5631
4.5	-1.1652	2.0287	22.8	-1.9179	0.1821
4.8	-1.0530	2.2739	23.1	-1.9057	0.4272
5.1	-0.8407	2.3190	23.4	-2.0934	0.3723
5.4	-0.2285	2.6641	23.7	-1.9812	0.3175
5.7	-0.0162	2.6093	24	-1.6689	0.1626
6	0.0960	2.7544	24.3	-1.4567	-0.1922
6.3	0.0083	3.0995	24.6	-1.6444	-0.1471
6.6	-0.0795	2.8447	24.9	-1.9322	-0.4020
6.9	-0.1672	2.4898	25.2	-1.9199	-0.3568
7.2	-0.1550	2.3349	25.5	-1.4077	-0.2117
7.5	-0.3427	2.1801	25.8	-1.2954	-0.2666
7.8	-0.2305	2.4252	26.1	-1.7832	-0.2214
8.1	-0.2182	2.3704	26.4	-1.6709	-0.1763
8.4	-0.1060	2.0155	26.7	-1.7586	-0.7311
8.7	-0.1937	1.6606	27	-1.4464	-0.9860
9	0.0185	1.5058	27.3	-0.9341	-0.7409
9.3	-0.1692	1.1509	27.6	-1.1219	-0.4957
9.6	-0.3570	0.6960	27.9	-1.7096	-0.0506
9.9	-0.3447	0.2412	28.2	-1.6974	0.2945
10.2	-0.3325	-0.1137	28.5	-1.7851	0.5397
10.5	-0.4202	0.0315	28.8	-1.7729	0.3848
10.8	-0.4080	-0.3234	29.1	-1.3606	1.0299
11.1	-0.2957	-0.3783	29.4	-0.5484	1.7751
11.4	0.0165	-0.3331	29.7	0.0639	2.8202
11.7	-0.3712	-0.0880	30	1.2761	3.3654
12	-0.6589	-0.2429	30.3	1.4884	3.2105
12.3	-0.9467	-0.0977	30.6	0.6006	1.8556
12.6	-0.7344	0.2474	30.9	-0.1871	0.8008
12.9	-0.7222	0.4926	31.2	-0.6749	-0.1541
13.2	-0.6099	0.7377	31.5	-1.0626	-0.7090
13.5	-0.8977	0.1828	31.8	-0.9504	-0.8638
13.8	-1.0854	-0.0720	32.1	-1.1381	-1.3187
14.1	-1.3732	0.0731	32.4	-1.3259	-1.7735
14.4	-1.1609	0.6182	32.7	-1.2136	-1.7284
14.7	-0.9487	1.0634	33	-1.3014	-1.5833
15	-0.7364	1.5085	33.3	-1.1891	-1.9381
15.3	-0.7242	2.1536	33.6	-0.7769	-2.1930
15.6	-0.5119	2.9988	33.9	-0.4646	-2.5479
15.9	-0.6997	3.6439	34.2	-0.4524	-2.4027
16.2	-0.9874	3.8891	34.5	-0.5401	-1.9576
16.5	-1.2752	4.1342	34.8	-0.7279	-1.7124
16.8	-1.3629	4.8793	35.1	-1.0156	-1.6673
17.1	-1.2507	5.3245	35.4	-1.2034	-1.4222
17.4	-1.1384	4.9696	35.7	-1.1911	-1.2770
17.7	-1.3262	4.3147	36	-1.0789	-0.9319
18	-1.1139	3.6599	36.3	-1.0666	-0.2868

36.6	-1.0544	0.1584	59.4	-2.1233	-1.9112
36.9	-1.0421	-0.0965	59.7	-2.1110	-1.9661
37.2	-0.8299	-0.1514	60	-1.8988	-1.8209
37.5	-0.7176	-0.3062	60.3	-1.7865	-1.6758
37.8	-0.6054	-0.3611	60.6	-1.7743	-1.5307
38.1	-0.4931	-0.2159	60.9	-1.7620	-1.0855
38.4	-0.4809	-0.2708	61.2	-1.6498	-1.0404
38.7	-0.6686	-0.6257	61.5	-1.5375	-1.0953
39	-0.7564	-0.4805	61.8	-1.0253	-1.0501
39.3	-0.8441	-0.6354	62.1	-0.9130	-1.1050
39.6	-0.9319	-0.6903	62.4	-0.9008	-0.5598
39.9	-1.0196	-0.6451	62.7	-0.6885	-0.5147
40.2	-1.0074	-1.0000	63	-0.3763	-0.6696
40.5	-1.0951	-1.1548	63.3	-0.3640	-1.2244
40.8	-1.0829	-1.1097	63.6	0.0482	-1.4793
41.1	-0.8706	-1.0646	63.9	0.2605	-1.5342
41.4	-0.5583	-0.9194	64.2	0.0727	-1.5890
41.7	-0.0461	-0.5743	64.5	-0.5150	-1.9439
42	0.5662	-0.2292	64.8	-0.6028	-1.6987
42.3	1.2784	0.1160	65.1	-0.7905	-1.7536
42.6	2.0907	0.8611	65.4	-0.8783	-1.5085
42.9	2.4029	1.5063	65.7	-1.0660	-1.3633
43.2	2.3152	1.9514	66	-1.1538	-1.0182
43.5	2.0274	2.2965	66.3	-1.3415	-0.4731
43.8	1.7397	2.4417	66.6	-1.1293	0.5721
44.1	1.1519	2.3868	66.9	-1.1170	1.9172
44.4	0.4642	2.3319	67.2	-1.0048	3.7623
44.7	-0.0236	1.9771	67.5	-0.6925	4.9075
45	-0.3113	1.6222	67.8	-0.3803	6.0526
45.3	-0.9991	1.3673	68.1	-0.1680	7.7978
45.6	-1.1868	1.6125	68.4	0.3442	9.2429
45.9	-1.2746	1.7576	68.7	0.5565	10.0880
46.2	-1.0623	1.4028	69	0.5687	10.6332
46.5	-0.9501	1.5479	69.3	0.7810	10.2783
46.8	-0.9378	1.0930	69.6	0.8932	10.0235
47.1	-0.7256	1.3382	69.9	0.8055	9.7686
47.4	-0.2133	1.5833	70.2	0.8178	9.5137
47.7	0.1989	1.4284	70.5	0.6300	8.2589
48	0.7112	1.1736	70.8	0.5423	6.3040
48.3	1.0234	1.2187	71.1	0.1545	5.0491
48.6	1.4357	1.2639	71.4	-0.1332	4.1943
48.9	1.7479	1.4090	71.7	-0.4210	3.7394
49.2	2.0602	1.4541	72	-0.9087	3.3845
49.5	1.9724	1.1993	72.3	-1.4965	3.0297
49.8	1.7847	1.1444	72.6	-1.4842	2.4748
50.1	1.6969	0.7895	72.9	-1.4720	2.4200
50.4	1.5092	0.4347	73.2	-1.3597	1.8651
50.7	1.3214	0.0798	73.5	-0.9475	1.6102
51	1.5337	0.0249	73.8	-1.4352	1.5554
51.3	2.2459	-0.4299	74.1	-1.9230	1.5005
51.6	2.0582	0.5152	74.4	-2.2107	1.7456
51.9	1.9704	-0.3396	74.7	-2.3985	1.8908
52.2	1.8827	-0.9945	75	-2.5862	1.6359
52.5	1.6949	-0.9494	75.3	-2.7740	1.5810
52.8	1.3072	-0.4042	75.6	-2.5617	1.3262
53.1	1.4194	-0.0591	75.9	-2.2495	0.8713
53.4	1.7317	-0.0140	76.2	-1.8372	0.7165
53.7	2.0439	-0.4688	76.5	-1.5250	0.3616
54	1.9562	-0.7237	76.8	-1.1127	0.2067
54.3	1.5684	-0.6785	77.1	-1.0005	-0.1481
54.6	1.4807	-0.0334	77.4	-0.8882	-0.3030
54.9	0.9929	0.3117	77.7	-0.8760	-0.3579
55.2	0.5052	1.0569	78	-0.8637	-0.4127
55.5	0.2175	1.1020	78.3	-0.8515	-0.4676
55.8	0.2297	1.6471	78.6	-0.7392	-0.3224
56.1	0.2420	2.3923	78.9	-0.6270	-0.4773
56.4	0.2542	2.3374	79.2	-0.7147	-0.4322
56.7	0.2665	2.3826	79.5	-0.8025	-0.4870
57	-0.0213	1.0277	79.8	-0.8902	-0.5419
57.3	-0.5090	0.2728	80.1	-0.6780	-0.1968
57.6	-0.5968	-0.5820	80.4	-0.4657	0.1484
57.9	-0.8845	-0.8369	80.7	-0.2535	-0.0065
58.2	-1.2723	-1.4918	81	-0.0412	0.1387
58.5	-1.4600	-1.9466	81.3	0.1710	0.1838
58.8	-1.6478	-2.3015	81.6	0.2833	0.2289
59.1	-1.8355	-2.1564	81.9	-0.0045	0.2741

82.2	0.1078	0.3192	101.4	0.8919	-1.9920
82.5	0.0200	0.2643	101.7	0.4041	-2.2469
82.8	-0.1677	0.5095	102	0.2164	-2.2018
83.1	-0.2555	0.4546	102.3	-0.3714	-2.5566
83.4	-0.5432	0.4997	102.6	-0.8591	-3.0115
83.7	-1.1310	0.5449	102.9	-0.7469	-3.2663
84	-1.4187	0.5900	103.2	-0.5346	-3.1212
84.3	-1.5065	0.6352	103.5	-0.7224	-2.9761
84.6	-0.8942	0.2803	103.8	-0.6101	-3.1309
84.9	0.4181	0.0254	104.1	-0.5979	-3.6858
85.2	0.3303	0.0706	104.4	-0.3856	-3.8407
85.5	0.0426	0.2157	104.7	-0.1734	-3.6955
85.8	0.1548	-0.0392	105	0.5389	-3.5504
86.1	0.1671	-0.3940	105.3	1.1511	-3.5053
86.4	0.4793	-0.4489	105.6	2.1634	-2.9601
86.7	0.6916	-0.8037	105.9	2.4756	-2.7150
87	0.7038	-0.9586	106.2	2.0879	-2.7698
87.3	0.4161	-0.8135	106.5	2.8001	-2.1247
87.6	0.6283	-0.7683	106.8	3.1124	-1.5796
87.9	0.8406	-0.7232	107.1	2.9246	-1.4344
88.2	0.9528	-0.6781	107.4	2.9369	-1.3893
88.5	0.9651	-0.8329	107.7	2.7491	-1.4442
88.8	0.8773	-1.1878	108	2.3614	-1.3990
89.1	0.6896	-1.7426	108.3	1.8736	-1.0539
89.4	0.5018	-2.1975	108.6	1.6859	-1.1087
89.7	0.1141	-2.5524	108.9	0.9981	-1.4636
90	0.6263	-3.3072	109.2	0.2104	-1.6185
90.3	0.8386	-2.9621	109.5	-0.3774	-1.6733
90.6	0.6508	-3.0170	109.8	-0.6651	-1.9282
90.9	0.1631	-2.8718	110.1	-0.9529	-1.9831
91.2	0.1753	-2.7267	110.4	-0.8406	-1.8379
91.5	0.2876	-2.7816	110.7	-0.8284	-1.8928
91.8	0.4998	-2.7364	111	-0.5161	-1.7476
92.1	0.8121	-2.3913	111.3	0.0961	-1.4025
92.4	1.2243	-2.3461	111.6	1.2084	-1.2574
92.7	1.4366	-2.3010	111.9	0.6206	-1.5122
93	1.7488	-1.7559	112.2	0.0329	-1.6671
93.3	2.0611	-1.5107	112.5	-0.8549	-1.9220
93.6	2.5733	-1.0656	112.8	-1.1426	-1.6768
93.9	3.2856	-0.5205	113.1	-0.9304	-1.5317
94.2	3.8978	-0.5753	113.4	-0.6181	-1.5866
94.5	4.1101	-0.8302	113.7	-0.4059	-1.7414
94.8	4.3223	-0.8850	114	0.2064	-1.8963
95.1	4.3346	-1.0399	114.3	0.9187	-2.3511
95.4	4.3468	-1.4948	114.6	1.5309	-2.6060
95.7	4.1591	-2.7496	114.9	1.8432	-2.7609
96	3.7713	-3.6045	115.2	2.2554	-3.0157
96.3	2.9836	-3.7594	115.5	2.8677	-3.0706
96.6	2.0958	-3.4142	115.8	3.3799	-2.7255
96.9	1.2081	-3.1691	116.1	3.1922	-2.6803
97.2	0.5203	-3.2240	116.4	2.3044	-2.4352
97.5	0.2326	-3.3788	116.7	1.4167	-2.0900
97.8	0.1448	-3.6337	117	1.0289	-1.9449
98.1	-0.2429	-3.6885	117.3	1.2412	-3.3998
98.4	-0.3307	-3.2434	117.6	1.1534	-3.4546
98.7	-0.5184	-2.9983	117.9	0.7657	-3.1095
99	-0.5062	-2.8531	118.2	0.2779	-2.1644
99.3	-0.0939	-2.6080	118.5	0.2902	-1.4192
99.6	0.5184	-2.2629	118.8	0.8024	-0.7741
99.9	0.7306	-1.8177	119.1	1.2147	0.2711
100.2	1.2429	-1.6726	119.4	1.7269	0.8162
100.5	1.9551	-1.8274	119.7	1.9392	1.0613
100.8	2.7674	-1.4823	120	1.9514	1.3065
101.1	1.4796	-1.6372			

ANNEXE C

**Liste des données relevées près de la station CADILLAC
(Fichier .ERD pour le logiciel ROADRUF)**

```

ERDFILEV2.00
  2, -1, -1, 1, 5, 0.300000 , -1,
SHORTNAME Elev. RElev.
LONGNAME Left Elevation Right Elevation
UNITS NAME mm mm
GENNAME Elevation Elevation
XLABEL Distance
XUNITS m
END
0 140.8069 139.0535 18.9 -100.1830 -104.5520
0.3 135.0769 133.0550 19.2 -102.3130 -106.5505
0.6 129.0469 126.7565 19.5 -103.9430 -108.1490
0.9 122.9169 120.7580 19.8 -105.5730 -109.4475
1.2 116.9869 115.1595 20.1 -107.4030 -110.9460
1.5 111.1569 109.7610 20.4 -108.9330 -112.1445
1.8 105.3269 104.2625 20.7 -110.2630 -113.3430
2.1 99.4969 98.2640 21 -111.3930 -114.5415
2.4 94.0669 92.0655 21.3 -112.3230 -115.7400
2.7 88.9369 85.7670 21.6 -113.4530 -116.9385
3 83.6069 80.1685 21.9 -115.4831 -117.3370
3.3 77.9769 74.7700 22.2 -117.4131 -118.9355
3.6 72.8469 69.0715 22.5 -118.8430 -120.0341
3.9 68.0169 63.7730 22.8 -119.9731 -121.1326
4.2 63.2869 58.4745 23.1 -120.8030 -122.0311
4.5 58.1569 52.7760 23.4 -121.6330 -122.4296
4.8 53.7269 47.8775 23.7 -122.3630 -122.8281
5.1 49.2969 43.7790 24 -122.4930 -123.3266
5.4 45.4669 39.6805 24.3 -122.6230 -123.6251
5.7 39.1369 34.2820 24.6 -123.0530 -123.7236
6 35.0069 30.2835 24.9 -122.6830 -123.7221
6.3 30.6769 26.0850 25.2 -122.3130 -123.4206
6.6 25.9469 22.2865 25.5 -122.1430 -123.0191
6.9 21.2169 18.2880 25.8 -121.7730 -123.1176
7.2 16.4869 14.3895 26.1 -121.1030 -123.3161
7.5 12.0569 10.5910 26.4 -120.4330 -123.3146
7.8 7.6269 6.3925 26.7 -119.8630 -122.9131
8.1 3.1969 2.2940 27 -118.8930 -121.9116
8.4 -1.0331 -1.7045 27.3 -117.9230 -120.7101
8.7 -5.3631 -6.0030 27.6 -117.2530 -121.1086
9 -9.3931 -10.2015 27.9 -116.7830 -120.8071
9.3 -13.3231 -14.7000 28.2 -116.2130 -119.7056
9.6 -17.2531 -18.7985 28.5 -115.8430 -119.7041
9.9 -21.2831 -23.1970 28.8 -115.4730 -119.0026
10.2 -25.1131 -27.5955 29.1 -115.2030 -118.2010
10.5 -28.8431 -31.6940 29.4 -114.9330 -116.7995
10.8 -32.5731 -35.6925 29.7 -114.7630 -115.2980
11.1 -38.0031 -38.3910 30 -114.3930 -112.9966
11.4 -41.5331 -42.3895 30.3 -113.9230 -111.4951
11.7 -44.9630 -46.2880 30.6 -112.8530 -110.2935
12 -48.0931 -49.7865 30.9 -111.4830 -108.3920
12.3 -51.7231 -53.2851 31.2 -110.2130 -108.7905
12.6 -55.1531 -56.5835 31.5 -109.2430 -107.9890
12.9 -58.1830 -59.7820 31.8 -108.4730 -106.2875
13.2 -60.7130 -62.5805 32.1 -107.5030 -104.7860
13.5 -63.0431 -65.1790 32.4 -106.2330 -103.7845
13.8 -65.3731 -67.8775 32.7 -104.7630 -102.2831
14.1 -68.0031 -70.5760 33 -103.4930 -103.9816
14.4 -70.6331 -73.1745 33.3 -101.8230 -103.0800
14.7 -73.3631 -75.7730 33.6 -100.3530 -102.0786
15 -75.9931 -78.0715 33.9 -99.4830 -100.9771
15.3 -78.8231 -80.2700 34.2 -98.4130 -99.9756
15.6 -81.3531 -83.0685 34.5 -97.5430 -98.9741
15.9 -83.7831 -85.0670 34.8 -96.8730 -98.0726
16.2 -86.0131 -86.9655 35.1 -95.7030 -97.1711
16.5 -87.3431 -91.2640 35.4 -94.5330 -96.4695
16.8 -89.6731 -93.9625 35.7 -93.8630 -95.6681
17.1 -91.7031 -96.2610 36 -92.9930 -94.9665
17.4 -93.1330 -97.9595 36.3 -92.2230 -94.2650
17.7 -93.6630 -98.8580 36.6 -91.6530 -93.5635
18 -94.1930 -99.7565 36.9 -90.7830 -92.7620
18.3 -95.5230 -101.1550 37.2 -89.7130 -91.9605
18.6 -97.7530 -102.8535 37.5 -88.1430 -91.0590

```

37.8	-87.1730	-89.8575	60.6	-23.1529	-22.0434
38.1	-86.4030	-88.6560	60.9	-22.2829	-21.3419
38.4	-85.7330	-87.1545	61.2	-21.4129	-20.4404
38.7	-85.4630	-86.3530	61.5	-20.0429	-19.4389
39	-84.8930	-85.5515	61.8	-19.1729	-18.6374
39.3	-83.7230	-84.6500	62.1	-19.0029	-17.7359
39.6	-82.5530	-83.5485	62.4	-18.5329	-16.9344
39.9	-81.7830	-82.4470	62.7	-17.9629	-16.1329
40.2	-81.3130	-81.0455	63	-17.3929	-15.4314
40.5	-80.5430	-79.8440	63.3	-16.6229	-14.8299
40.8	-79.6730	-78.5425	63.6	-15.9529	-14.1284
41.1	-79.3030	-77.4410	63.9	-15.3829	-13.3269
41.4	-78.3330	-76.6395	64.2	-14.5129	-12.4254
41.7	-77.0630	-75.8380	64.5	-13.9429	-11.5239
42	-76.5930	-74.9365	64.8	-13.9729	-10.7224
42.3	-76.4230	-74.1350	65.1	-13.7029	-9.8209
42.6	-76.0530	-73.3335	65.4	-13.0329	-8.8194
42.9	-75.3830	-72.5320	65.7	-11.2629	-8.7179
43.2	-74.1130	-71.6305	66	-10.5929	-7.8164
43.5	-72.7430	-70.7290	66.3	-10.0229	-6.8149
43.8	-72.9730	-70.4275	66.6	-9.2529	-5.9134
44.1	-71.1030	-69.6260	66.9	-8.0829	-5.1119
44.4	-69.9330	-68.8245	67.2	-6.7129	-4.2104
44.7	-68.7630	-68.0230	67.5	-5.8429	-3.5089
45	-67.9930	-67.0215	67.8	-5.4729	-2.7074
45.3	-67.5230	-66.0200	68.1	-5.0029	-1.7059
45.6	-67.0530	-65.0185	68.4	-4.5329	-0.6044
45.9	-66.5830	-64.0170	68.7	-3.8629	0.1971
46.2	-65.9130	-63.0155	69	-2.8929	0.9986
46.5	-65.3430	-62.2140	69.3	-1.8229	1.8001
46.8	-64.5730	-61.4125	69.6	-0.6529	2.9016
47.1	-63.4030	-60.6110	69.9	0.5171	4.0031
47.4	-62.5330	-59.6095	70.2	1.6871	4.9046
47.7	-61.9630	-58.7080	70.5	3.4571	6.0061
48	-61.0930	-57.8065	70.8	5.9271	7.1077
48.3	-60.1230	-57.1050	71.1	8.3971	8.0092
48.6	-58.9530	-56.3035	71.4	6.9671	6.4107
48.9	-57.5830	-55.6020	71.7	8.1371	6.7122
49.2	-56.3130	-54.7005	72	9.1071	7.3137
49.5	-55.8430	-53.5990	72.3	9.5771	7.9152
49.8	-55.0730	-52.6975	72.6	10.1471	8.3167
50.1	-54.2030	-51.7960	72.9	10.9171	9.2182
50.4	-53.7330	-50.7945	73.2	11.7871	10.2197
50.7	-53.1630	-49.8930	73.5	13.0571	11.0212
51	-52.3929	-48.9915	73.8	13.7271	11.8227
51.3	-51.0230	-48.4900	74.1	14.1971	12.6242
51.6	-49.4529	-47.9885	74.4	14.5671	13.5257
51.9	-48.0830	-47.2870	74.7	14.9371	14.6272
52.2	-47.1130	-46.5855	75	15.1071	15.9287
52.5	-46.0429	-45.9840	75.3	15.9771	17.2302
52.8	-44.9729	-45.2825	75.6	16.9471	18.6317
53.1	-44.1029	-44.4810	75.9	17.6171	19.8332
53.4	-43.3329	-43.6795	76.2	18.3871	21.0347
53.7	-42.3629	-42.9780	76.5	19.0571	22.4362
54	-40.7929	-42.2765	76.8	20.2271	24.0377
54.3	-39.6229	-41.5750	77.1	20.9971	25.3392
54.6	-38.4529	-40.7735	77.4	21.5671	26.5407
54.9	-39.3829	-40.3720	77.7	22.2371	27.5422
55.2	-38.3129	-39.2705	78	23.1071	28.2437
55.5	-37.3429	-38.0689	78.3	23.7771	28.8452
55.8	-36.5729	-36.4674	78.6	23.9471	29.4467
56.1	-35.6029	-34.8659	78.9	24.8171	29.9482
56.4	-34.7329	-33.5644	79.2	25.6871	30.3497
56.7	-34.1629	-33.4629	79.5	26.1571	30.7512
57	-33.1929	-32.9614	79.8	26.7271	31.0527
57.3	-32.2229	-32.2599	80.1	27.2971	31.3542
57.6	-31.5529	-31.3584	80.4	27.4671	31.8557
57.9	-30.8829	-30.5569	80.7	28.1371	32.3572
58.2	-29.9129	-29.7554	81	29.2071	33.0587
58.5	-29.0429	-28.9539	81.3	30.2771	33.7602
58.8	-27.9729	-27.7524	81.6	31.8471	34.5617
59.1	-27.1029	-27.0509	81.9	33.1171	35.5632
59.4	-26.5329	-26.6494	82.2	34.0871	36.4647
59.7	-25.9629	-26.4479	82.5	35.5571	37.3662
60	-25.5929	-26.5464	82.8	36.7271	38.4677
60.3	-23.7229	-22.6449	83.1	37.8971	39.8692

83.4	39.6671	40.8707	102	86.9071	87.2636
83.7	41.2371	41.5722	102.3	88.1771	88.2651
84	41.9071	42.4737	102.6	89.0471	88.6666
84.3	42.8771	42.7752	102.9	89.8171	89.0682
84.6	43.7471	43.0766	103.2	90.6871	89.7697
84.9	44.5171	43.7781	103.5	91.3571	90.4712
85.2	45.1871	44.9796	103.8	92.0271	91.2726
85.5	45.7571	46.1811	104.1	92.7971	91.5741
85.8	45.8271	46.7827	104.4	93.6671	92.6756
86.1	46.0971	47.2842	104.7	94.6371	93.2772
86.4	46.5671	47.8857	105	95.9071	93.9787
86.7	46.9371	48.4872	105.3	97.0771	94.6802
87	47.7071	49.4887	105.6	97.8471	95.4816
87.3	48.7771	50.7902	105.9	98.6171	96.6831
87.6	49.7471	52.2917	106.2	99.3871	97.3846
87.9	50.6171	53.8932	106.5	100.0571	97.9862
88.2	51.2871	55.5947	106.8	100.5271	98.4876
88.5	52.1571	57.4962	107.1	101.0971	99.1892
88.8	53.4271	55.9977	107.4	101.9671	100.0906
89.1	54.4971	56.2992	107.7	103.1371	101.2921
89.4	55.2671	56.7007	108	104.6071	102.6936
89.7	56.0371	57.1022	108.3	106.0771	104.0951
90	56.5071	57.9037	108.6	107.0471	104.9966
90.3	56.3771	58.9052	108.9	107.3171	105.5981
90.6	56.7471	59.6067	109.2	107.3871	106.0996
90.9	57.7171	60.4082	109.5	107.9571	107.4011
91.2	58.9871	61.4097	109.8	108.6271	108.2027
91.5	59.9571	62.1112	110.1	109.3971	108.9041
91.8	61.1271	63.1127	110.4	110.6671	109.8056
92.1	61.8971	64.3142	110.7	111.6371	110.8071
92.4	62.4671	65.1157	111	112.8071	111.8086
92.7	62.9371	66.0172	111.3	113.9771	112.6101
93	63.2071	65.7187	111.6	115.1471	113.8116
93.3	64.3771	66.0202	111.9	116.4171	115.0131
93.6	65.8471	68.0217	112.2	117.6871	116.2146
93.9	66.9171	69.9232	112.5	118.6571	116.6161
94.2	67.9871	70.7247	112.8	119.5271	116.8176
94.5	69.3571	72.1261	113.1	120.1971	117.6191
94.8	70.3271	73.6277	113.4	120.9671	118.5206
95.1	71.5971	74.2292	113.7	121.9371	119.2222
95.4	72.9671	75.2307	114	123.0071	119.6236
95.7	73.8371	75.9321	114.3	124.2771	120.6252
96	74.5071	76.4337	114.6	125.5471	122.0266
96.3	75.1771	77.1352	114.9	126.5171	123.5282
96.6	75.9471	78.0367	115.2	127.3871	124.2297
96.9	76.6171	79.1382	115.5	127.7571	125.0312
97.2	77.0871	80.2397	115.8	128.0271	125.9326
97.5	77.7571	80.8412	116.1	128.4971	127.0341
97.8	78.7271	81.6427	116.4	129.0671	128.2357
98.1	79.1971	82.4442	116.7	129.7371	129.6371
98.4	79.8671	82.4457	117	130.2071	130.7386
98.7	80.3371	82.1472	117.3	130.8771	131.4402
99	80.7071	82.8487	117.6	131.6471	131.8416
99.3	81.0771	83.2502	117.9	132.7171	132.3432
99.6	82.0471	83.9516	118.2	134.1871	132.8447
99.9	82.4171	84.2531	118.5	135.2571	133.7462
100.2	82.6871	84.5546	118.8	136.5271	134.9476
100.5	83.4571	85.2562	119.1	137.8971	136.1492
100.8	84.2271	85.8577	119.4	138.9671	137.2506
101.1	84.6971	86.1592	119.7	140.0371	138.0522
101.4	85.4671	86.5607	120	140.8071	139.0536
101.7	85.9371	86.7622			