

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

Rapport final Projet R854.1

Réalisé par :

André Bégin-Drolet, ing., Ph.D (Chercheur principal)
(Université Laval – Département de génie mécanique)

William Levesque, CPI
(Université Laval – Département de génie mécanique)

Julien Lépine, ing., Ph.D
(Université Laval – Département d'opérations et de systèmes de décision)

Réalisé pour le compte du ministère des Transports et de la Mobilité durable
du Québec

Décembre, 2023

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec et a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec.

REMERCIEMENT

L'équipe de recherche tient à remercier *Camille Rivet, ing.* ainsi que *Marie-Hélène Tremblay, ing., M.Sc.* pour leur support indispensable à la réalisation du projet.

SOMMAIRE

Le projet de recherche vise à étudier l'effet du type de revêtement de chaussée sur la résistance au roulement des véhicules lourds et la variation de consommation de carburant qui en découle. Cette étude a été réalisée dans le but de compléter l'orientation ministérielle sur le choix des chaussées. Ce projet de recherche se concentre spécifiquement sur le contexte québécois. La recherche s'est articulée autour de deux phases, soit la phase théorique et expérimentale. La phase théorique visait à utiliser les connaissances actuelles dans la littérature pour obtenir un portrait exhaustif de la consommation de carburant causée par l'effet de la chaussée. La phase expérimentale visait notamment à valider les modèles développés lors de la phase théorique et les conclusions sous-jacentes qui ont été obtenues.

Développement de l'outil MapEUR :

Un outil de simulation, nommé MapEUR (*Map of Energy Used on Roads*), a été utilisé par l'équipe de recherche pour simuler la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds. Cet outil a été développé par l'équipe de recherche dans le cadre de projets précédents. Celui-ci intègre divers modèles pour calculer la force motrice nécessaire le long d'un itinéraire, prenant en compte des éléments comme la force de résistance aérodynamique et la résistance au roulement. Les simulations réalisées avec l'outil MapEUR dans le cadre du projet considèrent l'ensemble des paramètres qui influencent la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds, et ce, pour mettre l'importance de la chaussée en perspective.

Facteurs qui influencent la consommation de carburant :

Les forces impliquées dans le mouvement des véhicules lourds ont été décomposées selon la résistance aérodynamique, la force gravitationnelle, et la résistance au roulement. Cette dernière intègre autant les conditions d'opération des pneus, que l'effet de la chaussée.

Phase théorique :

La recherche a examiné l'influence de la résistance au roulement induite par la structure (appelé communément dans la littérature *Structure-induced Rolling Resistance* ou SRR). Il s'agit d'un concept directement en lien avec la capacité structurelle de la chaussée. La SRR était considérée comme étant le principal facteur pouvant potentiellement différencier les types de chaussée à l'égard de la consommation de carburant. Un deuxième facteur important pour la question de recherche concerne l'effet du profil d'uni sur la consommation de carburant. Toutefois, les modèles actuellement existants dans la littérature n'indiquent pas spécifiquement qu'il s'agit d'un facteur distinctif entre les types de chaussées à l'égard de la consommation de carburant. La phase expérimentale pourrait clarifier cette question. Les modèles théoriques démontrent que la SRR augmente de manière exponentielle avec la température de la chaussée. Cela indique que la considération des conditions météorologiques québécoises est d'une grande importance pour la question de recherche. Des simulations de

consommation de carburant du trafic de véhicules lourds ont été réalisées dans le cadre d'une étude de cas de l'autoroute 20 de Montréal vers Québec. Ce portrait exhaustif du contexte québécois a été rendu possible grâce au développement d'une nouvelle approche statistique ayant recours à des analyses Monte Carlo. L'étude de cas a été réalisée en considérant différents scénarios théoriques de chaussée, et ce, pour déterminer la pertinence de considérer l'effet de la chaussée sur la consommation de carburant globale.

Phase expérimentale :

Étant donné les limitations des méthodes expérimentales existantes dans la littérature (e.g. mesure de la consommation de carburant), l'équipe de recherche a développé son propre système d'instrumentation pour mesurer la force de résistance au roulement. Ce système d'instrumentation a été installé sur une suspension de semi-remorque et permet de mesurer l'ensemble des forces ainsi que le mouvement relatif entre la suspension et le châssis de la semi-remorque. Ce système d'instrumentation a été utilisé le 4 octobre 2023 sur l'autoroute 20 entre Québec et St-Eulalie. En utilisant la base de données géoréférencée du ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD), des analyses comparatives entre les types de chaussée à l'égard de la résistance au roulement ont été réalisées.

Découvertes importantes :

Le projet de recherche a permis de mettre en lumière l'importance de considérer la variabilité des conditions d'opération au sein du trafic de véhicules lourds pour adéquatement estimer l'importance de la chaussée sur la consommation de carburant globale. Cela est particulièrement vrai dans un contexte québécois, puisque la variation saisonnière des conditions météorologiques est particulièrement significative. La littérature scientifique concernant la SRR consiste majoritairement à simuler un seul véhicule lourd dans des conditions d'opérations spécifiques. Cela est problématique puisque théoriquement, la SRR d'un véhicule lourd est fortement influencée par la température de la chaussée et le poids du véhicule en question. C'est pourquoi l'équipe de recherche a eu recours à une approche de simulation globale qui permet de considérer la variabilité de conditions météorologiques et de véhicules lourds que l'on retrouve spécifiquement au Québec. Cela a permis de calculer la consommation de carburant causée par la SRR à l'échelle du trafic de véhicules lourds et de définir son importance par rapport à l'entièreté de la consommation de carburant. Les résultats de l'approche statistique développée dans le cadre de la phase théorique ont indiqué que le type de chaussée n'était pas un aspect significatif à considérer dans l'estimation de la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds au Québec. Ce constat se base sur deux observations importantes :

1. La **température** de surface de la chaussée au Québec est très basse durant une longue période de l'année, ce qui signifie que la SRR est également très faible durant cette période. L'importance relative du type

de chaussée sur la consommation de carburant globale est donc grandement diminuée dans un contexte québécois.

2. Le **poids** des véhicules lourds varie grandement en raison de leur chargement. Les véhicules lourds qui voyagent sans cargaison ont une SRR considérablement plus faible, mais ceux-ci consomment tout de même du carburant. Il s'agit d'un autre aspect qui diminue l'importance relative du type de chaussée sur la consommation de carburant globale.

Les résultats de la phase théorique indiquaient également que l'importance du profil d'uni augmente dans des conditions hivernales, et ce, en raison de l'augmentation saisonnière de l'indice de rugosité internationale. Toutefois, il ne s'agissait pas a priori d'un facteur distinctif entre les types de chaussée et les simulations ont dû se limiter à une valeur binaire de l'IRI (*i.e.* estival et hivernal).

La phase expérimentale a permis de prendre des mesures de résistance au roulement sur 174 km de l'autoroute 20. La section d'autoroute mesurée contient des conditions de chaussées variées, ce qui inclut les trois types de revêtement: Souple, Rigide, Mixte. Dans le contexte du segment de l'autoroute 20 qui a été mesuré, une chaussée mixte correspond à une chaussée constituée d'un revêtement d'enrobés bitumineux sur une fondation de béton-ciment. L'analyse des résultats expérimentaux a permis de faire les observations suivantes :

1. L'importance mesurée du profil d'uni sur la consommation de carburant semble être un plus faible que prédit. En effet, l'IRI d'une chaussée telle que l'autoroute 20 est généralement bas, ce qui entraîne une consommation de carburant réduite liée au profil d'uni. De plus, le type de chaussée ne semble pas directement influencer cet aspect dans le segment d'autoroute choisi. Finalement, la valeur de la corrélation entre l'IRI et la résistance au roulement mesurée est notable, mais il est crucial de noter que cette corrélation reste statistiquement faible. En d'autres mots, il existe beaucoup de variabilité dans les mesures de résistance au roulement qui ne peut pas être expliquée avec l'IRI. Cela indique que l'IRI n'est probablement pas un bon indicateur de la résistance au roulement induite par une chaussée.
2. Les chaussées mixtes présentent majoritairement une résistance au roulement mesurée plus élevée en comparaison des chaussées souples et rigides. Cela pourrait être expliqué par l'interaction à l'interface entre les deux types de matériaux. Cependant, aucune littérature scientifique théorique ou expérimentale ne peut supporter cette hypothèse actuellement.
3. La différence entre la moyenne de résistance au roulement des chaussées flexibles et rigides est plus faible que la variabilité de résistance au roulement observé sur chacun des types de chaussée. Cela semble indiquer que le type de chaussée ne soit pas un critère suffisant pour statuer sur l'influence de la chaussée sur la résistance au roulement.

Il a été observé que, sur certains segments de chaussée rigides constitués de dalles courtes goujonnées, la résistance au roulement semblait être significativement affectée par une sollicitation périodique mesurée expérimentalement. Autrement dit, la présence des joints de dalles était parfois perceptible dans le mouvement mesuré de la suspension. Bien que la quantité de données expérimentales sur cet aspect soit limitée, ce phénomène semble augmenter la résistance au roulement et ainsi diminuer l'avantage des chaussées rigides par rapport aux chaussées souples.

Les données expérimentales dans ce rapport ont toutes été collectées lors du 4 octobre 2023. À ce stade-ci, il n'est pas possible de confirmer si les observations ci-dessus sont applicables à l'ensemble de l'année.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette section résume les conclusions clés tirées du projet de recherche quant à l'effet du type de revêtement de chaussée sur la résistance au roulement des véhicules lourds dans un contexte québécois. De plus, cette section présente les recommandations de l'équipe de recherche.

Conclusions principales :

1. Dans des conditions autoroutières telles que celles retrouvées sur l'autoroute 20, la variation du profil d'uni ne semble pas contribuer significativement à la quantité d'énergie dissipée dans les amortisseurs de véhicules lourds. De plus, la pente de la corrélation entre l'IRI et la résistance au roulement était notable, mais le coefficient de détermination linéaire obtenu était faible. Cela signifie que l'IRI ne pouvait expliquer qu'une petite proportion de la variation de résistance au roulement observée. Ainsi, l'IRI ne s'est pas révélé être un indicateur fiable de la résistance au roulement induite par la chaussée.
2. Le climat québécois semble diminuer l'avantage potentiel d'utiliser des chaussées rigides plutôt que des chaussées souples à l'égard de la consommation d'énergie des véhicules. L'hypothèse sous-jacente soutenant cette conclusion est que le module d'élasticité des chaussées souples augmente à basse température, ce qui diminue significativement les effets viscoélastiques associés à la SRR de ces chaussées.
3. Les réalités logistiques du transport par véhicules lourds, tel que les voyages à vide, réduisent l'importance relative de la chaussée sur la consommation de carburant globale.
4. Les mesures expérimentales indiquent que les chaussées mixtes auraient une performance systématiquement moins élevée que les chaussées « non mixtes ». Il faut toutefois davantage de données expérimentales pour généraliser ce résultat.
5. Selon les mesures expérimentales, la variabilité de résistance au roulement entre différents segments de chaussées est significative. Par contre, cette variabilité semble trop multifactorielle pour être uniquement expliquée par le type de chaussée.
6. Sur certaines chaussées rigides, la longueur des dalles courtes goujonnées (*i.e.* 5,5 m) était détectable dans le mouvement de la suspension instrumentée et les données suggèrent que ce phénomène semble être à l'origine d'une dégradation de leur performance à l'égard de la résistance au roulement et donc de la consommation de carburant.

Recommandations :

1. Faire une surveillance plus fréquente de l'évolution saisonnière de l'IRI dans un contexte autoroutier. Cela permettrait de voir si le delta IRI est influencé par le type de chaussée et ainsi clarifier si cela peut potentiellement constituer un facteur distinctif entre ceux-ci.
2. Mener à bien des mesures expérimentales avec le système d'instrumentation dans des conditions météorologiques différentes que celle du 4 octobre 2023. Cela permettrait d'observer l'évolution saisonnière de la variabilité de résistance au roulement entre les segments d'autoroute mesurée, et ainsi, avoir un portrait plus exhaustif de la situation.
3. Mener à bien des mesures expérimentales avec le système d'instrumentation sur des autoroutes différentes de celles du 4 octobre 2023. Une plus grande quantité de données expérimentales améliore la signification statistique des résultats et ainsi la confiance dans les conclusions qui en sont tirées. Notamment, il serait pertinent de collecter des mesures sur des chaussées rigides de type béton armé continu.
4. Améliorer les pratiques quant à la mesure du profil d'uni des dalles courtes goujonnées. En effet, cela permettrait de mieux comprendre la prédominance des résultats mesurés par l'équipe de recherche concernant les chaussées de dalles courtes goujonnées, ainsi que leur influence potentielle sur la résistance au roulement.
5. Bien que les chaussées rigides semblent avoir la capacité d'être plus performantes en termes de consommation de carburant des véhicules lourds circulant sur celle-ci, à ce stade-ci, l'équipe de recherche ne peut pas conclure que le type de chaussée est le seul critère à considérer à cet effet.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT	3
SOMMAIRE	4
SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	8
LISTE DES TABLEAUX.....	12
LISTE DES FIGURES.....	13
GLOSSAIRE	17
1 INTRODUCTION	18
2 PROBLÉMATIQUE.....	20
3 MÉTHODOLOGIE	24
3.1 Méthodologie - phase théorique.....	25
3.1.1 Développement de l’outil MapEUR	25
3.1.2 Facteurs qui influencent la consommation de carburant	25
3.1.3 Effets de la chaussée sur la consommation de carburant	27
3.1.4 Approche statistique et étude de cas	30
3.2 Méthodologie - phase expérimentale	34
3.2.1 Approche conceptuelle du système d’instrumentation	34
3.2.2 Implémentation du système d’instrumentation	38
3.2.3 Campagne expérimentale.....	42
4 ANALYSE DES RÉSULTATS.....	44
4.1 Analyse des résultats – phase théorique	44
4.1.1 Analyse des résultats - Scénario de chaussée réelle	44
4.2 Analyse des résultats – phase expérimentale	50
4.2.1 Analyse des résultats – prétraitement des données expérimentales	50
4.2.2 Analyse des résultats – résistance au roulement expérimentale	55
4.2.3 Analyse des résultats – expérimentale et profil d’uni.....	61
4.2.4 Analyse des résultats – Résumé des résultats expérimentaux .	66

5	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	68
5.1	Interprétation des résultats – phase théorique	68
5.2	Interprétation des résultats – phase expérimentale.....	71
5.2.1	Interprétation des résultats expérimentaux – analyse de la température des pneus.....	71
5.2.2	Interprétation des résultats expérimentaux – analyse fréquentielle 73	
5.2.3	Interprétation des résultats expérimentaux – comparaison des types de chaussée.....	77
5.3	Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.....	79
5.3.1	Comparaison théorique et expérimentale – profil d’uni	79
5.3.2	Comparaison théorique et expérimentale – SRR.....	82
6	CONCLUSION.....	85
	RÉFÉRENCES	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Résumé des relations d'échelle pertinentes de la SRR utilisées dans le contexte du projet de recherche pour réaliser différentes simulations de la consommation de carburant.	28
Tableau 2 Valeurs d'IRI extraites de la base de données du MTMD pour l'étude de cas (données représentatives de 2020).	31
Tableau 3 Consommation totale journalière moyenne (CTJM) des quatre scénarios théoriques de chaussée pour toute l'année simulée et une comparaison relative avec le scénario de chaussée rigide.	50
Tableau 4 Résumé des segments de route analysés provenant des mesures expérimentales du 4 octobre 2023.	53
Tableau 5 Pente moyenne de la route et température des pneus provenant des mesures expérimentales du 4 octobre 2023 pour tous les segments de routes analysés.	54
Tableau 6 Résumé des résultats de la force de résistance au roulement moyenne et de la force d'amortissement équivalente moyenne obtenus par le système d'instrumentation le 4 octobre 2023.	66
Tableau 7 Résumé des températures de pneus moyennes par type de chaussée et effet sur la résistance au roulement mesurée comparativement à la température de pneu moyenne; Une valeur négative indique une sous-estimation de la résistance au roulement par rapport à une température de pneu constante, et vice-versa.	73
Tableau 8 Fréquences d'intérêts contenues dans la densité spectrale de puissance du mouvement de la suspension circulant sur chaussée rigide de dalles courtes goujonnées.	76
Tableau 9 Résumé des comparaisons des types de chaussée à l'égard du coefficient de résistance au roulement mesuré avec le système d'instrumentation sur l'autoroute 20 durant la journée du 4 octobre 2023 pour différents types de chaussée.	78

LISTE DES FIGURES

- Figure 1** Diagramme de corps libre d'une roue sous l'effet de la résistance au roulement à vitesse constante sur une chaussée ayant un profil d'uni parfait. 20
- Figure 2** Diagramme de corps libre simulé et résolu par le MapEUR pour un véhicule lourd de type tracteur avec remorque. 26
- Figure 3** Résumé de la force de SRR provenant du comportement viscoélastique d'une chaussée souple aux conditions de référence : données de simulation (*Balzarini, Zaabar, et al., 2019; Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013*), données expérimentales (*Nielsen et al., 2020*) et modèle de régression exponentielle basé sur les données de simulation.
29
- Figure 4** Approche statistique pour évaluer l'effet des propriétés de la chaussée sur la consommation de carburant du trafic des véhicules lourds en tenant compte de la variation des conditions météorologiques, des véhicules lourds et du comportement des conducteurs..... 33
- Figure 5** Emplacements sur la suspension de semi-remorque des grandeurs physiques mesurées par le système d'instrumentation. 35
- Figure 6** Diagramme de corps libre de la suspension de la semi-remorque en mouvement vers le haut sur une pente ascendante: forces (en rouge), vecteurs d'accélération (en vert) et mécanisme à quatre barres de la suspension (en bleu). 37
- Figure 7** Test de freinage sur la cellule de charge; zone de mesure à environ ± 2 kN. 39
- Figure 8** Cellule de charge et son assemblage à l'emplacement 1 de la Figure 5 pour mesurer les forces dans la direction longitudinale et verticale. 40
- Figure 9** Potentiomètre linéaire pour mesurer le mouvement de l'amortisseur (emplacement 2 de la Figure 5); Goupille de charge pour mesurer la force de l'amortisseur (emplacement 3 de la Figure 5); Cellule de charge pour mesure le poids du ballon de suspension (emplacement 4 de la Figure 5).
41
- Figure 10** Image de droite - Capteur de température et de pression des pneus (emplacement 5 de la Figure 5); Image de gauche – MEMS pour la mesure des accélérations et vitesses angulaires du châssis de la semi-remorque (emplacement 6 de la Figure 5) et système d'acquisition de données développé à l'Université Laval. 42

- Figure 11** Trajet parcouru (Aller/Retour) avec le système d'instrumentation dans le cadre de la campagne expérimentale ayant eu lieu le 4 octobre 2023. 43
- Figure 12** Graphique de gauche - Consommation de carburant des 40 312 véhicules lourds simulés voyageant de Montréal vers Québec avec les caractéristiques réelles de la chaussée (scénario 1) pendant un an; Graphique de droite - Diagramme en boîte des quatre quartiles de la distribution statistique de la consommation de carburant pour chaque mois. 45
- Figure 13** Colonne de gauche - Contribution moyenne de chaque facteur sur la consommation totale journalière moyenne (CTJM) du trafic des véhicules lourds pour l'étude de cas réalisée pendant : A) Toute l'année, B) Janvier, C) Juillet; Colonne de droite - Fonction de densité de probabilité de la température de la chaussée pour la période spécifiée avec le ratio de la SRR aux conditions de référence sur la RR totale. Analyse des résultats - Scénarios théoriques de chaussée 48
- Figure 14** Comparaison de la consommation totale journalière moyenne (CTJM) selon le mois de l'année pour le trafic de véhicules lourds de l'étude de cas pour différents scénarios de chaussée théoriques; A) CTJM par mois pour les quatre scénarios de chaussée; B) Différence de CTJM par mois (Rigide – Souple d'épaisseur 0,255 m); C) CTJM par mois lié à l'IRI pour les deux types de chaussée (Rigide et Souple); D) CTJM par mois lié à la SRR pour différents scénarios de chaussée théoriques. 49
- Figure 15** Vitesse du véhicule selon le GPS du système d'acquisition de données durant les mesures du 4 octobre 2023; zones à vitesse constante illustrées en gris. 51
- Figure 16** Évolution de la température moyenne du pneu extérieur droit de la suspension instrumentée durant les mesures du 4 octobre 2023. 52
- Figure 17** Graphique de gauche - Exemple de force de résistance au roulement mesurée sur le segment #9 (i.e. chaussée souple); Graphique de droite – Altitude et température du pneu le long du segment analysé. 55
- Figure 18** Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les types de chaussée. 56
- Figure 19** Force de résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour les trois types de chaussée. 57
- Figure 20** Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les segments de chaussée souple; Graphique de gauche – fonction de densité de probabilité; Graphique de droite – diagramme à barre de chaque segment. 58

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

- Figure 21** Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les segments de chaussée rigide; Graphique de gauche – fonction de densité de probabilité; Graphique de droite – diagramme à barre de chaque segment. 58
- Figure 22** Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les segments de chaussée mixte; Graphique de gauche – fonction de densité de probabilité; Graphique de droite – diagramme à barre de chaque segment. 59
- Figure 23** Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur le segment 2 du Tableau 4 ; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes..... 62
- Figure 24** Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur le segment 15 du Tableau 4 ; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes..... 62
- Figure 25** Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur le segment 10 du Tableau 4; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes..... 63
- Figure 26** Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur une route secondaire; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes..... 63
- Figure 27** Relation entre la puissance d'amortissement moyenne et l'IRI pour tous les segments de routes. 65
- Figure 28** Coefficients de résistance au roulement mesurés et placés en ordre croissant par type de chaussée pour tous les segments lors des mesures expérimentales du 4 octobre 2023. 67
- Figure 29** Fonction de densité de probabilité du chargement par essieu pour le trafic des véhicules lourds au Québec avec la relation d'échelle correspondant pour le calcul de la SRR avec l'équation (2). 70
- Figure 30** Relation entre la résistance au roulement et la température interne moyenne du pneu pour tous les segments des données expérimentales du 4 octobre 2023..... 72
- Figure 31** Force de résistance au roulement mesurée sur deux segments consécutifs de chaussée rigides lors de la campagne expérimentale du 4 octobre 2023..... 74
- Figure 32** Comparaison des densités spectrales de puissance du déplacement de la suspension; Graphique de gauche - Segment 5; Graphique de droite – Segment 6. 75

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

Figure 33	Densité spectrale du mouvement de la suspension sur le segment 2 constitué d'une chaussée souple.....	77
Figure 34	Corrélation linéaire entre le coefficient de résistance au roulement mesuré et l'IRI des segments du 4 octobre 2023,.....	81

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

GLOSSAIRE

<i>RR</i>	Résistance au roulement
<i>CRR</i>	Coefficient de résistance au roulement
<i>SRR</i>	<i>Structure-induced rolling resistance</i> (Résistance au roulement induite par la structure)
<i>IRI</i>	Indice de rugosité international
<i>CTJM</i>	Consommation totale journalière moyenne
<i>Souple</i>	Chaussée ayant un revêtement enrobés bitumineux
<i>Rigide</i>	Chaussée ayant un revêtement en béton-ciment
<i>Mixte</i>	Chaussée ayant un revêtement en enrobés bitumineux et une fondation en béton-ciment
P_d	Puissance d'amortissement moyenne
F_{uni}	Force d'amortissement équivalente moyenne
DJMA	Débit journalier moyen annuel
MapEUR	Outil de simulation : <i>Map of Energy Used on Roads</i>
CO ₂ e	Émissions de gaz à effet de serre en dioxyde de carbone équivalent

1 INTRODUCTION

Au début de l'été 2020, la Direction de la gestion des actifs routiers et de la programmation (DGARP) du ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD) du Québec a contacté le professeur André Bégin-Drolet de l'Université Laval pour discuter de l'impact des différents revêtements de chaussée (rigide et souple) sur la consommation de carburant des véhicules dans un contexte québécois. À la suite de cette discussion, il a été convenu que la littérature scientifique actuelle ne permet pas d'apporter de conclusion précise à ce questionnement étant donné les spécificités climatiques du Québec et la complexité de tous les phénomènes physiques à considérer. Le professeur André Bégin-Drolet a ensuite sollicité le professeur Julien Lépine afin de mettre sur pied un projet de recherche permettant de répondre à cette question. Suite à l'octroi du contrat de recherche par le MTMD, les professeurs Bégin-Drolet et Lépine ont recruté l'étudiant William Levesque pour travailler sur cette question de recherche.

Le projet de recherche R854.1 qui s'intitule *Analyse de l'effet du type de revêtement de chaussée sur la résistance au roulement des véhicules au Québec* a donc été lancé. Le projet R854.1 consiste à investiguer la performance des différents types de chaussée (rigide, souple et mixte) en termes de consommation de carburant des véhicules circulant sur celles-ci. Dans le cadre de cette étude, les chaussées mixtes font référence aux chaussées ayant une fondation de béton-ciment et un revêtement en enrobés bitumineux. Les résultats de cette étude pourraient être intégrés à l'orientation ministérielle portant sur le choix des types de chaussées.

Dans un contexte d'électrification des transports, il est attendu que la décarbonation du parc automobile québécois progresse rapidement dans les prochaines décennies. Toutefois, cette décarbonation sera beaucoup plus longue et complexe pour le secteur du transport par véhicules lourds en raison de nombreuses limitations techniques et logistiques. Cela inclut l'augmentation de la densité énergétique des batteries, la durée de vie des batteries, l'optimisation et la flexibilité des systèmes de propulsion, la réduction des coûts, la mise en place d'infrastructures de recharge et l'élaboration de solutions de fin de vie économiquement viables (Cunanan et al., 2021; D. Smith et al., 2020). Pour toutes ces raisons, le projet R854.1 se concentre sur la consommation de carburant des véhicules lourds.

Il est généralement établi que l'effet de la chaussée sur la consommation de carburant d'un véhicule lourd est relativement faible par rapport à sa consommation de carburant totale (Levesque, Bégin-Drolet, et al., 2023a). Toutefois, la chaussée affecte systématiquement tous les véhicules circulant sur celle-ci. Cela signifie qu'un petit changement systématique dans la consommation de carburant de chaque véhicule lourd circulant sur une chaussée peut entraîner une différence significative des émissions de gaz à effet de serre (CO₂e) à l'échelle du trafic de véhicules lourds (Levesque,

Samson, et al., 2023). En effet, il est estimé que la consommation d'énergie pendant la phase d'utilisation de la chaussée (*i.e.* la consommation de carburant du trafic de véhicules) est environ 700 fois supérieure à la consommation d'énergie pendant la phase de construction de la chaussée (Araújo et al., 2014).

Lors de la réalisation du projet R854.1, l'équipe de recherche a produit de la documentation scientifique. Les références suivantes, qui sont en libre accès, peuvent donc faire office de lecture complémentaire à ce présent rapport :

Samson, N., Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2021). Modelling and Mapping of Heavy-Vehicle Energy Consumption. *16th International Symposium on Heavy Vehicle Transport & Technology, HVTT16*.
<https://hvtforum.org/wp-content/uploads/2021/10/Samson-Modelling-And-Mapping-Of-Heavy-Vehicle-Energy-Consumption.pdf>

Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2023). Effects of Pavement Characteristics on Rolling Resistance of Heavy Vehicles: A Literature Review. *Transportation Research Record*, 1–21.
<https://doi.org/10.1177/03611981221145125>

Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement-effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792).
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>

Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2023). Introducing a Novel Method for Measuring Rolling Resistance and Dynamic Vertical Load on a Semi-Trailer Suspension. *Technology Convergence 2023: Setting the Wheels In Motion: Reimagining the Future of Heavy Vehicles, Roads and Freight*.
https://www.techconverge23.org/files/ugd/5eb250_49c894e34b334e64bc07125a6f74bdd8.pdf

Tadja, H. D., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2023). The effect of truck loading factor on a major trucking route in Québec and on GHG emissions. *Transportation Association of Canada 2023 Conference and Exhibition-Lessons in Leadership//Association Des Transports Du Canada 2022 Congrès et Exposition-Lecons de Leadership.*, 1–21.

2 PROBLÉMATIQUE

L'une des principales causes de la consommation de carburant d'un véhicule lourd provient d'un phénomène nommé « résistance au roulement » (RR). Il est estimé que plus de 50% de la consommation de carburant d'un véhicule lourd de 44 tonnes se déplaçant à 90 km/h sur une autoroute plane est causée par la RR (Odhams et al., 2010). La majorité du phénomène de la RR provient du comportement viscoélastique des pneus (Fraggstedt, 2008) qui est un phénomène indépendant des caractéristiques de la chaussée. Le comportement viscoélastique du pneu crée une distribution de pression asymétrique à la zone de contact entre le pneu et la chaussée (Pacejka, 2012). Le comportement viscoélastique des pneus représenterait 85% à 90% (Bradley, 2000) ou 80% à 95% (LaClair, 2006) de la RR totale.

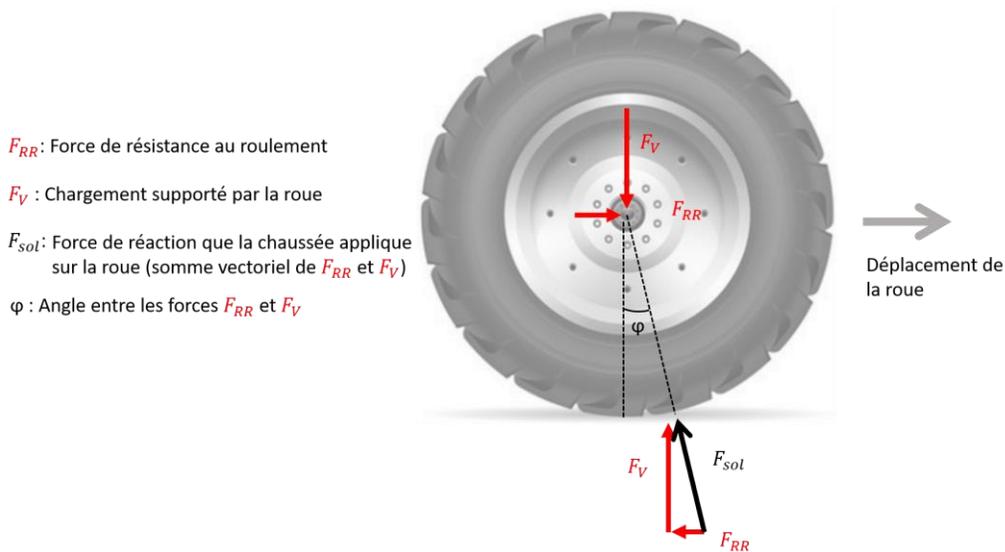


Figure 1 Diagramme de corps libre d'une roue sous l'effet de la résistance au roulement à vitesse constante sur une chaussée ayant un profil d'uni parfait.

Le reste de la RR (entre 5 à 20%) peut être associé à l'influence de la chaussée. Cet aspect est le résultat de la combinaison de différents phénomènes physiques qui dissipent de l'énergie, pouvant être regroupés sous trois thèmes principaux (Levesque, Bégin-Drolet, et al., 2023a; Levesque et al., 2021) :

1. Le **profil d'uni** provoque des mouvements dans les suspensions du véhicule, ce qui dissipe de l'énergie dans les amortisseurs (Liu & Al-Qadi, 2021).

2. La **macrotecture** du revêtement de chaussée crée des déformations viscoélastiques supplémentaires sur la bande de roulement des pneus de véhicules (J. Ejsmont & Sommer, 2021).
3. Le comportement viscoélastique de la **structure** des chaussées souples est responsable d'une pente ascendante perpétuelle perçue par les roues de véhicules lourds (Ziyadi et al., 2022). Ce phénomène s'appelle la résistance au roulement induite par la structure. Dans la littérature scientifique, ce phénomène est communément appelé *Structure-induced Rolling Resistance* (SRR) (Nielsen, 2020) et il s'agit de l'acronyme utilisé dans ce rapport.

L'influence du profil d'uni sur la consommation de carburant est un sujet d'étude de longue date (Andersen et al., 2015; Andren, 2006; Bennett & Greenwood, 2003; Cebon, 1999; Chatti & Zaabar, 2012; Clark & Smith, 2012; Dodds & Robson, 1973; International Organization for Standardization, 1996; Kim et al., 2017; Kropáč & Múčka, 2008; Lépine, 2016; Liu & Al-Qadi, 2021; Loprencipe & Zoccali, 2017; Louhghalam, Akbarian, et al., 2015; Louhghalam et al., 2019; Louhghalam, Tootkaboni, et al., 2015; Lu, 1985; Robson & Kamash, 1977; M. C. Smith & Swift, 2011; Zaabar & Chatti, 2010; Zhang et al., 2021). Par exemple, le *HDM-4 model* établi une relation linéaire entre l'Indice de Rugosité International (IRI) et l'excès de consommation de carburant des véhicules (Chatti & Zaabar, 2012). Toutefois, ce modèle ne fait pas de distinction entre les chaussées rigides et souples. La littérature scientifique actuelle ne permet donc pas de savoir si l'influence du profil d'uni sur la consommation de carburant constitue un facteur qui différencie les types de chaussée sur cette question. Par ailleurs, la littérature scientifique actuelle ne donne pas de conclusions claires sur l'effet de l'évolution de l'IRI à long terme entre les deux types de chaussée sur la différence de consommation d'énergie des véhicules. Ainsi, considérant que le climat québécois peut faire augmenter l'IRI de manière saisonnière (Fradette et al., 2005), il n'est pas clair si cet aspect est plus prépondérant pour un type de chaussée en particulier.

Il existe de nombreux résultats expérimentaux dans la littérature indiquant que la macrotecture de la chaussée influence significativement la RR des voitures (J. A. Ejsmont et al., 2012, 2014, 2017). Par contre, il semble beaucoup plus difficile de démontrer cette relation pour les véhicules lourds (Andersen, 2015; Karlsson et al., 2011a). De plus, il n'existe pas à l'heure actuelle de métrique bien établie permettant de faire un lien direct entre la macrotecture d'un revêtement de chaussée et la consommation de carburant (J. Ejsmont & Sommer, 2021) d'un véhicule lourd (Andersen, 2015).

La littérature scientifique indique que la consommation de carburant associée à la SRR des chaussées souples augmente de manière exponentielle avec la température (Balzarini, Zaabar, et al., 2019; Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013; Coleri & Harvey, 2017; Dhakal & Elseifi, 2017; Estaji et al., 2021; Pouget et al., 2012; Shakiba et al., 2016; Ziyadi et al., 2022). Par opposition, la SRR serait toujours très faible pour les chaussées rigides, et ce, peu importe les

conditions (Balzarini, Chatti, et al., 2019; Balzarini et al., 2017a). Cela semble indiquer qu'il s'agit d'un facteur très important à considérer pour répondre à la question de recherche. Il est toutefois essentiel d'analyser l'effet de l'hiver québécois qui augmente de manière saisonnière la rigidité des chaussées, ce qui pourrait contrebalancer l'avantage relatif des chaussées rigides en lien avec la SRR.

Un défi du projet R854.1 est la grande variété de véhicules lourds et de conditions météorologiques que l'on retrouve sur le réseau routier, et ce, plus particulièrement dans un contexte québécois. En effet, puisqu'il existe de nombreuses configurations de véhicules lourds (Direction du transport routier des Marchandises, 2013) avec des chargements différents (Mohanraj & Merritt, 2023) qui opèrent dans des conditions météorologiques variées (Levesque, Samson, et al., 2023), il n'est pas possible *a priori* de définir des paramètres de simulation « moyens ». Cela est problématique, car beaucoup de modèles théoriques en lien avec la question de recherche fonctionnent avec un ensemble précis de paramètres de simulation (Mohanraj & Merritt, 2023) et ces simulations fournissent un résultat uniquement valide pour les paramètres choisis. De plus, les différents paramètres de simulation n'ont pas tous une relation linéaire avec la consommation de carburant, ce qui complique d'autant plus le calcul de résultats dit « moyen ». Pour obtenir un portrait représentatif du contexte québécois, il est donc indispensable de développer une nouvelle méthode permettant de faire varier les paramètres de simulation d'une manière qui correspond statistiquement à un trafic réaliste de véhicules lourds (Levesque, Samson, et al., 2023).

Ces dernières années, de nombreuses organisations gouvernementales ont mené des études expérimentales pour quantifier l'effet des caractéristiques de la chaussée sur la consommation de carburant des véhicules lourds (Butt et al., 2022; Hammarström et al., 2012; Karlsson et al., 2012; Paterlini et al., 2015; U. Sandberg et al., 2011). Toutefois, les résultats avancés par les différents auteurs sont généralement contradictoires. En effet, certains auteurs suggèrent une relation directe entre le type de chaussée et la consommation de carburant des véhicules lourds (Taylor & Patten, 2006), tandis que d'autres indiquent n'avoir déterminé aucune corrélation claire (Butt et al., 2022).

Les approches expérimentales existantes pour mesurer la RR des véhicules lourds sur de véritables routes se basent toutes sur une approche indirecte (e.g. mesure de la consommation instantanée de carburant). Cela signifie que, pour isoler l'effet de la RR sur la consommation de carburant, un modèle de véhicule approprié qui prend en compte chaque paramètre affectant la consommation de carburant (e.g. traînée aérodynamique, efficacité moteur) doit être utilisé. Puisque la contribution de la chaussée à la RR totale et donc à la consommation de carburant d'un véhicule lourd est relativement faible, la précision de ces méthodes expérimentales est donc limitée (Madhusudhanan et al., 2021).

Un dernier aspect important de la question de recherche est que l'on s'intéresse à la différence relative de consommation de carburant entre les deux types de

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

chaussée, et non à la différence absolue. Pour toutes différences quantifiables de consommation de carburant entre les deux types de chaussée, il est essentiel d'exprimer ces résultats en proportion de la totalité de la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds. Le cas échéant, c'est la différence relative de consommation de carburant qui doit être utilisée pour l'élaboration d'un nouveau critère de performance des types de chaussée.

3 MÉTHODOLOGIE

La résolution de la question de recherche s'est faite en deux phases distinctes :

1. Phase théorique : Consiste à décortiquer et utiliser les différents modèles actuellement disponibles dans la littérature scientifique qui permettent d'estimer la consommation de carburant associée aux propriétés de la chaussée (e.g. type de revêtement) (Levesque, Samson, et al., 2023).
2. Phase expérimentale : Développement et utilisation d'un nouveau système d'instrumentation pour mesurer la RR des véhicules avec une approche plus directe et précise (Levesque, Bégin-Drolet, et al., 2023b).

La phase théorique inclut le développement d'une nouvelle approche statistique dans laquelle les différents modèles extraits de la littérature ont été intégrés. Cela permet de faire des simulations à grande échelle qui sont représentatives du contexte québécois et d'élaborer différents scénarios de gestion des chaussées (e.g. type de chaussée, épaisseur de revêtement).

La phase expérimentale vise notamment à valider les différents modèles utilisés lors de la phase théorique, ainsi que les conclusions générales qui en découlent. Il est attendu que cette nouvelle approche expérimentale (Levesque, Bégin-Drolet, et al., 2023b) fournisse des résultats plus précis que ce qui se retrouve actuellement dans la littérature scientifique sur le sujet (Butt et al., 2022; Chatti & Zaabar, 2012; Karlsson et al., 2011b; Taylor & Patten, 2006).

3.1 Méthodologie - phase théorique

3.1.1 Développement de l'outil MapEUR

L'équipe de recherche a développé un outil de simulation de véhicules lourds qui se nomme MapEUR (*Map of Energy Used on Roads*) (Samson et al., 2021). Il s'agit d'un outil numérique qui intègre différents modèles permettant de simuler la consommation de carburant d'un véhicule lourd.

Avec le logiciel MapEUR, la consommation de carburant est calculée à partir de la force motrice nécessaire le long d'un itinéraire pour que le véhicule lourd simulé puisse se déplacer à une vitesse donnée. Un contrôleur prédictif a été développé pour calculer la force motrice nécessaire aux positions futures du véhicule. Ce contrôleur prédictif permet de simuler des profils de vitesse réalistes et peut notamment être utilisé pour définir différents comportements de conducteur (Samson et al., 2021). Les magnitudes de force motrice calculées par le MapEUR sont intégrées le long des segments pour obtenir la consommation d'énergie totale du parcours. La consommation de carburant est calculée en tenant compte de l'efficacité du moteur et de la valeur calorifique du carburant, la première dépendant de la force motrice. L'utilisation du MapEUR est essentielle pour répondre convenablement à la question de recherche puisque cet outil permet de calculer la totalité de la consommation de carburant et de mettre l'importance du type de chaussée en perspective. C'est pour cette raison que certains facteurs qui influencent la consommation de carburant et qui ne sont pas reliés à la chaussée (e.g. résistance aérodynamique) ont été intégrés aux simulations. Ce qui est inclus dans les simulations est expliqué en détail dans les prochaines sections de ce rapport. Le fonctionnement détaillé de l'outil MapEUR se retrouve dans un article de conférence scientifique (Samson et al., 2021).

3.1.2 Facteurs qui influencent la consommation de carburant

La force motrice est calculée par le MapEUR en résolvant les équations de la deuxième loi de Newton du diagramme de corps libre suivant :

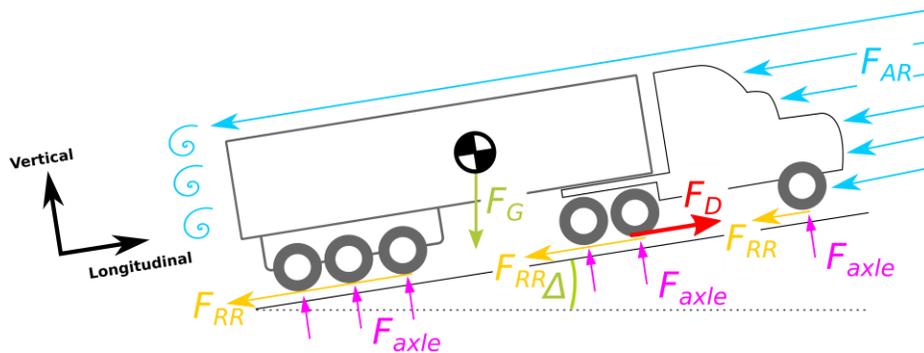


Figure 2 Diagramme de corps libre simulé et résolu par le MapEUR pour un véhicule lourd de type tracteur avec remorque.¹

$$ma_L = F_D - F_G \sin(\Delta) - F_{AR} - F_{RR} \quad (1)$$

Où :

- m : Masse du véhicule (kg).
- a_L : Accélération longitudinale du véhicule (m/s^2).
- F_D : Force motrice fournie par le moteur (N).
- F_G : Force gravitationnelle (N).
- Δ : Pente de la route ($^\circ$).
- F_{AR} : Force de résistance aérodynamique (N).
- F_{RR} : Force de résistance au roulement (N).

Les forces F_{axle} représentent le poids supporté par chaque essieu du véhicule et sont appelées « chargement par essieu ». Les chargements par essieu, qui sont généralement différents entre les essieux d'un même véhicule, dépendent non seulement du poids total du véhicule, mais aussi de la position du centre de masse et de la configuration géométrique du véhicule simulé.

Avec le logiciel MapEUR, la force de résistance aérodynamique (F_{AR}) dépend de la vitesse du véhicule, de sa surface frontale, de son coefficient de traînée, de la vitesse relative du vent, et de la densité de l'air. Cette dernière est ajustée automatiquement par le MapEUR en fonction de la température de l'air. Le coefficient de traînée dépend de la forme du véhicule (hosravi et al., 2015).

Pour prendre en compte la variété de véhicules lourds que l'on peut retrouver sur le réseau routier québécois (Direction du transport routier des Marchandises, 2013), différents archétypes de véhicule lourd ont été définis et programmés dans le logiciel MapEUR. Le coefficient de traînée pour ces archétypes a été défini à partir de diverses références dans la littérature (Chowdhury et al., 2013;

¹ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>.
Licence : CC BY-NC-ND 4.0 DEED (Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International).

Khosravi et al., 2015; Odhams et al., 2010; Wang et al., 2015). Ces archétypes tiennent également compte de l'utilisation d'équipements conçus pour réduire le coefficient de traînée des véhicules lourds. Puisque le projet de recherche se concentre sur les infrastructures autoroutières où la limite de vitesse effective se situe entre 90 et 105 km/h, les variations du coefficient de traînée dues aux changements de vitesse ont été considérées négligeables (Pevitt et al., 2012).

Avec le logiciel MapEUR, la force de RR (F_{RR}) est divisée en deux composantes: le comportement viscoélastique du pneu et la contribution de la chaussée à la RR. La première composante est responsable de la majorité de la RR et est créée par la distribution de pression asymétrique à la zone de contact entre le pneu et la chaussée (Pacejka, 2012). La force de RR due au pneu (F_{pneu}) dépend de nombreuses conditions d'opération (Ydrefors et al., 2021), mais surtout de la pression de gonflage et de la température de fonctionnement (Popov et al., 2003) ces deux paramètres étant interdépendants. Un modèle de RR de pneu a été programmé dans le logiciel MapEUR où le coefficient de RR dépend de la température de fonctionnement en régime permanent du pneu (T. Sandberg, 2001a, 2001b; T. Sandberg et al., 2004). Cette dernière valeur dépend de la vitesse en régime permanent du véhicule, du chargement par essieu, et de la température de l'air (Sandberg et al., 2004). Étant donné que le projet de recherche se concentre sur les infrastructures autoroutières, aucun régime transitoire de la température de fonctionnement du pneu n'a été pris en compte.

3.1.3 Effets de la chaussée sur la consommation de carburant

Pour la phase théorique du projet de recherche, la SRR et le profil d'uni ont été considérés dans les simulations de consommation de carburant. La phase théorique du projet de recherche n'inclut pas l'effet de la macrotecture de la chaussée, puisque la littérature scientifique sur le sujet n'est pas suffisamment avancée pour élaborer des modèles (J. Ejsmont & Sommer, 2021; Karlsson et al., 2011b).

Il est courant dans la littérature de quantifier la SRR d'une chaussée souple en simulant sa déflexion sous l'effet d'une charge mobile à l'aide de méthodes par éléments finis (Balzarini, Zaabar, et al., 2019; Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013). Il a été établi que la SRR d'une chaussée souple suit une relation exponentielle avec la température de surface. Pour obtenir une telle expression mathématique, les résultats d'études théoriques de différents auteurs (Balzarini, Zaabar, et al., 2019; Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013) ont été comparés et moyennés. Étant donné que les auteurs susmentionnés ont simulé différents chargements par essieu ainsi que des structures de chaussée différentes (*i.e.* épaisseur, module d'élasticité), les résultats doivent être normalisés avec des conditions de référence commune afin d'être comparables.

Les conditions de référence choisies dans le cadre du projet de recherche pour quantifier la SRR des chaussées souples sont représentatives d'une combinaison typique d'autoroute et de véhicule lourd que l'on retrouve au

Québec (Direction du transport routier des Marchandises, 2013): essieu de 10 tonnes, épaisseur de revêtement bitumineux de 0,255 m et module de fondation de 184 MPa. Pour effectuer une telle normalisation, le modèle du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) constitué d'une poutre d'Euler viscoélastique sur une fondation élastique (Louhghalam et al., 2014) a été utilisé. Le modèle du MIT suggère des « relations d'échelle » qui expriment la proportionnalité entre la SRR et les différents paramètres physiques à considérer (Louhghalam et al., 2014). Dans le cadre du projet de recherche, les paramètres qui influencent la SRR et leurs relations d'échelle sont les suivants :

Tableau 1 : Résumé des relations d'échelle pertinentes de la SRR utilisées dans le contexte du projet de recherche pour réaliser différentes simulations de la consommation de carburant.

Paramètre physique	Relation d'échelle
Chargement par essieu	2
Épaisseur du revêtement bitumineux	-3/4
Module d'élasticité de la fondation	-1/4

La manière d'interpréter le Tableau 1 est la suivante: la relation d'échelle de la SRR portant sur le chargement par essieu est de 2, ce qui signifie que le fait de tripler le chargement par essieu augmente d'un facteur neuf la SRR sur cet essieu puisque 3^2 donne 9.

Les différents résultats théoriques de SRR extraits de la littérature (Balzarini, Zaabar, et al., 2019; Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013) ont été comparés avec les deux ensembles de données expérimentales (18 et 35 °C) présentement disponible dans la littérature (Nielsen et al., 2020). Ces données expérimentales de SRR ont été obtenues en mesurant avec des lasers Doppler la pente du bassin de déflexion d'une chaussée souple causée par un essieu de 10 tonnes en mouvement. Avec cette méthode expérimentale, il a été estimé que le coefficient moyen de SRR à une température de surface de 18 °C et 35 °C était respectivement de 0,014 % et 0,023 %, ce qui équivaut à une force de SRR de 13,7 N et 22,6 N par essieu, respectivement. Les valeurs théoriques normalisées de SRR ainsi que les données expérimentales sont présentées dans la

Figure 3. Un modèle de régression exponentielle basé sur les valeurs théoriques de SRR est également illustré.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

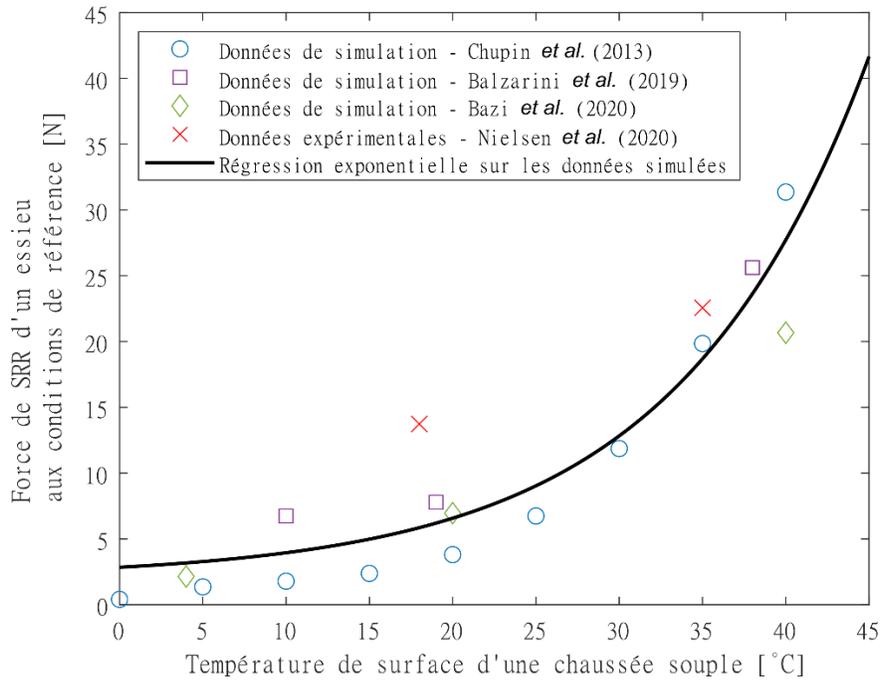


Figure 3 Résumé de la force de SRR provenant du comportement viscoélastique d'une chaussée souple aux conditions de référence : données de simulation (Balzarini, Zaabar, et al., 2019; Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013), données expérimentales (Nielsen et al., 2020) et modèle de régression exponentielle basé sur les données de simulation.²

Les données théoriques de SRR présentées dans la Figure 3 ont été moyennées pour obtenir une relation entre la température de la chaussée souple et la force de SRR d'un essieu de véhicule lourd. L'équation qui en découle est la suivante :

² Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement-effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>.
Licence : CC BY-NC-ND 4.0 DEED (Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International).

$$F_{SRR} = \left(\frac{F_{axle}}{10 \text{ ton}} \right)^2 \left(\frac{h_{AC}}{0.255 \text{ m}} \right)^{-0.75} (k_1 e^{k_2 T} + k_3) \quad (2)$$

Où,

F_{SRR} : Force de SRR sur un essieu de véhicule lourd (N)

F_{axle} : Chargement de l'essieu (ton)

h_{AC} : Épaisseur du revêtement bitumineux (m)

T : Température de surface de la chaussée (°C)

k_1, k_2, k_3 : Coefficients de régressions d'une valeur de 0.7994, 0.08674 et 2.042 respectivement

Dans le cadre de la phase théorique, l'équation 2 s'applique autant aux chaussées souples qu'aux chaussées mixtes, et ce, car une telle distinction à l'égard de la SRR n'existe pas dans la littérature. Il est important de comprendre que l'équation 2 calcule la force de SRR d'un essieu seulement. Pour calculer la force de SRR sur le véhicule lourd au complet, il faut sommer la force de SRR de chaque essieu du véhicule. La forme exponentielle de l'équation 2 est conforme à ce qui est présenté dans la littérature plus récente sur le sujet (Liu & Al-Qadi, 2022; Ziyadi et al., 2022).

Les valeurs du *HDM-4 model* (Bennett & Greenwood, 2003) qui donnent un excès de consommation de carburant linéairement proportionnelle à l'IRI (Chatti & Zaabar, 2012) ont été transformées en force de résistance correspondante (F_{IRI}). Cette dernière valeur a été insérée directement dans l'équation 1 du diagramme de corps libre de la

Figure 2 qui est calculée par le MapEUR. L'effet du profil d'uni sur la consommation de carburant d'un véhicule lourd peut se résumer à l'équation suivante :

$$F_{IRI} = 100,55(IRI - 1) \quad (3)$$

Où:

F_{IRI} : Force de résistance du profil d'uni (N)

IRI: Indice de rugosité international de la chaussée (m/km)

La force de RR (F_{RR}) de l'équation 1, qui inclut la viscoélasticité des pneus et l'effet de la chaussée, peut se résumer à l'équation suivante :

$$F_{RR} = F_{tire} + F_{SRR} + F_{IRI} \quad (4)$$

Il est essentiel de noter que F_{tire} a été calculé individuellement pour chaque pneu, F_{SRR} pour chaque essieu circulant sur une chaussée souple et F_{IRI} pour le véhicule lourd dans son ensemble.

3.1.4 Approche statistique et étude de cas

La nouvelle approche statistique développée par l'équipe de recherche implique l'utilisation d'une méthode algorithmique nommée *Monte Carlo*. Il s'agit ici de générer un grand nombre de simulations de consommation de carburant en

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

faisant varier les paramètres d'entrée de manière aléatoire en suivant leur distribution statistique respective. Les simulations de consommation de carburant cessent lorsqu'il y a convergence de la consommation de carburant moyenne.

Pour un segment de route réel, les véhicules lourds qui circulent et les conditions météorologiques varient constamment (sur une base horaire), tandis que les caractéristiques de la chaussée varient beaucoup plus lentement (sur une base annuelle). Suivant cette logique, l'approche statistique définit deux grandes catégories de variables d'entrée: les variables aléatoires et les variables déterministes. Les variables aléatoires sont relatives aux caractéristiques du véhicule simulé, au comportement du conducteur et aux conditions météorologiques de la simulation. Les variables aléatoires sont celles qui nécessitent l'utilisation de distributions statistiques. Les variables déterministes quant à elles sont relatives à la chaussée et celles-ci demeurent les mêmes entre les différentes simulations de consommation de carburant.

Avec cette approche conceptuelle, il est possible d'obtenir un portrait global de la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds. De plus, il est possible de changer certaines variables déterministes pour élaborer des scénarios théoriques de chaussée et par le fait même, d'évaluer l'effet sur la consommation de carburant globale. Dans le cadre de la phase théorique, une étude de cas sur un segment de 254,4 km de l'autoroute 20 de Montréal vers Québec a été réalisée. Pour ce faire, la base de données géoréférencée du MTMD a été mise à profit pour obtenir de l'information en lien avec le type de chaussée, l'IRI, le delta IRI en hiver, le gel et le dégel du sol, et la pente de la route. Ces informations sont résumées au Tableau 2.

Tableau 2: Valeurs d'IRI extraites de la base de données du MTMD pour l'étude de cas (données représentatives de 2020).

Type (%)		Valeurs d'IRI (m/km)			
		Été			Delta IRI
		Moyenne	Minimum	Maximum	
Souple	48,1	1,16	1,00	2,21	0,62
Mixte	44,3	1,64	1,00	4,58	0,46
Rigide	7,6	1,57	1,37	2,67	0,29

L'étude de cas inclut la simulation de cinq scénarios de chaussée:

- Scénario 1 : Autoroute réelle telle que mesurée en 2020
- Scénario 2 : Autoroute complètement rigide
- Scénario 3 : Autoroute complètement souple et un revêtement de 0,180 m d'épaisseur
- Scénario 4 : Autoroute complètement souple et un revêtement de 0,255 m d'épaisseur
- Scénario 5 : Autoroute complètement souple et un revêtement de 0,330 m d'épaisseur

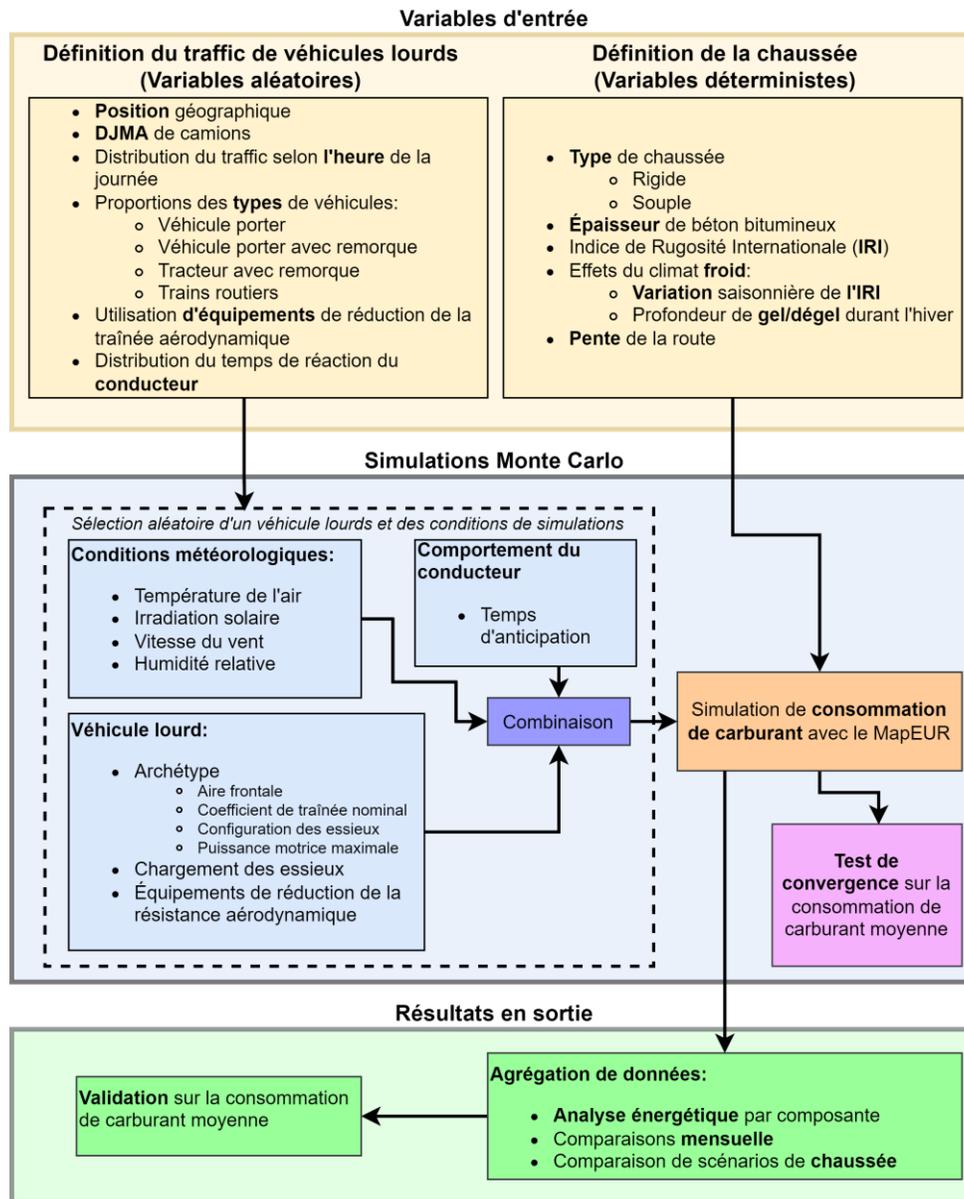
Chaque scénario susmentionné nécessite des dizaines de milliers de simulations de consommation de carburant avant d'obtenir une convergence sur la consommation moyenne.

Pour le scénario 1, toutes les épaisseurs de revêtement de chaussée souple ont été considérées comme ayant une valeur typique de 0,255 m, ce qui représente approximativement la valeur médiane de la plage possible d'épaisseurs de revêtement sur les autoroutes à haut débit au Québec. L'épaisseur de 0,180 m représente une chaussée relativement mince pour une autoroute à haut débit, tandis que 0,330 m constitue un cas extrême et très rare au Québec.

L'IRI en conditions hivernales peut augmenter significativement par rapport aux conditions estivales en raison de deux facteurs principaux: le soulèvement différentiel de la fondation et le soulèvement des fissures (Fradette et al., 2005). Le premier facteur est causé par la variabilité de la sensibilité au gel de la fondation et a pour effet de produire des longueurs d'onde longues dans le profil d'uni (ibidem). Le second facteur est un phénomène localisé fortement influencé par l'application de sels de déglacage qui produit des longueurs d'onde courtes dans le profil d'uni (ibidem). Puisque la base de données géoréférencée du MTMD fournit deux valeurs d'IRI (estival et hivernal), une logique binaire a été appliquée. L'IRI hivernal a été utilisé lorsque la profondeur de dégel pendant la journée était inférieure à la profondeur de gel pendant la nuit. Dans le cas contraire, l'IRI estival a été utilisé. Dans le cadre des scénarios théoriques de chaussée (*i.e.* 2 à 5), le delta IRI a été simulé comme constant et identique entre les chaussées souples et rigides. De plus, l'IRI estival des scénarios théoriques de chaussée (*i.e.* 2 à 5) a été défini comme étant la moyenne d'IRI d'une chaussée neuve sur l'ensemble du réseau routier québécois, ce qui représente 1,19 m/km et 1,22 m/km pour les chaussées souples et rigides respectivement. Les scénarios théoriques de chaussée sont donc seulement utiles pour comparer l'effet de la SRR sur la consommation de carburant.

L'ensemble de la nouvelle approche statistique développée par l'équipe de recherche peut se résumer à la Figure 4.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC



Validation sur la consommation de carburant moyenne

Agrégation de données:

- Analyse **énergétique** par composante
- Comparaisons **mensuelle**
- Comparaison de scénarios de **chaussée**

Figure 4 Approche statistique pour évaluer l'effet des propriétés de la chaussée sur la consommation de carburant du trafic des véhicules lourds en tenant compte de la variation des conditions météorologiques, des véhicules lourds et du comportement des conducteurs.³

³ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>.

3.2 Méthodologie - phase expérimentale

Comme mentionné précédemment, les études expérimentales en lien avec la question de recherche donnent des résultats contradictoires (Butt et al., 2022; Taylor & Patten, 2006) et il est souvent difficile d'extrapoler ces résultats (Paterlini et al., 2015; U. Sandberg et al., 2012) en termes de consommation de carburant à l'échelle du trafic de véhicules lourds. La principale raison qui explique cette problématique est le fait qu'il est d'un point de vue technique très difficile de mesurer l'effet de petites variations de RR sur la consommation de carburant d'un véhicule lourd dans de vraies conditions de conduite (Domprobst, 2021). En effet, énormément de paramètres non contrôlables (e.g. pente de la route, cargaison variée, conditions météorologiques, etc.) viennent « brouter » la valeur à mesurer et il devient rapidement très difficile d'analyser les résultats obtenus et d'apporter une interprétation physique compréhensible (Domprobst & Beaupere, 2023). Certains auteurs suggèrent d'utiliser des techniques d'intelligence artificielle sur des données de consommation de carburant pour étudier l'effet de la chaussée (Perrotta et al., 2018, 2019). Cependant, ce genre d'approche mène généralement à une « boîte noire » qui ne permet pas de bien comprendre l'effet des différents paramètres sur la consommation de carburant. Pour le projet de recherche, il est primordial d'avoir des résultats expérimentaux intelligibles en termes d'influence de la chaussée sur la consommation de carburant.

3.2.1 Approche conceptuelle du système d'instrumentation

Dans ce contexte, l'équipe de recherche a décidé de développer une nouvelle approche expérimentale pour mesurer plus précisément la RR des véhicules lourds dans de véritables conditions de conduite. Il s'agit ici d'installer différents instruments de mesure sur une suspension de semi-remorque pour mesurer les forces et le mouvement lorsque le véhicule roule dans des conditions autoroutières. Cette approche vise à mesurer directement la force de RR qui se produit à l'interface pneu/chaussée. La quantification de cette force permet de connaître exactement la consommation de carburant qui lui est associé, car l'énergie est une quantité physique qui se conserve (Cengel et al., 2014). Autrement dit, la quantité d'énergie associée à la RR mesurée peut être convertie directement en consommation de carburant. L'avantage de ce système par rapport aux approches indirectes (Madhusudhanan et al., 2021) est qu'il n'est pas nécessaire de considérer des aspects non reliés à la RR tels que la résistance aérodynamique ou l'efficacité moteur. La précision des mesures s'en retrouve donc augmentée. Figure 5 illustre l'ensemble des quantités physiques qui ont été mesurées sur la semi-remorque:

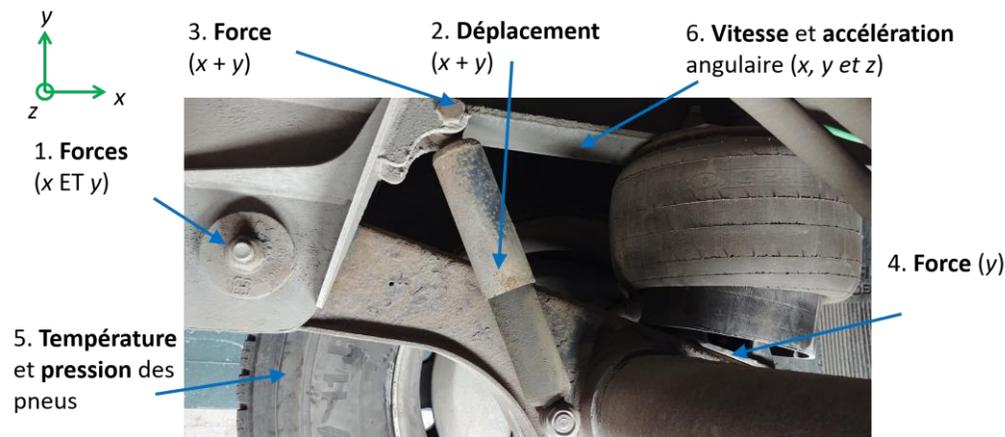


Figure 5 Emplacements sur la suspension de semi-remorque des grandeurs physiques mesurées par le système d'instrumentation.⁴

Les emplacements 1, 3 et 4 sont les trois endroits où il peut y avoir une force transmise entre la suspension et le châssis de la semi-remorque. La mesure de ces forces permet donc de calculer la force de RR à l'interface pneu/chaussée, et ce, en résolvant les équations du diagramme de corps libre de la suspension.

Le déplacement de l'amortisseur de la suspension (emplacement 2 de la Figure 5) a également été mesuré. Les mesures de déplacement et de force de l'amortisseur qui correspondent respectivement aux emplacements 2 et 3 dans la Figure 5 permettent de calculer directement l'énergie dissipée dans l'amortisseur. Ce faisant, le système d'instrumentation permet de mesurer directement la quantité d'énergie associée au profil d'uni. En effet, un profil d'uni « parfait » implique que la suspension ne subit aucun mouvement relatif aux châssis du véhicule, et donc que la quantité d'énergie dissipée dans l'amortisseur est nulle. Le système d'instrumentation permet de comparer les deux types de chaussée en termes de consommation de carburant causée par leur profil d'uni et ainsi déterminer s'il s'agit d'un aspect important pour la question de recherche.

Comme indiqué à l'emplacement 5 de la Figure 5, la température et la pression des pneus sont mesurées. Comme mentionné précédemment, la RR des pneus représente la majorité de la RR totale. De plus, la RR des pneus varie grandement en fonction de leurs conditions d'opérations (Ydrefors et al., 2021) telles que la température de fonctionnement et la pression de gonflage. La

⁴ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2023). *Introducing a Novel Method for Measuring Rolling Resistance and Dynamic Vertical Load on a Semi-Trailer Suspension*. *Technology Convergence 2023: Setting the Wheels In Motion: Reimagining the Future of Heavy Vehicles, Roads and Freight*. https://www.techconverge23.org/_files/ugd/5eb250_49c894e34b334e64bc07125a6f74bdd8.pdf

mesure de ces deux quantités physiques permet de s'assurer qu'un changement de RR mesurée qui serait causé par une variation de température de fonctionnement du pneu ne soit pas faussement attribué à un changement de type de chaussée. Autrement dit, le système d'instrumentation permet de s'assurer que les conditions d'opération du pneu sont en régime stationnaire lorsque les données sont analysées pour comparer les types de chaussée.

Les mesures d'accélération et vitesses angulaires du châssis de la semi-remorque à l'emplacement 6 de la Figure 5 peuvent servir à considérer l'effet de la pente de la route sur les signaux de mesure. En effet, la masse de la suspension fait en sorte que l'effet de son poids sur les forces mesurées est non nul lorsque la pente de la route est non nulle, ce qui est pratiquement toujours le cas. Ceci dit, il ne s'agit pas d'un problème significatif, puisque les forces mesurées sur une autoroute plane peuvent être moyennées sur de longues distances. En effet, plus le segment de route considéré est long, plus sa pente moyenne tend vers zéro.

Les différentes mesures prises peuvent être intégrées à un modèle permettant de considérer l'ensemble des paramètres physiques simultanément. Cela est illustré à la Figure 6.

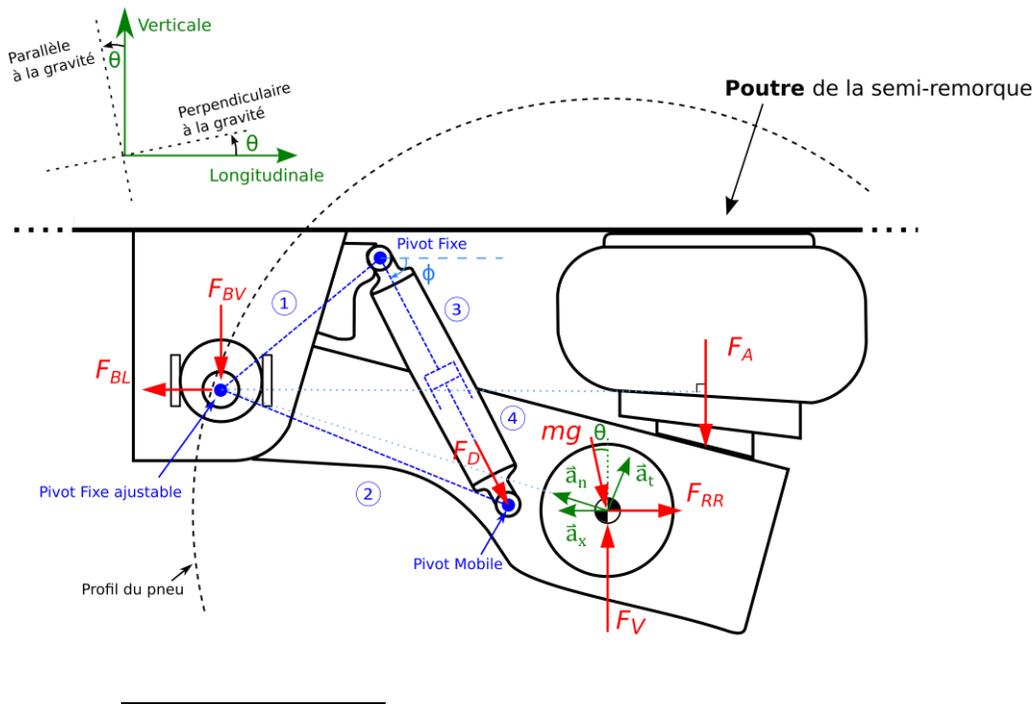


Figure 6 Diagramme de corps libre de la suspension de la semi-remorque en mouvement vers le haut sur une pente ascendante: forces (en rouge), vecteurs d'accélération (en vert) et mécanisme à quatre barres de la suspension (en bleu).⁵

En appliquant certains principes de cinématique et en résolvant le diagramme de corps libre de la Figure 6, les équations suivantes sont obtenues (Levesque, Bégin-Drolet, et al., 2023b):

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_t + \vec{a}_x = \vec{a}_L + \vec{a}_V \quad (5)$$

$$F_{RR} = m\|\vec{a}_L\| - F_D \cos(\phi) + F_{BL} - mg \sin(\theta) \quad (6)$$

$$F_V = m\|\vec{a}_V\| + F_D \sin(\phi) + F_{BV} + mg \cos(\theta) + F_A \quad (7)$$

$$CRR = \frac{F_{RR}}{F_V} \quad (8)$$

Où \vec{a}_L et \vec{a}_V dans l'équation 5 sont les deux vecteurs d'accélération orthogonaux du centre de masse de la suspension définis dans le référentiel longitudinal et vertical illustré à la Figure 6. La démonstration complète des équations ci-dessus se retrouve dans l'article de Levesque, Bégin-Drolet, et al. (2023b). La variable CRR de l'équation 8 est le coefficient de résistance au roulement et il s'agit de la valeur dont on cherche à mesurer et à déterminer si celle-ci varie en fonction du type de chaussée.

⁵ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2024). Rolling Resistance Evaluation of Pavements Using Embedded Transducers on a Semi-Trailer Suspension. *Sensors*, 24(23), 7556. <https://doi.org/10.3390/s24237556>

3.2.2 Implémentation du système d'instrumentation

L'équipe de recherche a développé l'entièreté du système d'instrumentation. Cela inclut notamment la conception et la fabrication d'un nouveau type de cellule de charge (*i.e.* capteur de force) pour l'emplacement 1 de la Figure 6. Aucune cellule de charge sur le marché ne pouvait convenir aux besoins du système d'instrumentation, et ce, pour les raisons suivantes :

- Installation sur la suspension sans requérir de modifications permanentes sur cette dernière.
- Mesurer des forces longitudinales jusqu'à ± 2 kN et résister mécaniquement à des forces de freinage jusqu'à + 20 kN.
- Annuler ou minimiser grandement l'interférence mécanique entre les signaux de mesure longitudinale et verticale dont la force est d'un ordre de grandeur différent.

Le dernier point mentionné est primordial puisque des chercheurs au Danemark ont déjà tenté de mesurer la force de RR sur un essieu de semi-remorque, et ce, sans succès (Nielsen, 2020). Il est d'avis de l'équipe de recherche que cet échec fut causé par le manque de sensibilité de leurs instruments dans la direction longitudinale. Cela est particulièrement problématique, car la cellule de charge doit résister à des forces de freinage (*i.e.* 20 kN) et la sensibilité de cette dernière est inversement proportionnelle à sa résistance.

Dans ce contexte, l'équipe de recherche a développé un nouveau concept de cellule de charge avec une butée d'arrêt intégrée. Lorsque la valeur seuil de force longitudinale est atteinte (*i.e.* ± 2 kN), la cellule de charge devient en contact directe avec les pièces environnantes pour dévier les contraintes excédentaires et ainsi préserver l'intégrité mécanique de la cellule de charge. Ce concept, incluant l'enjeu de l'interférence mécanique, a été testé en laboratoire sur une machine de traction électrique. L'effet de la butée d'arrêt et la sensibilité élevée de la cellule de charge à basses forces (*i.e.* ± 2 kN) peuvent être visualisés à la Figure 7.

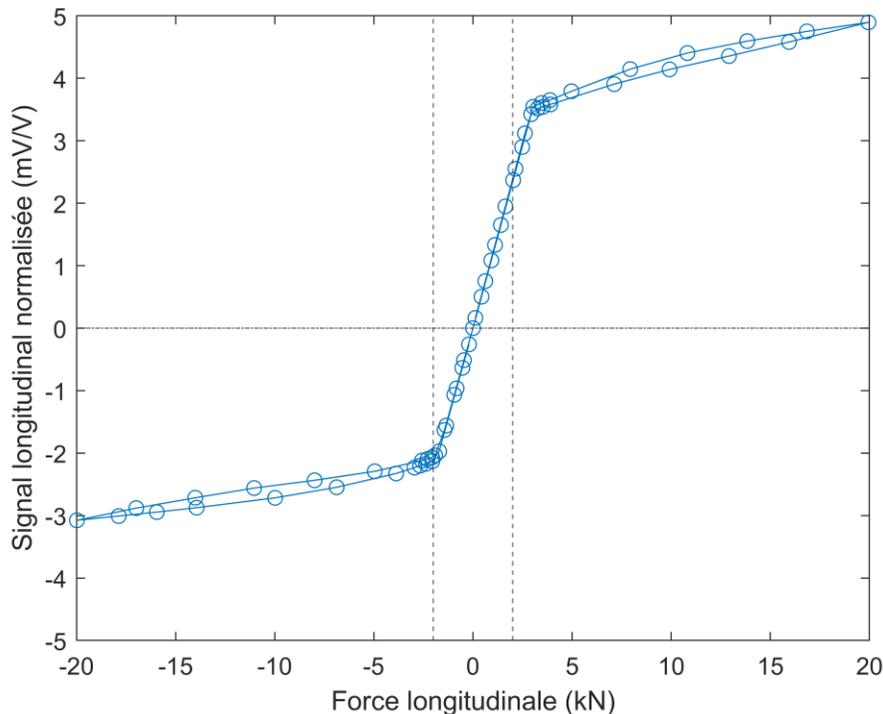


Figure 7 Test de freinage sur la cellule de charge; zone de mesure à environ ± 2 kN.⁶

On peut observer à la Figure 7 que le signal de mesure (axe des y) varie beaucoup avec la variation de la force longitudinale (axe des x), ce qui indique une sensibilité élevée de l'instrument. Par opposition, le signal de mesure varie très peu avec la variation de force longitudinale à l'extérieur de l'intervalle de mesure (*i.e.* ± 2 kN), ce qui démontre l'efficacité de la butée d'arrêt. Le test derrière la Figure 7 a permis de valider le fait que la cellule de charge peut être utilisée sécuritairement dans de véritables conditions autoroutières.

L'équipe de recherche a également conçu l'ensemble des pièces nécessaires à l'installation de la cellule de charge sur la suspension de semi-remorque. La vaste majorité de la fabrication a eu lieu à l'atelier du département de génie mécanique de l'Université Laval. Il en résulte un assemblage boulonné qui a été soudé à l'emplacement 1 indiqué à la Figure 7.

La cellule de charge et son assemblage sont présentés à la Figure 8

⁶ Figure extraite, traduite et adaptée de : Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2024). *Rolling Resistance Evaluation of Pavements Using Embedded Transducers on a Semi-Trailer Suspension*. *Sensors*, 24(23), 7556. <https://doi.org/10.3390/s24237556>

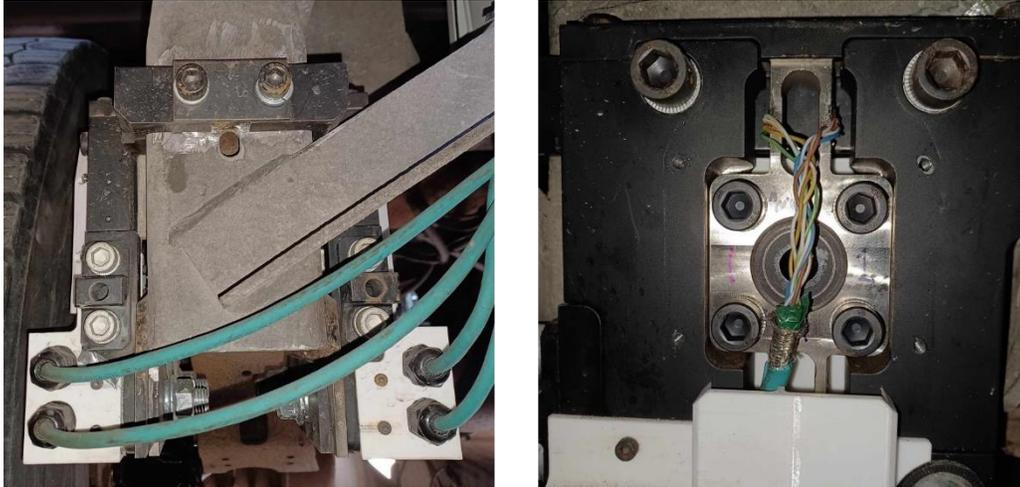


Figure 8 Cellule de charge et son assemblage à l'emplacement 1 de la Figure 7 pour mesurer les forces dans la direction longitudinale et verticale.

Pour mesurer le déplacement de l'amortisseur (emplacement 2 de la Figure 5), un potentiomètre linéaire a été fixé sur celui-ci. Pour mesurer la force de l'amortisseur (emplacement 3 de la Figure 5) une goupille de charge dimensionnée sur mesure pour cette application a été sélectionnée. Finalement le poids supporté par le ballon de suspension (emplacement 4 de la Figure 5) a été mesuré avec une cellule de charge de type « pancake ». L'ensemble de ces instruments, ainsi que les différentes pièces conçues par l'équipe de recherche pour assurer leur fonctionnement, sont présentés à la Figure 9.



Figure 9 Potentiomètre linéaire pour mesurer le mouvement de l'amortisseur (emplacement 2 de la Figure 5); Goupille de charge pour mesurer la force de l'amortisseur (emplacement 3 de la Figure 5); Cellule de charge pour mesure le poids du ballon de suspension (emplacement 4 de la Figure 5).

La température et la pression des pneus (emplacement 5 de la Figure 5) ont été mesurées à l'aide d'un capteur d'émissivité sans fil installé sur les jantes des roues. Les accélérations et vitesses angulaires du châssis de la semi-remorque (emplacement 6 de la Figure 5) ont été mesurées avec un MEMS (*micro-electromechanical systems*), qui est une puce informatique faisant partie du système d'acquisition de données. Ce dernier a été entièrement développé à l'Université Laval et contient un module GPS. Ce dernier aspect est primordial pour géoréférencer les données expérimentales et ainsi utiliser la base de données du MTMD pour analyser l'effet du type de chaussée dans les mesures.

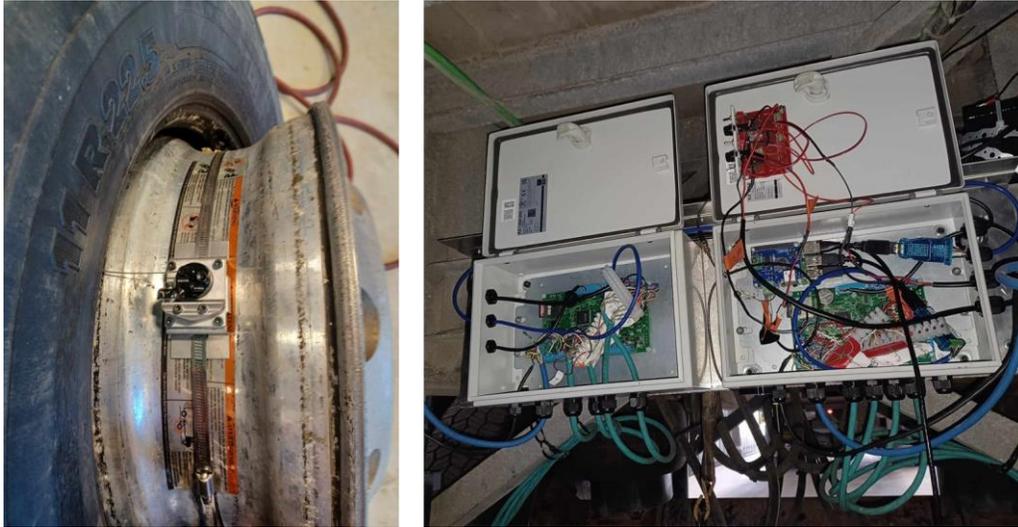


Figure 10 Image de droite - Capteur de température et de pression des pneus (emplacement 5 de la Figure 5); Image de gauche – MEMS pour la mesure des accélérations et vitesses angulaires du châssis de la semi-remorque (emplacement 6 de la Figure 5) et système d'acquisition de données développé à l'Université Laval.

3.2.3 Campagne expérimentale

Pour mener à bien les mesures expérimentales, l'équipe de recherche a établi un partenariat avec le Centre de formation en transports de Charlesbourg (CFTC). Le CFTC possède une flotte de véhicules lourds et il s'agit d'une de leur semi-remorque qui est utilisée pour mener à bien la phase expérimentale du projet de recherche.

Le système d'instrumentation a été utilisé dans le cadre d'une première campagne expérimentale qui a eu lieu le 4 octobre 2023. Durant cette journée, la température de l'air était entre 20 et 25°C et les conditions étaient généralement ensoleillées. Le groupe de trois essieux de la semi-remorque était chargé à 18,81 tonnes. Dans le cadre de ce rapport, les résultats expérimentaux recueillis lors de cette journée sont présentés.

Le trajet choisi pour l'analyse des données de RR est un segment de l'autoroute 20 entre le pont Pierre-Laporte à Québec et Sainte-Eulalie (Aller/Retour). Le trajet parcouru est illustré à la Figure 11.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

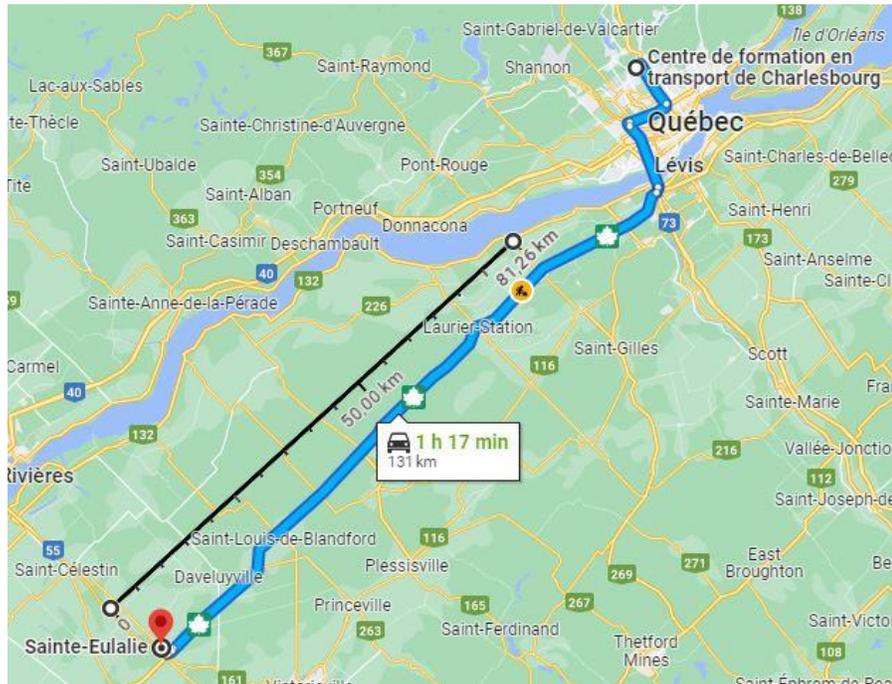


Figure 11 Trajet parcouru (Aller/Retour) avec le système d'instrumentation dans le cadre de la campagne expérimentale ayant eu lieu le 4 octobre 2023.

Une fois les données expérimentales recueillies, un processus d'analyse de données permet notamment d'isoler les segments du trajet où le véhicule lourd roulait à vitesse constante sur l'autoroute. En effet, l'utilisation du régulateur de vitesse permet de minimiser les perturbations ponctuelles créées par une accélération non nulle du véhicule. Dans le cas des véhicules du CFTC, la vitesse de croisière est réglée à 95 km/h.

Par la suite, la base de données géoréférencées du MTMD a été mise à profit pour segmenter le trajet par type de chaussée. Cela a permis de faire des analyses comparatives des chaussées à l'égard de la RR.

4 ANALYSE DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus dans le cadre du projet de recherche sont présentés en deux phases, soit les résultats théoriques et les résultats expérimentaux. Les résultats expérimentaux servent notamment à valider les différents modèles intégrés au MapEUR qui ont été présentés à la section 3.1.2 et qui sont à l'origine des résultats théoriques obtenus. De plus, les résultats expérimentaux permettent de considérer tous les aspects qui influencent la RR.

4.1 Analyse des résultats – phase théorique

Pour obtenir une convergence sur la consommation de carburant moyenne dans le contexte de l'étude de cas présentée à la section 3.1.4, un total de 40312 simulations de consommation de carburant par scénario de chaussée fut nécessaire. Cette section vise à faire l'analyse de ces résultats, ce qui correspond aux étapes d'agrégation des données et validation indiquées en vert à la Figure 4.

4.1.1 Analyse des résultats - Scénario de chaussée réelle

Pour analyser l'évolution de la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds tout au long de l'année, l'ensemble des résultats simulés de consommation de carburant pour les caractéristiques réelles de la chaussée (voir scénario 1, section 3.1.4) a été séparé par mois. Cela a permis une évaluation rapide de l'effet des conditions météorologiques pour l'étude de cas de l'autoroute 20 de Montréal vers Québec. La consommation de carburant de chaque véhicule lourd simulé et le diagramme en boîte de la distribution statistique mensuelle sont présentés à la Figure 12.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

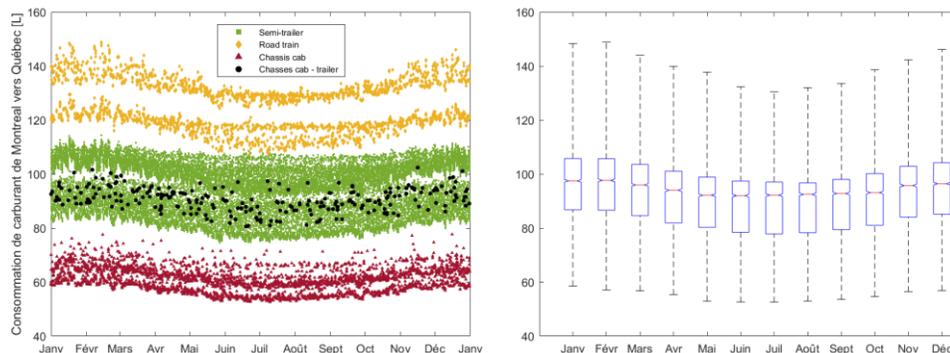


Figure 12 Graphique de gauche - Consommation de carburant des 40 312 véhicules lourds simulés voyageant de Montréal vers Québec avec les caractéristiques réelles de la chaussée (scénario 1) pendant un an; Graphique de droite - Diagramme en boîte des quatre quartiles de la distribution statistique de la consommation de carburant pour chaque mois.⁷

La consommation moyenne de carburant simulée d'un véhicule lourd voyageant de Montréal vers Québec était de 92,0 litres, ce qui correspond à une consommation moyenne de 36,2 litres/100 km. Cette valeur est très proche de la consommation moyenne rapportée par l'industrie du camionnage au Canada, qui varie de 33,2 litres/100 km à 39,5 litres/100 km (*Fuel Efficiency Benchmarking in Canada's Trucking Industry*, 2019).

Il est visible à la Figure 12 que la consommation de carburant des véhicules lourds est plus élevée dans des conditions hivernales qu'estivales. Cela peut notamment s'expliquer par l'effet de l'air froid de l'hiver québécois, sur la consommation de carburant. En effet, l'air froid a pour effet de diminuer la température de fonctionnement des pneus, ce qui implique une augmentation de leur RR (Ydrefors, 2022 ; Ydrefors et al., 2021). Dans le même ordre d'idées, une température d'air plus froide implique une densité d'air plus élevée, ce qui augmente la résistance aérodynamique. Cet aspect est automatiquement pris en compte avec le logiciel MapEUR.

En ce qui concerne l'effet de la chaussée, l'équation (2) montre que la SRR augmente de manière exponentielle avec la température de la chaussée (Balzarini, Zaabar, et al., 2019; Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013), ce qui signifie qu'il est attendu que la SRR soit plus importante en été (e.g. juillet) et moins importante en hiver (e.g. janvier). D'autre part, les conditions hivernales

⁷ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>.
Licence : CC BY-NC-ND 4.0 DEED (Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International).

peuvent augmenter l'IRI de manière saisonnière (Fradette et al., 2005), ce qui augmente la RR totale selon l'équation (3).

Étant donné la multitude de facteurs pouvant influencer la consommation de carburant des véhicules lourds, ainsi que la possibilité que ceux-ci présentent des variations saisonnières ayant des effets opposés, la décomposition de chaque facteur pertinent (e.g. RR, résistance aérodynamique, etc.) est nécessaire pour déterminer leurs contributions relatives à la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds. Cela est possible en additionnant la consommation de carburant de tous les véhicules lourds simulés et en comparant l'importance relative de chaque facteur. En effet, puisque la simulation Monte Carlo permet d'obtenir une convergence sur la consommation de carburant moyenne, cela signifie que le trafic de véhicules lourds simulé est statistiquement représentatif du trafic réel.

Les résultats de consommation de carburant peuvent être exprimés en consommation totale journalière moyenne (CTJM) pour chaque mois de l'année simulé. Cette métrique représente la consommation totale de carburant consommé en moyenne par jour par le trafic de véhicules lourds sur le segment routier sélectionné de Montréal vers Québec. Le calcul de la CTJM a été pondéré en fonction du débit journalier moyen annuel (DJMA) de véhicules lourds fourni par la base de données du MTMD.

Plusieurs résultats présentés dans ce rapport sont sous la forme de densité de probabilités. Il s'agit d'exprimer une distribution statistique avec une amplitude normalisée. C'est-à-dire que l'intégrale de la densité de probabilité donne une valeur unitaire. Cela permet de connaître la probabilité qu'un événement survienne dans une certaine plage de valeurs.

L'importance relative de chaque facteur sur la CTJM pour toute l'année, janvier et juillet est présentée dans la colonne de gauche de la Figure 13. La fonction de densité de probabilité de la température de la chaussée pour la période spécifiée est présentée dans la colonne droite de la Figure 13. Superposé à cette dernière, se retrouve le ratio de la SRR aux conditions normalisées de l'équation 2, divisée par la RR totale. Cette dernière valeur est présentée en fonction de la température de la chaussée. Cette représentation visuelle a été sélectionnée, car il est de l'avis de l'équipe de recherche que la température de la chaussée est le principal facteur météorologique à considérer pour comparer les types de chaussée selon leur SRR respective.

Il est possible de voir dans les diagrammes circulaires de la Figure 13 que les forces de résistance aérodynamique et de RR des pneus représentaient environ 68,3 % et 28,3 % de la consommation de carburant des véhicules lourds pendant toute l'année de l'étude de cas simulée. Par opposition, les consommations de carburant associées au freinage et à l'énergie potentielle (i.e. différence d'élévation entre l'arrivée et le départ) ne représentent que 0,4 % et 1,7 % respectivement.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

La SRR pendant toute l'année de l'étude de cas simulée ne représentait que 0,3% de la consommation totale de carburant du trafic de véhicules lourds. Cette valeur était particulièrement faible en conditions hivernales (*e.g.* janvier) avec seulement 0,1 %. Même durant le mois le plus chaud de l'année (*i.e.* juillet), la SRR ne représentait que 0,8 % de la consommation de carburant totale. L'origine de ce résultat peut être visualisée dans la colonne droite de la Figure 13 et celui-ci est abordé plus en détail à la 5.1.

Enfin, il est possible de voir dans les diagrammes circulaires de la Figure 13 que l'importance relative de l'IRI sur la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds était de 1,9 % en janvier, de 0,9 % en juillet et de 1,1 % pendant toute l'année.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSEE SUR LA RESISTANCE AU ROULEMENT DES VEHICULES AU QUEBEC

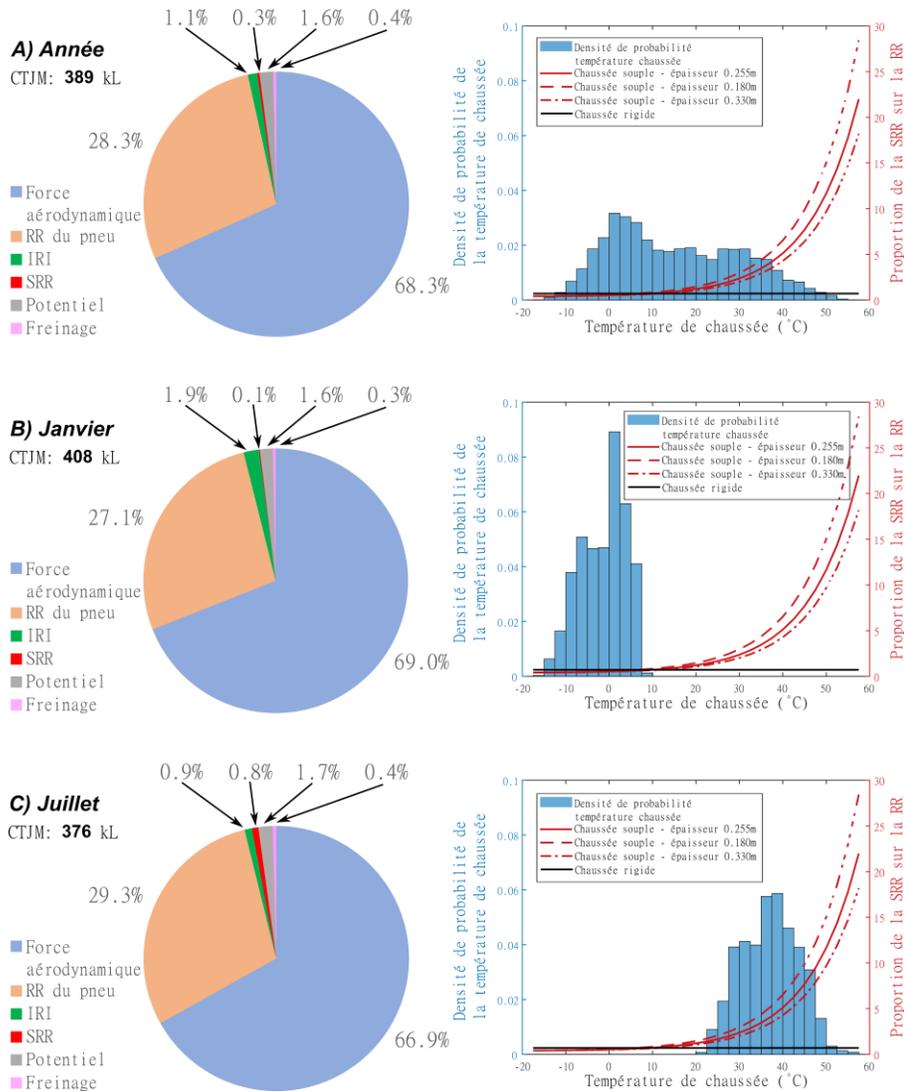


Figure 13 Colonne de gauche - Contribution moyenne de chaque facteur sur la consommation totale journalière moyenne (CTJM) du trafic des véhicules lourds pour l'étude de cas réalisée pendant : A) Toute l'année, B) Janvier, C) Juillet; Colonne de droite - Fonction de densité de probabilité de la température de la chaussée pour la période spécifiée avec le ratio de la SRR aux conditions de référence sur la RR totale.⁸

⁸ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement-effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>. Licence : CC BY-NC-ND 4.0 DEED (Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International).

4.1.2 Analyse des résultats - Scénarios théoriques de chaussée

Pour analyser explicitement l'effet du type de chaussée sur la SRR du trafic de véhicules lourds, différents scénarios théoriques de chaussée ont été élaborés. Les résultats de CTJM présentés dans cette section proviennent des différents modèles qui considèrent l'effet de la chaussée (voir section 3.1.3) et qui ont été intégrés à une approche statistique (voir section 3.1.4). Ces scénarios théoriques permettent d'évaluer les avantages potentiels de choisir un type de chaussée en particulier pour optimiser la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds dans le cadre de l'étude de cas réalisée. Les résultats globaux pour la CTJM par mois à travers tous les scénarios théoriques de chaussée sont présentés à la Figure 14.

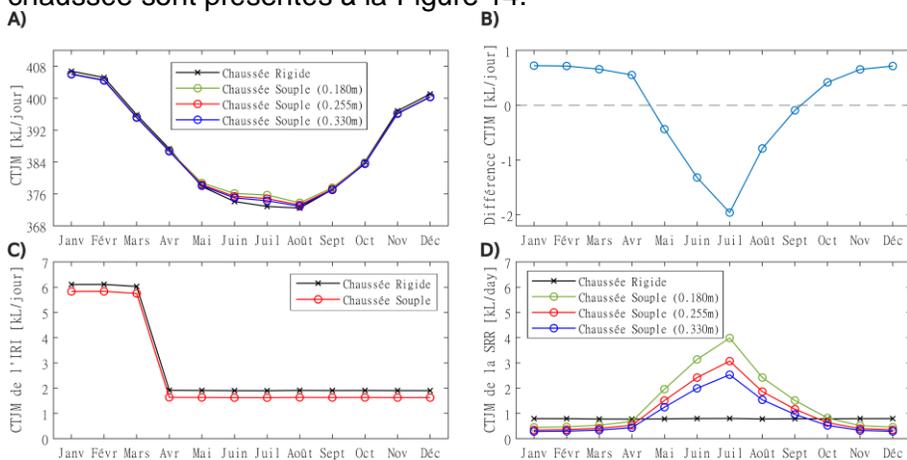


Figure 14 Comparaison de la consommation totale journalière moyenne (CTJM) selon le mois de l'année pour le trafic de véhicules lourds de l'étude de cas pour différents scénarios de chaussée théoriques; A) CTJM par mois pour les quatre scénarios de chaussée; B) Différence de CTJM par mois (Rigide – Souple d'épaisseur 0,255 m); C) CTJM par mois lié à l'IRI pour les deux types de chaussée (Rigide et Souple); D) CTJM par mois lié à la SRR pour différents scénarios de chaussée théoriques.⁹

Figure 14 indique que la CTJM de l'ensemble du trafic de véhicules lourds varie de 407 kL/jour en hiver à 372 kL/jour en été. L'image A de la Figure 14 montre que la CTJM des chaussées rigides (ligne noire) est légèrement inférieure à celles des chaussées souples pendant les conditions estivales (de juin à août), avec une différence qui est plus prononcée pour une chaussée souple mince (e.g. 0,180 m). Sinon, tous les scénarios semblent avoir essentiellement le même CTJM. L'image B de la Figure 14 montre la différence de CTJM entre les

⁹ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement-effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>. Licence : CC BY-NC-ND 4.0 DEED (Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International).

chaussées souples (épaisseur de 0,255 m) et rigides pour chaque mois. Le pic minimal en juillet signifie que les chaussées rigides ont consommé environ 2000 litres de carburant de moins par jour comparativement aux chaussées souples (épaisseur de 0,255 m). Cependant, cette différence non négligeable, mais faible ne dure qu'un mois et la différence de CTJM est même en faveur des chaussées souples en conditions hivernales. L'image C de la Figure 14, permet d'observer l'effet de l'augmentation saisonnière de l'IRI sur la consommation de carburant.

Finalement, l'image D de la Figure 14 indique que la SRR des chaussées souples calculée avec l'équation 2 augmente drastiquement dans des conditions estivales, mais que cet état ne s'étend pas longtemps durant l'année. Le Tableau 3 résume la CTJM des quatre scénarios théoriques de chaussée. On peut constater que la différence relative simulée entre les scénarios théoriques de chaussée est négligeable.

Tableau 3: Consommation totale journalière moyenne (CTJM) des quatre scénarios théoriques de chaussée pour toute l'année simulée et une comparaison relative avec le scénario de chaussée rigide.

Scénario de chaussée	CTJM [kL/jour]	Différence relative avec le scénario de chaussée rigide
Rigide	387,62	N/A
Souple (0,180 m)	387,95	+ 0,085 %
Souple (0,255 m)	387,63	+ 0,003 %
Souple (0,330 m)	387,45	- 0,044 %

4.2 Analyse des résultats – phase expérimentale

Les résultats expérimentaux de force de RR présentée dans ce rapport correspondent à la valeur pour un demi-essieu. À noter que le véhicule lourd en question possède six essieux, donc douze demi-essieux.

Comme expliqué à la section 3.2.1, la pente de la route n'est jamais parfaitement nulle, ce qui affecte les forces mesurées. Toutefois, il est possible de moyenner les forces mesurées pour obtenir la bonne valeur de force de RR, puisque la pente de la route tend vers zéro lorsque le segment considéré est suffisamment long.

4.2.1 Analyse des résultats – prétraitement des données expérimentales

La première étape de l'analyse de données consiste à isoler les segments de route où le véhicule circulait à vitesse constante. Dans le cadre de la campagne expérimentale, cela correspond à l'utilisation de régulateur de vitesse à 95 km/h, cette dernière valeur étant la vitesse de croisière des véhicules lourds du CFTC. Pour arriver à cette fin, l'équipe de recherche utilise un algorithme sur les données du GPS du système d'acquisition de données. Les données

temporelles de la vitesse du véhicule, ainsi que les zones de vitesse constante sont illustrées à la Figure 15.

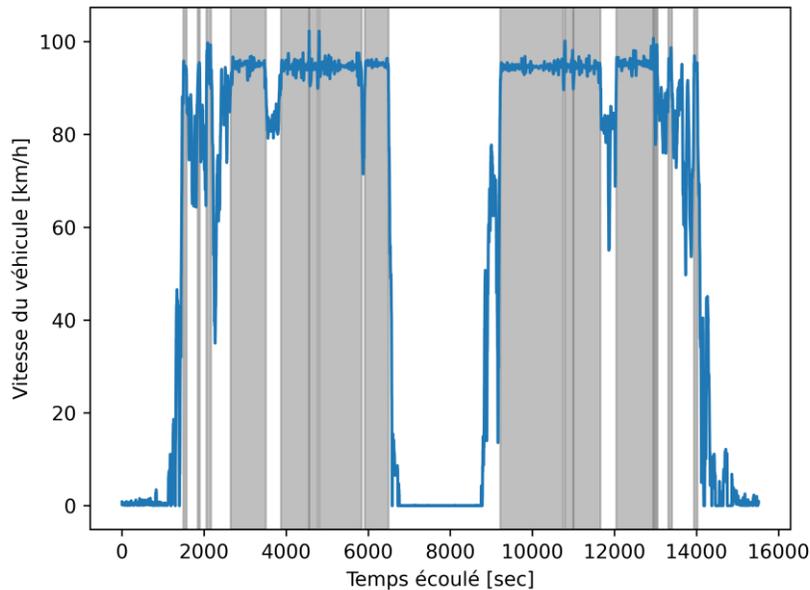


Figure 15 Vitesse du véhicule selon le GPS du système d'acquisition de données durant les mesures du 4 octobre 2023; zones à vitesse constante illustrées en gris.

Une vitesse de véhicule non constante a un effet direct sur les mesures de force longitudinale. Pour cette raison, les analyses comparatives des chaussées à l'égard de la RR doivent se faire uniquement dans les zones grises indiquées à la Figure 15.

Un autre aspect important en lien avec l'analyse comparative des chaussées concerne la température de fonctionnement des pneus. Puisque ce paramètre influence directement la RR (Ydrefors et al., 2021), il est préférable que les conditions d'opérations des pneus soient en régime permanent lors des analyses comparatives des chaussées. Il s'agit d'une des raisons pour laquelle les données expérimentales prises après la traversée du pont Pierre-Laporte sont davantage fiables pour mener des analyses comparatives des types de chaussée.

La température de fonctionnement des pneus peut être estimée adéquatement à l'aide d'un modèle d'ordre 1 (Cider et al., 2023; Hyttinen et al., 2023a; T. Sandberg et al., 2004). Cela signifie essentiellement qu'il est attendu que la température de fonctionnement des pneus augmente très rapidement après le départ du véhicule et celle-ci converge progressivement vers une valeur en

régime permanent. L'évolution de la température de fonctionnement d'un pneu lors des mesures du 4 octobre 2023, ainsi que l'identification des événements de conduite sont illustrées à la Figure 16.

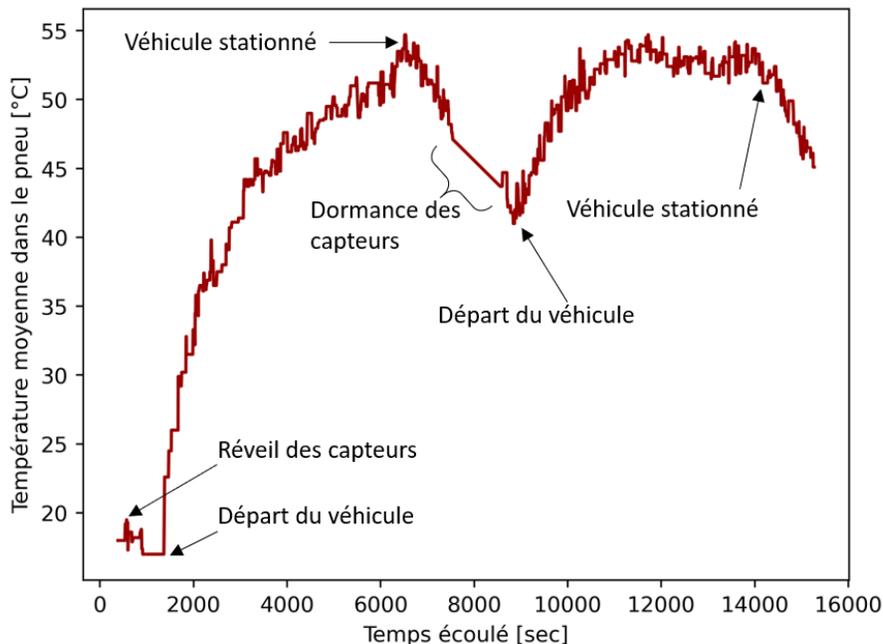


Figure 16 Évolution de la température moyenne du pneu extérieur droit de la suspension instrumentée durant les mesures du 4 octobre 2023.

La Figure 16 présente le comportement typique d'un système thermique d'ordre 1. On peut également voir que la température de fonctionnement du pneu n'a pas tout à fait atteint la convergence lors de l'aller (*i.e.* avant ≈ 8000 sec). Toutefois, la convergence est atteinte lors du retour (*i.e.* après ≈ 8000 sec). Néanmoins, la température de fonctionnement du pneu semble suffisamment constante pour faire des analyses comparatives de chaussée. Cette analyse est présentée plus en détail à la section 5.2.1.

La prochaine étape de prétraitement des données consiste à séparer les segments identifiés en gris à la Figure 15 en sous-segments constitués du même type de chaussée. Pour ce faire, la base de données géoréférencées du MTMD a été mise à profit. Cela est rendu possible par le fait que le système d'acquisition de données possède un GPS.

Finalement, le GPS a aussi été utilisé pour donner une estimation simple et rapide de la pente de la route. Cela permet de s'assurer que les segments de routes analysés sont suffisamment longs pour avoir une pente moyenne très

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

proche de zéro. Il s'agit d'une condition permettant de s'assurer que la moyenne de la force longitudinale mesurée est valide.

Le prétraitement de données a permis d'identifier 16 segments de routes à analyser d'une longueur totale de 174,4km. Ceux-ci sont catégorisés en type de chaussée au Tableau 4 avec leurs valeurs de longueur, ainsi que leur RTSS et leurs chaînages respectifs.

Tableau 4: Résumé des segments de route analysés provenant des mesures expérimentales du 4 octobre 2023

Numéro segment	Type de chaussée	Longueur [km]	RTSS - début	Chaînage – début [km]	RTSS - fin	Chaînage - fin [km]
1	Souple	2,982	00040-08-037-000G	1,000	00040-08-020-000G	2,127
2	Souple	22,694	00020-06-020-000G	6,090	00020-05-192-000G	3,078
3	Souple	3,906	00020-05-161-000G	2,285	00020-05-150-000G	0,000
4	Mixte	4,592	00020-05-140-000G	9,042	00020-05-140-000G	4,420
5	Rigide	9,394	00020-05-140-000G	4,420	00020-05-130-000G	4,090
6	Rigide	4,064	00020-05-130-000G	4,090	00020-05-130-000G	0,000
7	Mixte	17,628	00020-05-110-000G	5,519	00020-05-080-000G	0,000
8	Souple	7,019	00020-05-074-000G	6,338	00020-05-071-000G	2,025
9	Souple	15,253	00020-05-071-000G	0,369	00020-05-041-000G	1,864
10	Mixte	19,950	00020-05-041-000D	5,837	00020-05-074-000D	6,310
11	Souple	20,531	00020-05-080-000D	0,000	00020-05-120-000D	2,858
12	Souple	5,225	00020-05-120-000D	3,845	00020-05-130-000D	4,145
13	Souple	17,443	00020-05-130-000D	8,343	00020-05-161-000D	2,018
14	Mixte	3,536	00020-05-192-000D	2,677	00020-05-192-000D	6,275
15	Rigide	12,878	00020-05-192-000D	6,275	00020-06-010-000D	6,820
16	Souple	7,283	00020-06-010-000D	6,820	00020-06-051-000D	0,152

Il est important de comprendre d'emblée que les segments présentés au Tableau 4 n'ont pas tous la même longueur. Cela signifie qu'il est essentiel de pondérer l'importance de chaque segment en fonction de leur longueur respective lors de l'analyse des résultats.

Comme mentionné précédemment, il est idéal d'avoir une pente de la route faible et une température de pneu constante pour mener des analyses comparatives de chaussée. Le Tableau 5 présente ces deux aspects pour les 16 segments de routes à analyser.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

Tableau 5: Pente moyenne de la route et température des pneus provenant des mesures expérimentales du 4 octobre 2023 pour tous les segments de routes analysés.

Numéro segment	Type de chaussée	Longueur [km]	Pente moyenne de la route [°]	Température moyenne des pneus [°C]	Variation de température des pneus [°C / h] ¹⁰
1	Souple	2,982	-0,42	31,3	47,2
2	Souple	22,694	0,14	40,6	31,3
3	Souple	3,906	0,03	45,6	2,88
4	Mixte	4,592	-0,08	46,2	24,8
5	Rigide	9,394	-0,02	46,7	7,2
6	Rigide	4,064	0,27	47,2	28,9
7	Mixte	17,628	-0,12	48,9	10,0
8	Souple	7,019	-0,03	50,1	-1,1
9	Souple	15,253	0,02	50,8	2,0
10	Mixte	19,950	0,02	45,5	30,0
11	Souple	20,531	0,08	50,4	11,7
12	Souple	5,225	-0,13	52,5	13,1
13	Souple	17,443	-0,01	53,0	6,2
14	Mixte	3,536	-0,31	53,3	-16,4
15	Rigide	12,878	-0,05	52,7	-4,6
16	Souple	7,283	-0,19	52,7	-1,7

On observe dans le Tableau 5 que la pente moyenne de la route est toujours très faible ($<0.5^\circ$), et ce, pour tous les segments de routes. De plus, la température moyenne des pneus est près de sa température en régime permanent, à l'exception du segment 1 qui se trouvait avant la traversée du pont Pierre-Laporte.

¹⁰ Cette colonne représente la pente d'une droite de régression linéaire de la température des pneus pour le segment de route considéré. Si la température des pneus était parfaitement constante, la variation [°C/h] serait nulle. Il est important de comprendre que ces valeurs sont à titre indicatifs seulement. En effet, le système thermique du pneu est un système d'ordre 1 qui se stabilise progressivement, ce qui signifie que l'évolution de la température n'est pas linéaire. De plus, des facteurs autres que la RR (e.g. température ambiante, ensoleillement, albédo de la chaussée, etc.) peuvent influencer la température des pneus.

4.2.2 Analyse des résultats – résistance au roulement expérimentale

Les résultats de la section 4.2.2 sont présentés en faisant la distinction entre les trois types de chaussée présente dans la base de données du MTMD, soit : Souple, Rigide et Mixte. Ceux-ci correspondent respectivement aux couleurs bleu, orange et verte dans les différents graphiques ci-dessous.

La Figure 17 présente un exemple de force de RR mesurée sur un segment de chaussée souple, ainsi que l'altitude et la température de pneu le long du segment en question.

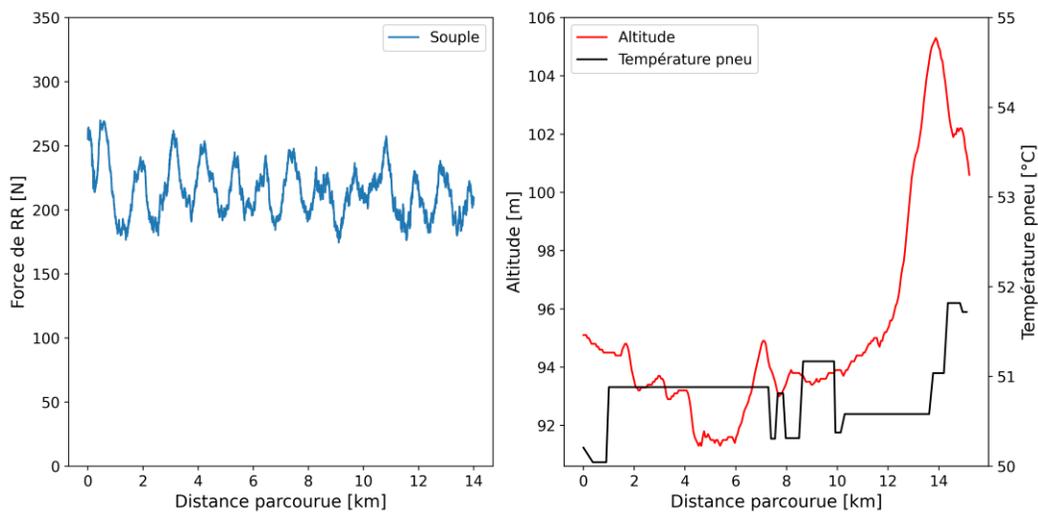


Figure 17 Graphique de gauche - Exemple de force de résistance au roulement mesurée sur le segment #9 (i.e. chaussée souple); Graphique de droite – Altitude et température du pneu le long du segment analysé.

Les variations observables à l'image de gauche de la Figure 17 sont parfaitement explicables par la pente faible, mais non nulle du segment, ainsi que par l'incapacité du régulateur de vitesse de conserver une vitesse de véhicule (i.e. 95 km/h) parfaitement constante. Ceci dit, la moyenne de RR mesurée est très stable, et ce, malgré l'augmentation de l'altitude vers la fin du segment. Il est important de garder à l'esprit que les axes des x dans la Figure 17 sont en kilomètre tandis que l'altitude est présentée en mètre. Cela permet de mieux visualiser la pente de la route, mais exagère grandement ses proportions. De plus, les variations de température des pneus sont très basses, soit du même ordre de grandeur que la résolution de l'instrument (i.e. ≈ 0.1 °C). Ces éléments indiquent qu'il est valide de moyenniser la force de RR mesurées sur une longueur de segment suffisamment importante pour obtenir une moyenne de RR qui est exacte.

Une meilleure approche pour exprimer les résultats expérimentaux est de calculer le coefficient de résistance au roulement. Il s'agit de diviser la force moyenne mesurée de RR par le chargement transporté. Dans le cas présent, le groupe de trois essieux munis d'une suspension pneumatique a été pesé à 18,81 tonnes, ce qui signifie que le poids du demi-essieu était de 3,14 tonnes. Le coefficient de RR permet de normaliser les valeurs pour que celles-ci soient indépendantes du poids de la semi-remorque instrumentée. Le coefficient de RR est exprimé en kg/ton. La valeur du coefficient de RR donne la force de RR (en kg) pour chaque tonne transportée. La RR mesurée pour les 174,4km de route analysée est présentée dans la densité de probabilité de la Figure 18.

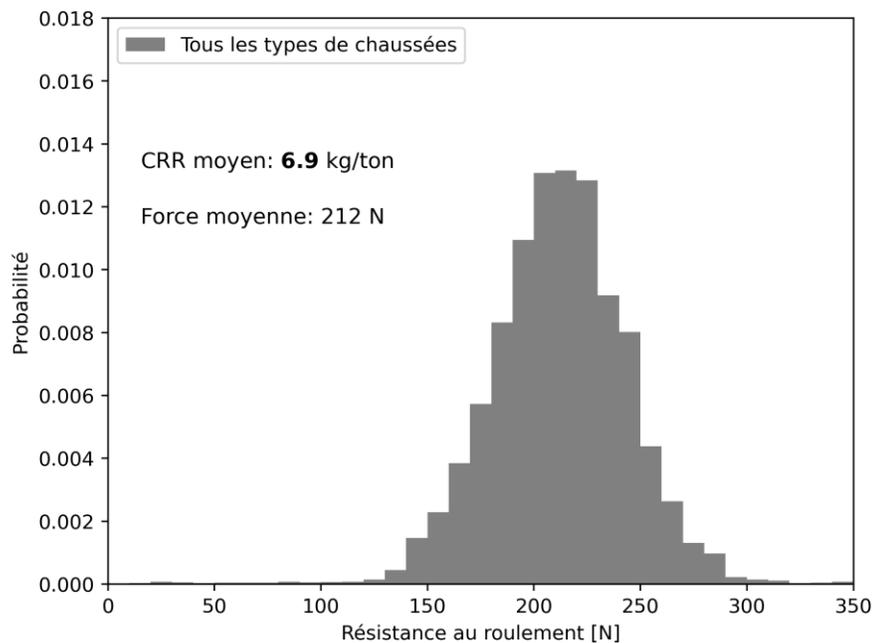


Figure 18 Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les types de chaussée.

La moyenne de 212 N indiquée à la Figure 18 correspond à la moyenne de force de RR d'un demi-essieu de 3.1 tonnes mesurée le 4 octobre 2023. Cette valeur correspond très précisément à l'ordre de grandeur attendu. En effet, les pneus installés sur le demi-essieu droit sont un Michelin XDS2 et un Continental HSR2. À la suite d'une discussion avec un ingénieur de Michelin, il a été convenu que la force de RR mesurée par le système d'instrumentation est cohérente avec la RR mesurée dans des conditions de laboratoires.

Une méthode rapide pour comparer l'influence du type de chaussée sur la force de RR mesurée consiste à séparer l'histogramme de la Figure 18 en trois

histogrammes, c'est-à-dire un histogramme par type de chaussée (*i.e.* Souple, Rigide, Mixte). Cette séparation est présentée à la Figure 19.

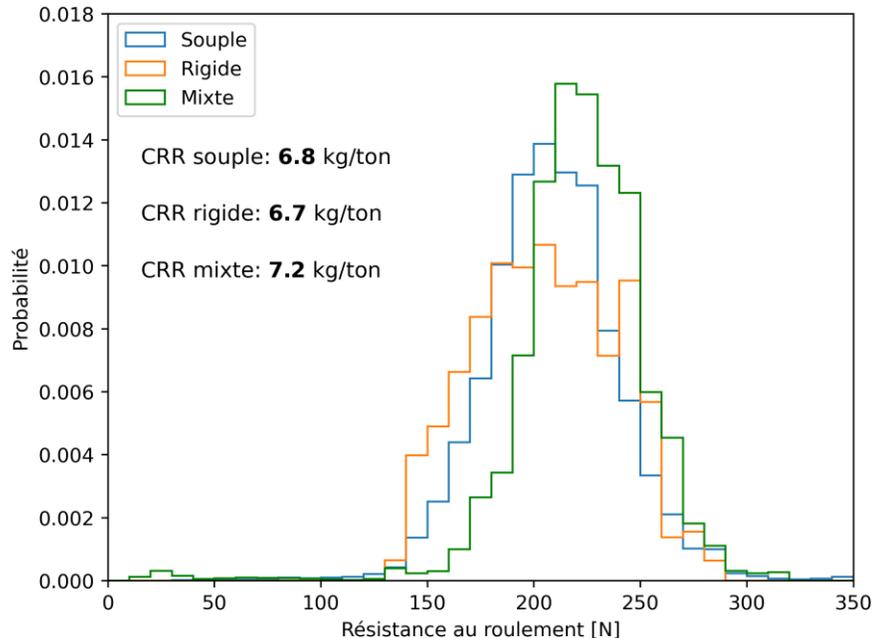


Figure 19 Force de résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour les trois types de chaussée.

Les résultats de la Figure 19 semblent indiquer à priori qu'il n'existe pas de différence statistique significative entre les chaussées souples et rigides à l'égard de la RR, et ce, car le coefficient de RR obtenue est pratiquement identique. De plus, la Figure 19 indique que le coefficient de RR des chaussées mixtes semble être statistiquement plus élevé que les chaussées « non mixtes ».

La densité de probabilité des chaussées rigides de la Figure 19 ne suit pas une loi normale puisqu'il y a un « creux » au centre de celle-ci. Cela indique qu'il existe potentiellement une différence significative entre les segments de chaussée classés dans la catégorie Rigide. Pour clarifier cette question, il faut comparer la RR de chaque segment faisant partie d'un même type de chaussée. Cette analyse est présentée à la Figure 20, à la Figure 21 et à la Figure 22. Les images de gauche sont les densités de probabilités de la Figure 19 présentées individuellement. Les images de droite sont des diagrammes à barres qui présentent le coefficient de RR mesurée pour tous les segments faisant partie d'un même type de chaussée.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

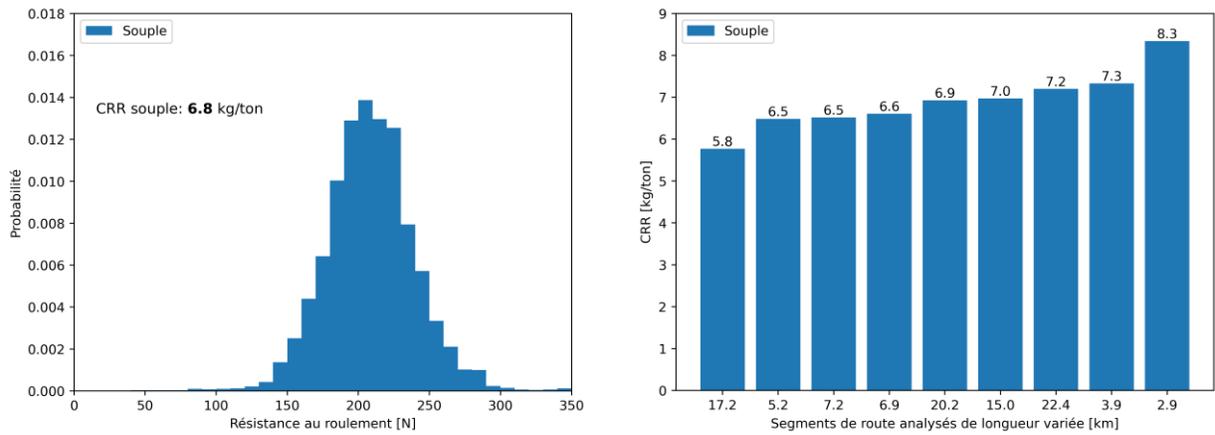


Figure 20 Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les segments de chaussée souple; Graphique de gauche – fonction de densité de probabilité; Graphique de droite – diagramme à barre de chaque segment.

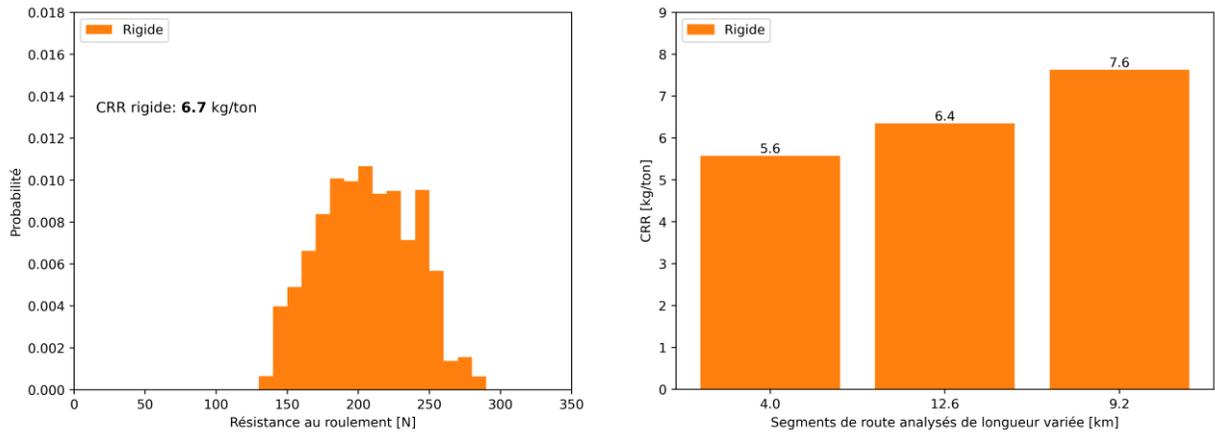


Figure 21 Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les segments de chaussée rigide; Graphique de gauche – fonction de densité de probabilité; Graphique de droite – diagramme à barre de chaque segment.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

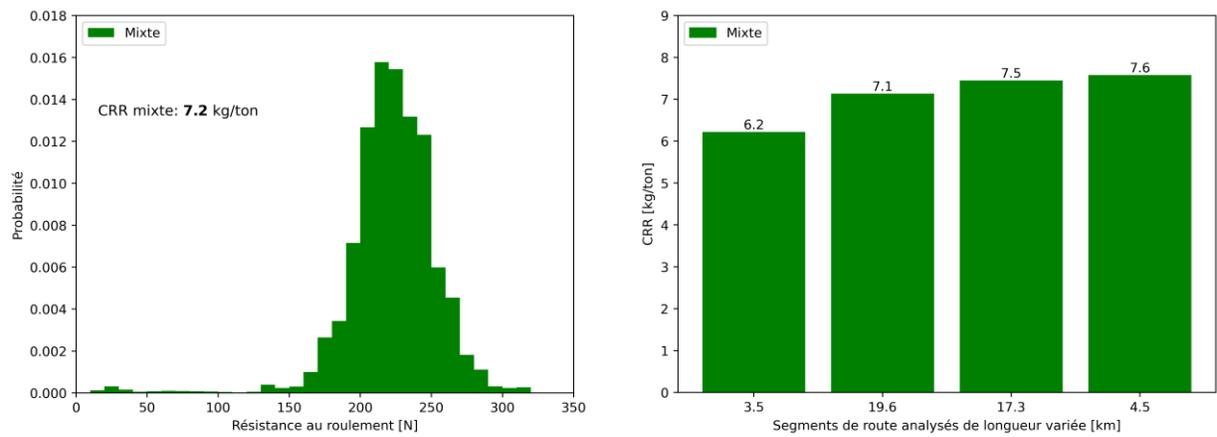


Figure 22 Résistance au roulement du demi-essieu droit mesurée le 4 octobre 2023 pour tous les segments de chaussée mixte; Graphique de gauche – fonction de densité de probabilité; Graphique de droite – diagramme à barre de chaque segment.

L'image gauche de la Figure 20 montre une distribution plutôt normale pour les chaussées souples, ce qui indique une force de RR concentrée autour d'une valeur moyenne spécifique. L'image de droite montre que la majorité des segments de chaussée souples ont un coefficient de RR similaire, c'est-à-dire entre 6,5 kg/ton et 7,3 kg/ton. Il y a toutefois l'exception notable du segment 17,2 km de long qui présente un coefficient de RR de seulement 5,8 kg/ton. Cette dernière valeur se rapproche grandement de la chaussée rigide la plus performante présentée à la Figure 21. Cela semble indiquer que certains facteurs (e.g. module d'élasticité de la fondation, macrotecture) puissent améliorer la performance d'une chaussée souple et la rendre équivalente à une chaussée rigide à l'égard de la RR et donc de la consommation de carburant.

L'image de gauche de la Figure 21 montre une distribution de densité de probabilité pour les chaussées rigides qui dévie d'une distribution normale, ce qui indique une variabilité significative dans les forces de RR au sein des segments rigides. L'image de droite de la Figure 21 indique qu'un segment de chaussée rigide possède un coefficient de RR (*i.e.* 7,6 kg/ton) significativement plus grand que les trois autres segments analysés. Cela semble indiquer que certains facteurs puissent diminuer la performance d'une chaussée rigide et la rendre moins performante qu'une chaussée souple à l'égard de la RR et donc de la consommation de carburant.

L'image de gauche de la Figure 22 montre une distribution de densité de probabilité pour les chaussées mixtes qui suit essentiellement une loi normale, ce qui suggère une faible variabilité entre les segments de chaussée mixtes. L'image de droite de la Figure 22, indique que trois segments sur quatre présentent un coefficient de RR significativement plus grand que la moyenne obtenue avec les chaussées « non mixtes ». Il y a toutefois l'exception notable du segment de chaussée mixte présentant un coefficient de RR de 6,2 kg/ton. La moindre performance des chaussées mixtes à l'égard de la RR et donc de la consommation de carburant ne serait donc pas systématique.

Ces figures mettent en lumière la complexité de l'impact de la chaussée sur la RR. Alors que la chaussée mixte semble avoir en moyenne une RR plus élevée, la variabilité au sein de chaque catégorie de chaussée suggère que d'autres facteurs non spécifiques au type de chaussée pourraient influencer la RR et donc la consommation de carburant de manière significative.

4.2.3 Analyse des résultats – expérimentale et profil d'uni

Comme expliqué à la section 3.2.1, la mesure simultanée de la force développée par l'amortisseur et de son déplacement permet de quantifier la puissance d'amortissement. Plus précisément, la puissance d'amortissement est la puissance dissipée dans l'amortisseur qui correspond au produit de sa force et de sa vitesse de déplacement. Puisque l'énergie est une quantité physique qui se conserve (Cengel et al., 2014), la puissance d'amortissement a nécessairement un effet sur la consommation de carburant. À noter que la vitesse du véhicule n'est pas la même chose que la vitesse de l'amortisseur, puisque ce dernier concept est défini uniquement par le mouvement relatif de la suspension par rapport au châssis de la semi-remorque.

Pour analyser la puissance d'amortissement, la Figure 23, la Figure 24 et la Figure 25 illustrent le signal en question pour une chaussée souple, rigide, mixte et une route secondaire respectivement. À noter qu'il s'agit du signal pour un amortisseur seulement et qu'il y a un total de douze amortisseurs sur le véhicule lourd.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

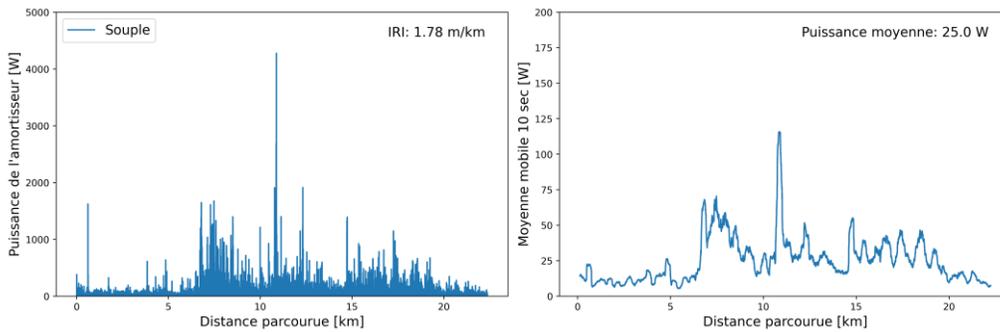


Figure 23 Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur le segment 2 du Tableau 4 ; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes.

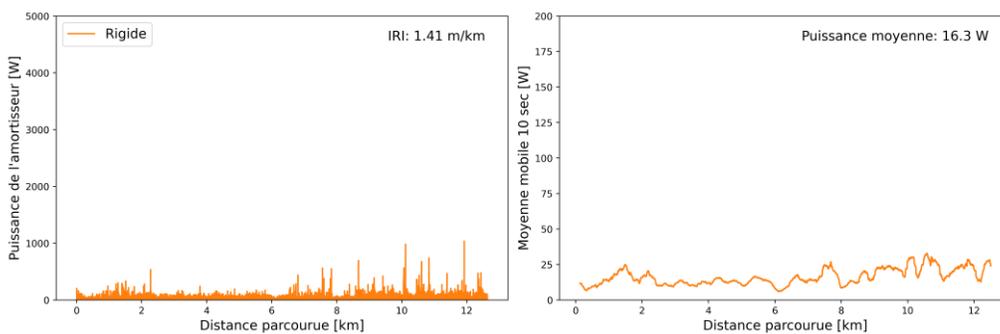


Figure 24 Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur le segment 15 du Tableau 4 ; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

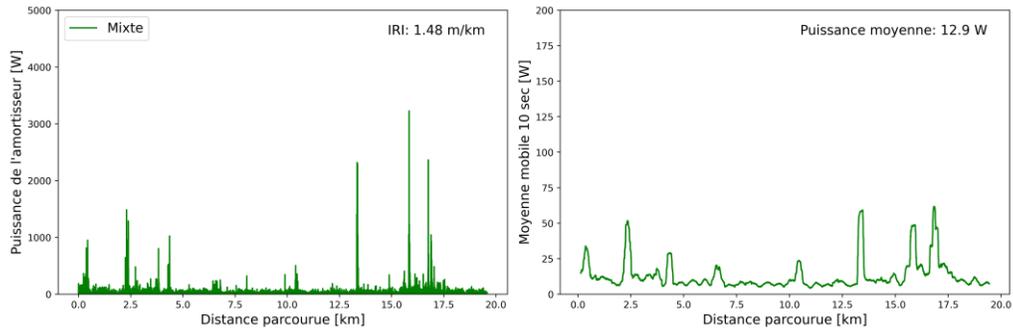


Figure 25 Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur le segment 10 du Tableau 4; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes.

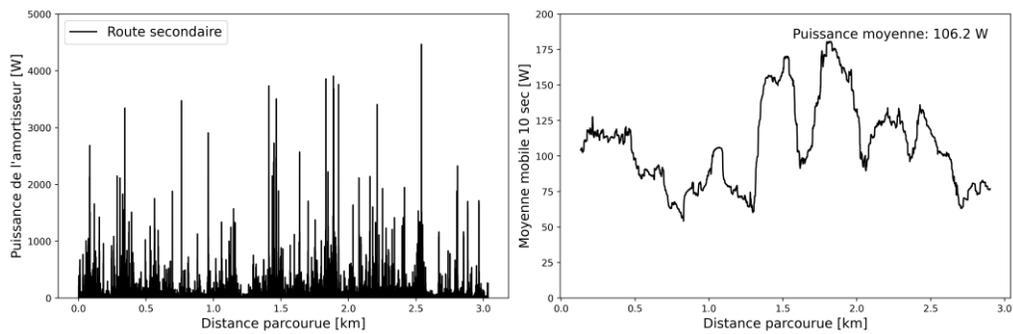


Figure 26 Puissance dissipée dans l'amortisseur droit sur une route secondaire; Graphique de gauche – signal brut; Graphique de droite – signal moyenné sur 10 secondes.

Les images de gauche des figures précédentes présentent la puissance d'amortissement obtenue en appliquant quelques méthodes de traitement de signal de base. On peut observer que le résultat obtenu semble « bruyant », et ce, de manière analogue aux mesures de profil d'uni obtenu avec un profilomètre pour calculer l'IRI. Cela était attendu, car le mouvement d'une suspension de véhicule (et donc la puissance d'amortissement) est directement relié au profil d'uni. Pour se faire une meilleure idée de la puissance d'amortissement, il est toutefois utile d'appliquer une moyenne mobile sur le signal obtenu. Les images de droite des figures précédentes illustrent la moyenne mobile obtenue en appliquant une fenêtre rectangulaire d'une durée de 10 secondes. On peut observer dans ces images que les puissances d'amortissement moyennées sont généralement très faibles (*i.e.* ≈ 15 W). La puissance d'amortissement augmente de manière ponctuelle (jusqu'à environ 125 W dans le cas du segment 2), et ce, sur une durée qui correspond essentiellement à la fenêtre rectangulaire utilisée pour le moyennage. Cela indique que pour une autoroute similaire au segment 2 (voir la Figure 23) la consommation de carburant associé à la puissance d'amortissement est très faible avec une valeur moyenne par amortisseur de seulement 25 W. Pour mettre les choses en perspectives, un micro-ondes peut facilement consommer 750 W de puissance. La même conclusion générale peut être apportée pour les chaussées rigides (*i.e.* Figure 24) et les chaussées mixtes (*i.e.* Figure 25).

Pour tester la capacité du profil d'uni à augmenter la consommation de carburant d'un véhicule lourd, des mesures expérimentales ont été prises le 4 octobre 2023 sur un segment de route secondaire ayant un profil d'uni particulièrement mauvais. Bien que l'équipe de recherche ne possède pas de données pour ce segment de route secondaire autres que celles obtenues avec le système d'instrumentation, il a été observé qualitativement que le profil d'uni à cet endroit était de plus faible qualité que ce qui se retrouve sur l'autoroute 20. Les résultats obtenus pour ce segment sont présentés à la Figure 26. On peut observer que la puissance d'amortissement est toujours significative le long du segment, et ce, sans pic ponctuel de puissance dissipée comme sur l'autoroute 20. Les mesures sur le segment de routes secondaire ont été prises à une vitesse de véhicule variable d'environ 70 km/h. La puissance dissipée moyenne par amortisseur est de 107 W.

La puissance d'amortissement moyenne a été calculée pour tous les segments de routes et exprimée en fonction de l'IRI. Cela est présenté à la Figure 27

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

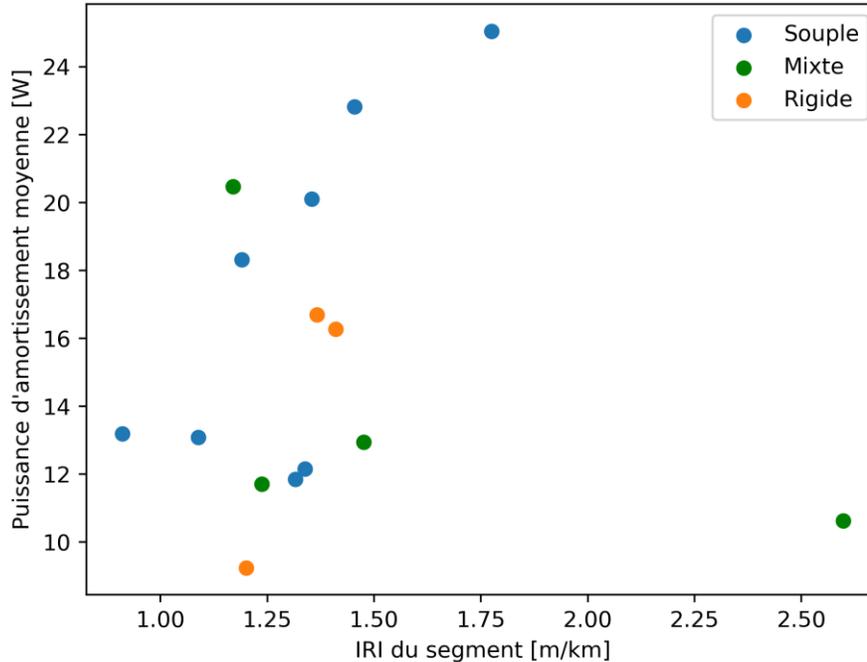


Figure 27 Relation entre la puissance d'amortissement moyenne et l'IRI pour tous les segments de routes.

On peut voir dans la Figure 27 que non seulement la puissance d'amortissement moyenne est très faible pour tous les segments, mais il ne semble pas y avoir de corrélation avec les IRI testés.

Pour mieux conceptualiser l'importance de la puissance d'amortissement sur la consommation de carburant, il est utile de convertir cette première valeur en force d'amortissement équivalente moyenne (F_{uni}). Cela correspond à une valeur de force constante qui s'opposerait au mouvement du véhicule et qui impliquerait la même puissance de travail que la puissance moyenne dissipée dans l'amortisseur. À noter que la force d'amortissement équivalente moyenne n'est pas le même concept que la force développée par l'amortisseur qui est mesurée directement par le système d'instrumentation. En connaissant la puissance d'amortissement moyenne (P_d) et la vitesse du véhicule qui est de 95 km/h (*i.e.* 26,4 m/s), la force d'amortissement équivalente moyenne se calcul de la manière suivante :

$$F_{uni} = \frac{P_d}{26,4 \text{ m/s}} \quad (9)$$

Les valeurs calculées avec l'équation 9 pour tous les segments sont présentées à la section 4.2.4.

4.2.4 Analyse des résultats – Résumé des résultats expérimentaux

La force de RR moyenne ainsi que la force d'amortissement équivalente moyenne F_{uni} ont été calculées pour l'ensemble des segments identifiés au Tableau 4. Le Tableau 6 illustre ces résultats.

Tableau 6: Résumé des résultats de la force de résistance au roulement moyenne et de la force d'amortissement équivalente moyenne obtenus par le système d'instrumentation le 4 octobre 2023.

Numéro segment	Type de chaussée	Longueur [km]	IRI [m/km]	F_{uni} [N]	Force de RR [N]	CRR [kg/ton]
1	Souple	3,0	N/A	0,9	257	8,3
2	Souple	22,7	1,83	0,9	221	7,2
3	Souple	3,9	1,50	0,9	225	7,3
4	Mixte	4,6	2,68	0,4	233	7,6
5	Rigide	9,4	1,22	0,3	235	7,6
6	Rigide	4,1	1,4	0,6	171	5,6
7	Mixte	17,6	1,20	0,8	229	7,5
8	Souple	7,0	0,93	0,5	203	6,6
9	Souple	15,3	1,39	0,8	214	7,0
10	Mixte	20,0	1,51	0,5	219	7,1
11	Souple	20,5	1,35	0,4	213	6,9
12	Souple	5,2	1,22	0,7	199	6,5
13	Souple	17,4	1,37	0,5	178	5,8
14	Mixte	3,5	1,26	0,4	191	6,2
15	Rigide	12,9	1,44	0,6	195	6,4
16	Souple	7,3	1,11	0,5	200	6,5

On observe au Tableau 6 que la contribution du mouvement des amortisseurs est négligeable par rapport à la RR totale, et donc négligeable par rapport à la consommation de carburant. Toutefois, cela n'exclut pas la possibilité que l'IRI soit corrélé avec d'autres caractéristiques de la chaussée qui influencent la résistance au roulement. Cet aspect est abordé plus en détail à la section 5.3.1

L'ensemble des résultats de coefficients de RR sont présentés à la Figure 28.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

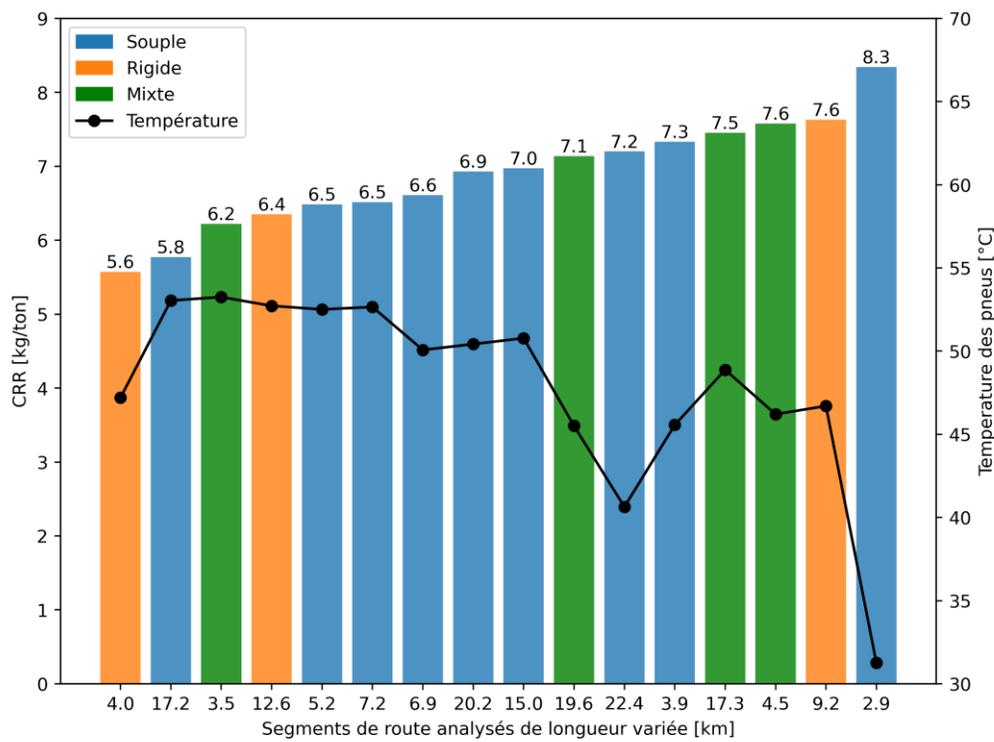


Figure 28 Coefficients de résistance au roulement mesurés et placés en ordre croissant par type de chaussée pour tous les segments lors des mesures expérimentales du 4 octobre 2023.

On observe à la Figure 28 que le pire segment avait un coefficient de RR de 8,3 kg/ton. Il s'agit toutefois d'un segment où la température des pneus n'avait pas encore eu le temps d'augmenter suffisamment pour se stabiliser, ce qui explique cette valeur plus élevée.

Les chaussées mixtes semblent généralement avoir un coefficient de RR plus élevée, mais cela ne semble pas être le cas systématiquement. De plus, les chaussées rigides présentent à la fois la meilleure et la pire performance à l'égard de la RR. Le segment rigide à 5,6 kg/ton possède essentiellement la même température de pneu que le segment rigide à 7,6 kg/ton. Cela est abordé plus en détail à la section 5.2.2.

5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Cette section vise à expliquer les différents résultats présentés à la section 4, ainsi que leur interprétation à l'égard de la question de recherche. De plus, cette section permet de faire le lien entre les résultats théoriques et expérimentaux.

5.1 Interprétation des résultats – phase théorique

Les résultats présentés à la section 4.1 offrent un portrait exhaustif et représentatif de la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds dans un contexte québécois. Pour obtenir ces résultats, le développement et l'application de l'approche statistique présentée à la section 3.1.4 furent essentiels. Les paragraphes suivants offrent une interprétation plus approfondie des résultats présentés à la section 4.1, visant ainsi à offrir une compréhension plus nuancée et contextualisée de ces données.

La Figure 13 montre que la vaste majorité de la consommation de carburant (*i.e.* 68.3%) des véhicules lourds provient de la résistance aérodynamique. Il était attendu que les simulations indiquent que l'importance de la RR des pneus soit plus faible que ce qui est présenté dans d'autres études sur le sujet (Odhams et al., 2010). L'explication est que le poids des véhicules lourds simulés suit une distribution statistique représentative de la réalité et beaucoup de ces véhicules roulent sans chargement. La différence de consommation de carburant entre les véhicules lourds entièrement chargés et vides peut être visualisée à partir des deux groupes de données du même type de véhicule à la Figure 12. Cela est particulièrement vrai pour les véhicules de type *trains routiers* qui présentent la plus grande différence de poids selon leur chargement. La méthodologie complète pour déterminer la distribution statistique du poids des essieux a été publiée par l'équipe de recherche dans un article de conférence (Tadja et al., 2023).

Étant donné que l'autoroute simulée dans l'étude de cas de l'autoroute 20 est essentiellement plane avec très peu de variations de limites de vitesse, les consommations de carburant dues au freinage et à l'énergie potentielle n'étaient que de 0,4% et 1,6% respectivement. Le freinage peut se produire si un conducteur réactif est simulé et que la limite de vitesse diminue ou qu'une variation non négligeable de la pente de la route se produit. D'autre part, l'énergie potentielle dans l'étude de cas était constante (en valeur absolue) car cette valeur dépend uniquement de la masse du véhicule lourd simulé et de la différence d'altitude entre l'emplacement initial et final du trajet simulé. Les valeurs de consommation de carburant associée au freinage et à l'énergie potentielle présentées à la Figure 13 sont donc uniquement valides pour le trajet sélectionné dans le cadre de l'étude de cas. Si un trajet montagneux avait été simulé, les résultats de freinage et d'énergie potentielle pourraient être largement différents.

Les résultats de la section 4.1 indiquent que l'importance relative de la SRR sur la consommation de carburant du trafic de véhicules lourds est très faible (en moyenne 0,3 % annuellement). Cela s'explique fondamentalement pour deux raisons :

1. Les **températures de chaussée** dans un contexte québécois sont particulièrement faibles pour une longue période de l'année.
2. Le **poids des chargements** au sein du trafic de véhicule lourd est souvent beaucoup plus petit que leur poids maximal.

L'explication 1 peut être visualisée dans la fonction de densité de probabilité de la température de la chaussée illustrée dans la deuxième colonne de la Figure 13. La grande majorité du temps, la température de la chaussée se situait dans la partie négligeable de l'amplitude de la SRR des chaussées souples. Cela peut être visualisé de manière explicite pendant le mois de janvier, où la température de la chaussée se situait exclusivement dans la partie négligeable, ce qui correspondait à une SRR de seulement 0,1 %.

L'explication 2 est en lien avec le fait que de nombreux véhicules lourds voyagent sans chargement. En effet, selon l'équation 2, la force de SRR d'un essieu circulant sur une chaussée souple est proportionnelle au carré du chargement par essieu. Les véhicules lourds sans chargement subissent toujours la même résistance aérodynamique, mais une SRR (et une RR de pneus) considérablement plus faible. Cela fait en sorte de diminuer l'importance relative de la SRR à l'échelle du trafic de véhicules lourds. La Figure 29 illustre ce concept.

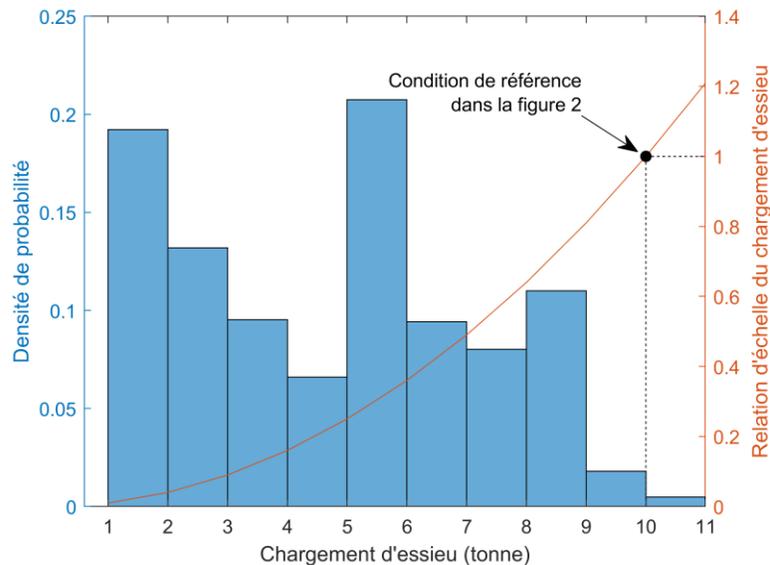


Figure 29 Fonction de densité de probabilité du chargement par essieu pour le trafic des véhicules lourds au Québec avec la relation d'échelle correspondant pour le calcul de la SRR avec l'équation (2).¹¹

La Figure 29 doit être interprétée comme suit : un essieu de 5 tonnes a une masse deux fois moindre que celle de l'essieu de référence de 10 tonnes. Par conséquent, la SRR de l'essieu de 5 tonnes représente 25% de la SRR de l'essieu de 10 tonnes, en raison de la relation d'échelle où $0,5^2$ donne une valeur de 0,25.

La Figure 29 indique que la charge par essieu est presque toujours inférieure à 10 tonnes, cette dernière valeur étant la condition de référence de la SRR illustrée à la Figure 3. En effet, les quelques données expérimentales de SRR pouvant être utilisées pour valider l'équation 2 sont pour un essieu de 10 tonnes (Nielsen et al., 2020) et de nombreuses études théoriques ont simulé la SRR avec des essieux entièrement chargés (Bazi et al., 2020; Chupin et al., 2013; Pouget et al., 2012). Cependant, si une densité de probabilité comme celle de la Figure 29 est prise en compte, l'importance relative de la SRR diminue à l'échelle du trafic des véhicules lourds.

¹¹ Figure extraite et traduite de : Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103792>.
Licence : CC BY-NC-ND 4.0 DEED (Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International).

5.2 Interprétation des résultats – phase expérimentale

Les résultats expérimentaux présentés à la section 4.2 permettent de mesurer sur une suspension de semi-remorque la force moyenne de RR totale (pneu, SRR, profil d'uni, etc.) ainsi que la force de résistance au roulement équivalente provenant du mouvement des amortisseurs. Ces deux métriques ont été utilisées pour faire des analyses comparatives entre les types de chaussée et ainsi répondre à la question de recherche.

5.2.1 Interprétation des résultats expérimentaux – analyse de la température des pneus

Pour déterminer l'effet de la chaussée sur la variation de la RR, il faut avant tout déterminer précisément la relation entre la RR mesurée et la température des pneus lors des mesures en question. Cela est important pour deux raisons :

1. La corrélation entre le coefficient de RR et la température des pneus doit être similaire avec ce qu'indique la littérature dans le contexte de mesures en laboratoire. Cela permet d'augmenter la confiance à l'égard de la validité des résultats présentés dans ce rapport qui proviennent d'une nouvelle méthode complètement différente de celle en laboratoire.
2. Il faut vérifier si la variabilité de la RR entre les segments est explicable uniquement par la variabilité des conditions d'opérations des pneus (e.g. température interne).

La Figure 30 présente la relation entre la RR de chacun des segments et la température interne moyenne des pneus.

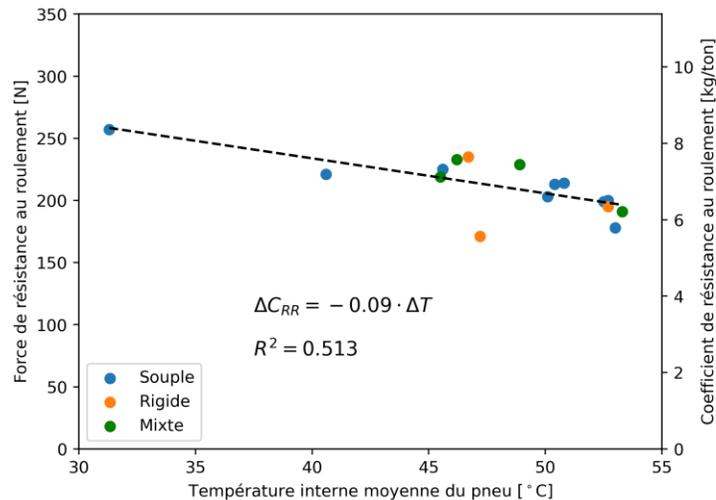


Figure 30 Relation entre la résistance au roulement et la température interne moyenne du pneu pour tous les segments des données expérimentales du 4 octobre 2023.

La droite de régression linéaire présentée à la Figure 30 prédit que le coefficient de RR diminue de 0,09 kg/ton pour chaque degré Celsius d'augmentation de température interne des pneus. Cette valeur correspond rigoureusement à ce qui a été mesuré dans le contexte de mesure en laboratoire (Hytinen et al., 2023b).

De plus, la valeur de R^2 est de 0.513, ce qui indique que la corrélation est statistiquement significative, mais que cette dernière n'explique pas toute la variabilité observée dans les mesures de RR. Cela suggère fortement que la variabilité de RR observée entre les segments est causée par la chaussée. Le segment le plus froid (*i.e.* 31.3°C) se situait avant la traversée du pont Pierre-Laporte, soit au début des mesures expérimentales, et ne fait que 2,9 km de long (sur un total de 174,4 km). Finalement, il faut spécifier que les différents points dans la Figure 30 représentent des segments de routes de longueurs variées. La régression linéaire n'a pas été pondérée en fonction de cet aspect.

Pour évaluer l'importance de la température des pneus sur la résistance au roulement mesurée, il faut quantifier la température moyenne par type de chaussée, et utiliser le coefficient de -0.09kg/ton/°C obtenu à la Figure 30. Cette analyse est présentée au Tableau 7.

Tableau 7 : Résumé des températures de pneus moyennes par type de chaussée et effet sur la résistance au roulement mesurée comparativement à la température de pneu moyenne; Une valeur négative indique une sous-estimation de la résistance au roulement par rapport à une température de pneu constante, et vice-versa.

Type de chaussée	Température des pneus	
	Moyenne [°C]	Effet sur la résistance au roulement [kg/ton]
Souple	48,2	0,0022
Mixte	47,5	0,070
Rigide	49,7	-0,13
Tous	48,3	N/A

Il est possible de voir au Tableau 7 que la température moyenne des pneus pour chaque type de chaussée est très similaire, ce qui mène à un effet sur la résistance au roulement mesurée qui est, à toutes fins pratique, négligeable. En effet, la précision sur la mesure de résistance au roulement est de ± 0.1 kg/ton, ce qui signifie que l'effet moyen des variations de température des pneus se situe dans l'incertitude inhérente du système de mesure.

5.2.2 Interprétation des résultats expérimentaux – analyse fréquentielle

Un des questionnements soulevés à la section 4.2.2 concerne la disparité entre les trois segments de chaussée rigides à l'égard de la RR. En effet, les segments rigides 5 et 6 avaient un coefficient de RR de 7,6 kg/ton et 5,6 kg/ton respectivement. En excluant le segment 1 qui ne fait pas partie de l'autoroute 20, les segments 5 et 6 ont respectivement la pire et la meilleure performance à l'égard de la RR. L'équipe de recherche a donc fait une analyse plus approfondie pour tenter de comprendre et d'expliquer cette différence.

La Figure 31 présente la force de RR mesurée pour les segments de chaussée rigide 5 et 6, ces derniers étant séparés par seulement par un viaduc.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

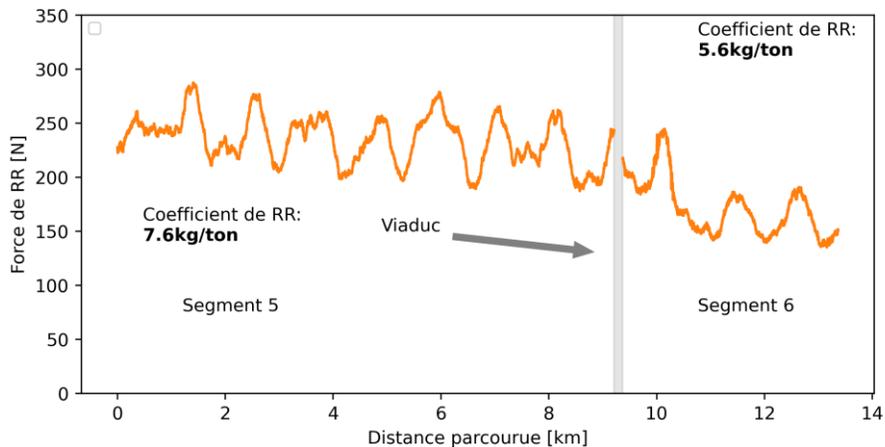


Figure 31 Force de résistance au roulement mesurée sur deux segments consécutifs de chaussée rigides lors de la campagne expérimentale du 4 octobre 2023.

La Figure 31 montre que la force de RR diminue significativement après avoir traversé le viaduc à la fin du segment 5. Plus précisément, le coefficient de RR moyen a diminué de 26% lorsque la semi-remorque instrumentée a roulé sur le segment 6.

Dans le but de comprendre la cause de cette différence, l'équipe de recherche s'est penchée sur l'analyse du mouvement de la suspension lorsque le véhicule circule sur les différentes chaussées rigides. Plus précisément, la densité spectrale de puissance du déplacement de l'amortisseur a été calculée et comparée lorsque le véhicule se déplace sur les deux chaussées rigides en question. Il s'agit d'une méthode mathématique qui permet de calculer les fréquences (*i.e.* mouvement cyclique) du mouvement de la suspension. Cela est présenté à la Figure 32.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

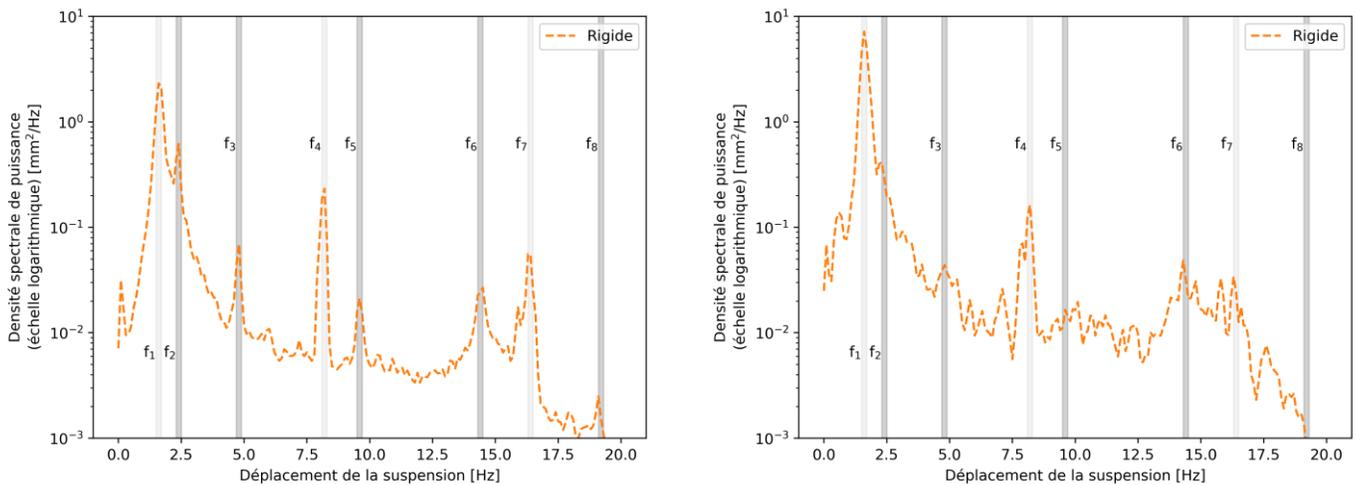


Figure 32 Comparaison des densités spectrales de puissance du déplacement de la suspension; Graphique de gauche - Segment 5; Graphique de droite – Segment 6.

L'intérêt de la Figure 32 est de comparer les segments aux fréquences des différents « pic » qui se retrouvent dans la densité spectrale de puissance. Chaque segment de la Figure 32 possède un « pic » à environ 1,6 Hz. Il s'agit d'une propriété dynamique intrinsèque à la suspension de semi-remorque et cette fréquence n'est pas en lien avec la chaussée. De plus, les deux segments possèdent un « pic » à environ 8,4 Hz. Sachant que le véhicule circule à 95 km/h (*i.e.* 26,4 m/s) et qu'une roue de véhicule lourd possède un rayon effectif d'environ 0,5 m, la fréquence de rotation des roues correspond à :

$$\frac{26,4 \text{ m/s}}{0,5 \text{ m/rad}} = 52,8 \text{ rad/s} = 8,4 \text{ Hz} \quad (10)$$

Il y a également présence d'un « pic » à 16,8 Hz, ce qui correspond à une harmonique (*i.e.* multiple) de la fréquence de rotation des roues. Dans tous les cas, la fréquence de rotation des roues n'est pas en lien avec la chaussée.

Toutefois, on peut observer à la Figure 32 que le segment 5 ayant un coefficient de RR plus élevées (*i.e.* 7,6 kg/ton) possède plusieurs « pics » distincts aux fréquences de 2,4 Hz, 4,8 Hz, 9,6 Hz, 14,4 Hz, et 19,2 Hz. Ces pics ne se retrouvent pas dans la densité spectrale de puissance du segment rigide 6. De manière analogue à l'équation 10, on peut calculer la « longueur d'onde » associée à une fréquence de 4,8 Hz de la manière suivante :

$$\frac{26,4 \text{ m/s}}{4,8 \text{ cycle/s}} = 5,5 \text{ m/cycle} \quad (11)$$

La longueur d'onde calculée à l'équation 11 a été obtenue avec un « pic » de la densité spectrale de puissance du mouvement de la suspension circulant sur le segment 5, ce dernier étant une chaussée rigide de dalles courtes goujonnées.

Cette longueur correspond rigoureusement à la distance entre deux joints consécutifs de dalles courtes goujonnées que l'on peut retrouver sur l'autoroute 20. De plus, la fréquence de 2,4 Hz correspond exactement à la moitié de la fréquence de 4,8 Hz tandis que les fréquences de 9,6 Hz, 14,4 Hz, et 19,2 Hz correspondent à des multiples entiers de la fréquence de 4,8 Hz. Cela indique que ces fréquences sont en fait des « harmoniques » de la chaussée rigide ayant des dalles courtes goujonnées.

Le Tableau 8 résume les fréquences d'intérêt présentées à la Figure 32

Tableau 8 : Fréquences d'intérêts contenues dans la densité spectrale de puissance du mouvement de la suspension circulant sur chaussée rigide de dalles courtes goujonnées.

Paramètre	Fréquence [Hz]	Interprétation physique
f_1	1,6	Fréquence naturelle de la <i>suspension</i>
f_2	2,4	<i>Double</i> de la longueur d'une <i>dalle</i>
f_3	4,8	Longueur d'une <i>dalle</i>
f_4	8,2	Vitesse de rotation des <i>roues</i>
f_5	9,6	<i>Moitié</i> de la longueur d'une <i>dalle</i>
f_6	14,4	<i>Tiers</i> de la longueur d'une <i>dalle</i>
f_7	16,4	<i>Double</i> de la vitesse de rotation des <i>roues</i>
f_8	19,2	<i>Quart</i> de la longueur d'une <i>dalle</i>

Basée sur les données des Figure 31 et Figure 32, l'équipe de recherche émet l'hypothèse que la réponse dynamique des chaussées rigides constituées de dalles courtes goujonnées influence leur performance à l'égard de la RR. Aux meilleures des connaissances de l'équipe de recherche, la littérature scientifique actuelle ne contient aucune observation expérimentale sur ce sujet. De plus, les seules études trouvées qui abordent ce sujet spécifique ont un caractère uniquement théorique puisqu'il n'y a aucune validation de données terrain (Balzarini et al., 2017b, 2017a).

Il a été confirmé que tous les segments rigides lors des mesures expérimentales du 4 octobre 2023 sont constitués de chaussées de dalles courtes goujonnées. Le phénomène observé sur le segment 5 ne s'appliquerait donc pas systématiquement à toutes les chaussées de dalles courtes goujonnées, puisque les segments 6 et 15 ne semblent pas présenter ce phénomène. De plus, l'équipe de recherche n'a actuellement aucune indication sur l'effet des conditions météorologiques sur ce phénomène.

Pour se convaincre de l'interprétation physique derrière les fréquences f_2 , f_3 , f_5 , f_6 , f_8 , présentées au Tableau 8, la Figure 33 présente la densité spectrale de puissance du mouvement de la suspension lorsque celle-ci a circulé sur le segment 2 constitué d'une chaussée souple.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

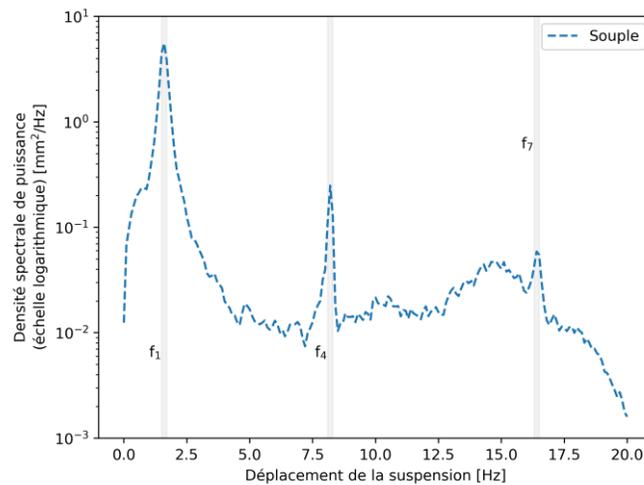


Figure 33 Densité spectrale du mouvement de la suspension sur le segment 2 constitué d'une chaussée souple.

L'absence des fréquences des f_2 , f_3 , f_5 , f_6 , f_8 , dans la Figure 33 confirme leur interprétation physique présentée au Tableau 7.

5.2.3 Interprétation des résultats expérimentaux – comparaison des types de chaussée

Il a été observé à la Figure 28 que le segment 14 fait d'une chaussée mixte possède un coefficient de RR plus faible (*i.e.* 6,2 kg/ton) que les trois autres segments de chaussée mixte (*i.e.* 5, 7, 10). Cela est intéressant, car cette valeur de coefficient de RR est plus faible que la moyenne des segments souples (*i.e.* 6,8 kg/ton). Par contre, la moyenne pondérée de coefficient de RR des chaussées mixtes des segments 4, 9, 12 est de 7,3 kg/ton. Cela semble indiquer que la vieille fondation de béton-ciment des chaussées mixtes de l'autoroute 20 puisse dans certains cas avoir comme effet d'augmenter la RR des véhicules lourds. Il serait intéressant de voir si certains paramètres (*e.g.* âge du revêtement) expliqueraient une certaine dégradation dans la performance des chaussées mixtes au fil du temps. Il est toutefois difficile de statuer à ce stade-ci sur ce qui influence la performance des chaussées mixtes, car aucune étude sur cette question n'a été trouvée dans la littérature.

En ce qui concerne les chaussées souples et rigides, celles-ci ont en moyenne un coefficient de RR très similaire avec 6,8 kg/ton et 6,7 kg/ton respectivement. Il est toutefois intéressant de constater que la meilleure chaussée souple (*i.e.* 5,8 kg/ton) est très près de la meilleure chaussée rigide (*i.e.* 5,6 kg/ton). Cela suggère qu'une chaussée souple a la possibilité d'être aussi performante qu'une chaussée rigide.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

Le Tableau 9 présente la moyenne de CRR pondérée en fonction de la longueur des segments, ainsi que la valeur optimale de CRR obtenue pour chaque type de chaussée.

Tableau 9 : Résumé des comparaisons des types de chaussée à l'égard du coefficient de résistance au roulement mesuré avec le système d'instrumentation sur l'autoroute 20 durant la journée du 4 octobre 2023 pour différents types de chaussée.

Segments de chaussée considérés	C _{RR} [kg/ton]	Notes
Mixtes – moyenne	7,3	Excluant le segment 14
Mixte – optimal	6,2	Segment 14
Rigides – moyenne	6,7	Tous les segments
Rigide – optimal	5,6	Segment 6
Souples - moyenne	6,8	Tous les segments
Souple – optimal	5,8	Segment 13

5.3 Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

5.3.1 Comparaison théorique et expérimentale – profil d'uni

Une des observations importantes des résultats expérimentaux concerne la faible puissance d'amortissement mesuré. En effet, la phase théorique du projet se basait sur le HDM4 model pour quantifier l'impact du profil d'uni sur la consommation de carburant. Le HDM4 model établit une relation linéaire entre l'excès de consommation de carburant et l'IRI. Toutefois, il s'agit d'un modèle qui se base sur une approche purement empirique. C'est-à-dire que ce modèle ne suggère pas d'interprétation physique pour comprendre les mécanismes qui font en sorte que le profil d'uni peut faire augmenter la consommation de carburant.

Lors de la phase expérimentale, l'équipe a mesuré l'importance du profil d'uni en quantifiant la puissance d'amortissement dans les amortisseurs. L'énergie étant une quantité physique qui se conserve (Cengel et al., 2014), une puissance d'amortissement plus grande implique nécessairement une consommation de carburant plus grande. Cette approche a l'avantage d'offrir une meilleure interprétation physique de l'effet du profil d'uni comparativement à l'approche du HDM4-model qui consiste à mesurer la consommation de carburant en faisant une corrélation statistique avec l'IRI.

La force d'amortissement équivalente moyenne (F_{uni}) présentée au Tableau 6 est toujours en bas (et parfois très proche) de 1 N. Il s'agit d'une force estimée qui s'oppose au déplacement du véhicule et qui existe à chaque demi-essieu du véhicule lourd. Pour la simplicité des calculs ci-dessous, supposons que F_{uni} possède une valeur de 1 N. Lors de la phase théorique, la force de résistance associée à l'IRI pour l'ensemble du véhicule lourd simulé était calculée avec l'équation 3, qui est réécrite ici :

$$F_{IRI} = 100,55(IRI - 1) \quad (3)$$

Où:

F_{IRI} : Force de résistance du profil d'uni (N)

IRI: Indice de rugosité international de la chaussée (m/km)

Faisons l'hypothèse que tous les amortisseurs du véhicule lourd avaient la même puissance d'amortissement lors des mesures du 4 octobre 2023. De plus, il y a six essieux sur le véhicule lourd, donc 12 demi-essieux. Ainsi F_{IRI}^* représente la force de résistance du profil d'uni ramenée sur un demi-essieu suivant l'équation suivante :

$$F_{IRI}^* = 8,38(IRI - 1) \quad (12)$$

Donc, F_{IRI}^* représenterait la force de RR équivalente causée par le mouvement des amortisseurs (voir le Tableau 6) en fonction de l'IRI de la chaussée.

Si la force d'amortissement équivalente moyenne (F_{uni}) est de 1 N, cela signifie que l'IRI correspondant serait de 1,12 m/km. Cette valeur est plus faible que la moyenne d'IRI des 16 segments considérés lors des mesures expérimentales. En effet, l'IRI moyen de tous les segments (pondéré selon leur longueur respective) était de 1,43 m/km.

La plus faible importance du profil obtenue expérimentalement pourrait potentiellement s'expliquer par différentes raisons :

1. Le profil d'uni sur la section de l'autoroute 20 mesurée par le système d'instrumentation est en meilleur état que l'étude de cas réalisée dans le contexte de la phase théorique.
2. Le modèle théorique de l'équation 3 fonctionne moins bien à bas IRI.
3. Il existe une corrélation entre l'IRI et la SRR, cette dernière étant partiellement liée à la performance structurelle d'une chaussée (Sollazzo et al., 2017), ce qui diminuerait l'importance initialement estimée de la puissance d'amortissement sur la consommation de carburant.
4. D'autres composantes (e.g, ballon de suspension) pourraient dissiper de l'énergie sous forme d'amortissement, au même titre que les amortisseurs.

L'approche derrière l'équation ci-dessus se base sur l'idée que la RR causée par le profil d'uni est entièrement causée par la dissipation d'énergie dans les amortisseurs. Toutefois, certains modèles dans la littérature scientifique sur le sujet (e.g, *HDM4-model* (Chatti & Zaabar, 2012)) définissent une relation linéaire entre la RR (i.e, sous forme d'excès de consommation de carburant) et l'IRI. Pour tenter de recréer cette approche, la Figure 34 trace une droite de régression linéaire entre l'IRI et le coefficient de RR mesuré sur tous les segments de route.

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

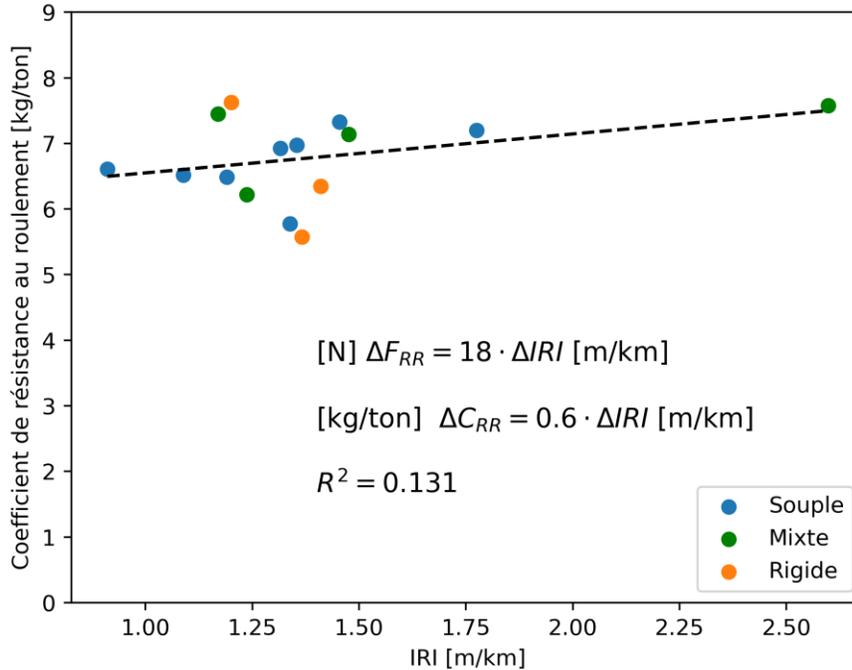


Figure 34 Corrélation linéaire entre le coefficient de résistance au roulement mesuré et l'IRI des segments du 4 octobre 2023,

On peut voir que la régression linéaire présentée à la Figure 34 prédit une augmentation de 0,6 kg/ton pour une augmentation de 1 m/km de l'IRI. Dans le contexte de la semi-remorque instrumentée, cela correspondrait à 18N de RR pour une augmentation de 1 m/km de l'IRI. Toutefois, il est très important de nuancer ce résultat en considérant la faible valeur du R^2 qui est de seulement 0,131. Cela signifie que la corrélation statistique, bien que perceptible, n'explique seulement qu'une faible proportion de la variabilité de RR entre les segments. Un autre aspect important concerne les valeurs d'IRI qui sont similaires entre les segments. Il serait utile d'avoir davantage de données avec des valeurs d'IRI qui couvrent toute la plage à considérer pour augmenter le niveau de confiance concernant la validité de la régression statistique présentée à la Figure 34.

Pour en revenir à la question de recherche, la phase théorique ne prévoyait pas que le profil d'uni soit un critère qui différencie les types de chaussées à l'égard de la consommation de carburant. Les résultats obtenus dans la phase expérimentale semblent confirmer cette hypothèse.

5.3.2 Comparaison théorique et expérimentale – SRR

Le phénomène d'harmonique présenté à la section 5.2.2 ne faisait pas partie des modèles dans la phase théorique du projet. En effet, la littérature scientifique sur laquelle se basent les modèles théoriques considère qu'une structure de chaussée rigide possède une raideur infinie, ce qui implique que celle-ci n'interagit pas avec les véhicules lourds et ne contribue pas à la résistance au roulement. Toutefois, les résultats expérimentaux obtenus sur le segment 5 semblent indiquer que cette hypothèse n'est pas toujours valide. Davantage de données expérimentales doivent être collectées pour mieux définir dans quelles circonstances la structure d'une chaussée rigide peut influencer la résistance au roulement.

Dans un contexte de validation des modèles théoriques présentés à la section 3.1.3, seuls les segments de chaussées rigides 6 et 15 seront considérés dans la présente section. En effet, ces deux segments semblent respecter l'hypothèse selon laquelle une structure de chaussée rigide n'influence pas la résistance au roulement. Les différentes moyennes présentées dans les paragraphes ci-dessous sont toutes pondérées selon la longueur des différents segments de routes qui les constitue.

Le coefficient de RR des segments 6 et 15 est de 6,2 kg/ton en moyenne avec une température de pneu moyenne de 51,4 °C. L'ensemble des segments de chaussée souple ont un coefficient de RR moyen de 6,8 kg/ton avec une température moyenne de pneu de 48,2 °C. Il s'agit d'une différence moyenne de coefficient de RR de :

$$6,8 \text{ kg/ton} - 6,2 \text{ kg/ton} = 0,6 \text{ kg/ton}$$

Les chaussées souples ont donc présenté un coefficient de RR plus élevé de 0,6 kg/ton comparativement aux chaussées rigides 6 et 15. Toutefois, la différence de température de pneu pour les deux types de chaussée lors des mesures est non négligeable :

$$51,4^{\circ}\text{C} - 48,2^{\circ}\text{C} = 3,2^{\circ}\text{C}$$

Les pneus sur les chaussées rigides 6 et 15 étaient donc en moyenne 3,2°C plus chaud que sur les chaussées souples. Il est important de comprendre que cette différence n'est pas en lien avec la chaussée elle-même, mais bien due à la variabilité des conditions expérimentales. Comme présenté à la section 5.2.1, une augmentation de température des pneus de 1°C entraînerait une diminution du coefficient de RR de 0,09 kg/ton. Cela signifie que les conditions d'opérations des pneus seraient responsables d'une variation du coefficient de RR à la hauteur de :

$$3,2^{\circ}\text{C} \cdot 0,09 \frac{\text{kg/ton}}{^{\circ}\text{C}} = 0,3 \text{ kg/ton}$$

Cela signifie que la différence de coefficient de RR qui est uniquement attribuable à l'effet de la chaussée entre les segments de chaussées rigides 6, 15, et les chaussées souples serait de :

$$0,6 \text{ kg/ton} - 0,3 \text{ kg/ton} = 0,3 \text{ kg/ton}$$

La valeur ci-dessus peut être comparée avec ce que prédisent les modèles théoriques qui permettent de quantifier la SRR.

Comme expliqué dans la section 3.1.3, la SRR d'une chaussée souple augmente de manière exponentielle avec sa température. Dans le cadre des mesures expérimentales du 4 octobre, la température de l'air était environ de 22 °C dans des conditions plutôt ensoleillée. Pour des fins de simplifications, supposons que la chaussée avait une température de surface de 35°C, ce qui correspond à une température pour laquelle il y a des données expérimentales disponibles dans la littérature (Nielsen et al., 2020).

Selon le modèle de l'équation 2, la force de SRR d'un essieu de 10 tonnes sur chaussée souple de 0,255m d'épaisseur de revêtement bitumineux à 35°C serait d'environ 20 N. Considérant que l'essieu de la suspension instrumentée a une masse de 6,2 tonnes, la SRR prédite théoriquement serait de :

$$\left(\frac{6,2 \text{ tonnes}}{10 \text{ tonnes}}\right)^2 \cdot 20N = \mathbf{8N}$$

Pour comparer la valeur ci-dessus avec les mesures expérimentales, il est utile de normaliser celle-ci en kg/ton. Sachant que l'essieu est de 6,2 tonnes, la valeur de SRR prédite de 8 N correspond à 0,13 kg/ton. Cela est sensiblement plus faible que la valeur de 0,31 kg/ton mentionné précédemment.

La différence de RR mesurée entre les chaussées souples et les segments rigides 6 et 15 est donc plus élevée que ce qui est prédit par le modèle de SRR de l'équation 2. Face à cette différence entre la prédiction théorique de SRR et la moyenne expérimentale obtenue, il est important de rappeler deux faits :

1. Il est possible que l'épaisseur moyenne des revêtements bitumineux sur l'autoroute 20 soit plus faible que la valeur de 0,255 m utilisée dans le calcul ci-dessus. La considération d'une épaisseur de revêtement plus faible ferait augmenter la valeur de 8 N prédite par le modèle théorique.
2. La force de RR mesurée au sein des chaussées souples variait considérablement (environ $\pm 47N$ ou $\pm 1,5 \text{ kg/ton}$), ce qui indique que des facteurs autres que le type de revêtement (e.g, module de la fondation, macrotexture) peuvent influencer cet aspect.

Puisqu'il est prédit que la SRR possède une relation exponentielle avec la température de la chaussée, il semble primordial d'effectuer des mesures expérimentales dans des conditions météorologiques plus variées. Un plus

grand éventail de données expérimentales sera utile pour la question de recherche, et ce, pour les trois raisons suivantes :

1. Observer si la différence moyenne de RR mesurée entre les chaussées souples et rigides diminue dans des conditions hivernales (ou augmente dans des conditions plus estivales).
2. Selon les constats de la question ci-dessus, statuer sur l'importance de la macrotecture à l'égard de la RR. Cet aspect, qui n'était pas présent dans les modèles théoriques, serait potentiellement indépendant des conditions météorologiques.
3. Observer si le phénomène d'harmonique expliqué à la section 5.2.2 dépend des conditions météorologiques. De plus, il serait important pour la question de recherche de déterminer la proportion des chaussées de dalles courtes goujonnées concernée par ce phénomène.

6 CONCLUSION

Cette étude approfondie a porté sur l'influence du type de chaussée sur la consommation de carburant des véhicules lourds dans le contexte climatique et routier spécifique du Québec. En combinant des analyses théoriques et expérimentales, la recherche a exploré la question de manière globale.

La phase théorique du projet a permis de faire avancer la littérature scientifique sur le sujet en considérant l'ensemble des paramètres affectant la consommation de carburant, ce qui a permis de mettre l'influence de la chaussée en perspective.

La phase expérimentale a fourni des résultats qui semblent indiquer que les phénomènes physiques en jeu seraient plus complexes qu'initialement suggérés par la littérature. Cela fait en sorte que l'interprétation et les observations des résultats expérimentaux de ce présent rapport, bien que très utiles pour faire avancer les connaissances, ne sont pas suffisamment universelles et systématiques pour apporter une conclusion définitive. Autrement dit, la chaussée apparaît comme un aspect pertinent à considérer dans l'estimation de la consommation de carburant, mais la question semble plus étendue que le choix du revêtement de chaussée.

De plus, les mesures expérimentales indiquent que, dans des conditions autoroutières telles que sur l'autoroute 20, la puissance dissipée par les amortisseurs était très faible. Cet écart par rapport aux études théoriques pourrait s'expliquer par deux raisons : soit une proportion significative de l'amortissement se produit ailleurs dans le véhicule, soit le profil d'uni est corrélé à d'autres caractéristiques de la chaussée qui influencent la résistance au roulement.

Un aspect intéressant des données expérimentales est la variation de la résistance au roulement observée au sein des mêmes catégories de chaussée. Par exemple, certains segments de chaussée rigide ont démontré une résistance au roulement supérieure à d'autres. Cela suggère que des facteurs intrinsèques à chaque segment, tels que la méthode de construction, la rigidité de la fondation, ou l'interaction entre un revêtement bitumineux et sa fondation de béton-ciment pourraient influencer significativement leur performance à l'égard de la RR.

Il est important de souligner que les conclusions de cette recherche sont spécifiques au Québec en raison de ses caractéristiques climatiques et de trafic distinctes. Néanmoins, les méthodologies employées et les enseignements tirés offrent des perspectives utiles pour des études similaires dans d'autres régions présentant des conditions comparables.

En conclusion, l'équipe de recherche fait les recommandations suivantes :

ANALYSE DE L'EFFET DU TYPE DE REVÊTEMENT DE CHAUSSÉE SUR LA RÉSISTANCE
AU ROULEMENT DES VÉHICULES AU QUÉBEC

1. Faire une meilleure surveillance de l'évolution saisonnière de l'IRI dans un contexte autoroutier. Cela permettrait de voir si le delta IRI est influencé par le type de chaussée et ainsi clarifier si cela peut potentiellement constituer un facteur distinctif entre ceux-ci.
2. Mener à bien des mesures expérimentales avec le système d'instrumentation dans des conditions météorologiques différentes que celle du 4 octobre 2023. Cela permettrait d'observer l'évolution saisonnière de la variabilité de résistance au roulement entre les segments d'autoroute mesurée, et ainsi, avoir un portrait plus exhaustif de la situation.
3. Mener à bien des mesures expérimentales avec le système d'instrumentation sur des autoroutes différentes de celles du 4 octobre 2023. Une plus grande quantité de données expérimentales améliore la signification statistique des résultats et ainsi la confiance dans les conclusions qui en sont tirées.
4. Améliorer les pratiques quant à la détermination de l'efficacité du transfert de charge entre les dalles courtes goujonnées. En effet, cela permettrait de mieux comprendre la prédominance des résultats mesurés par l'équipe de recherche concernant les chaussées de dalles courtes goujonnées, ainsi que leur influence sur la résistance au roulement.

À la lumière des travaux réalisés dans le cadre de cette étude, bien que les chaussées rigides semblent avoir le potentiel d'être plus performantes, les résultats obtenus suggèrent que le type de chaussée n'est pas un paramètre suffisant pour prédire la consommation d'énergie des véhicules lourds. L'IRI, la structure des chaussées, ainsi que les conditions météorologiques semblent également avoir une influence significative sur la résistance au roulement des véhicules lourds. Une étude plus exhaustive est recommandée.

RÉFÉRENCES

- Andersen, L. G. (2015). *Rolling Resistance Modelling: From Functional Data Analysis to Asset Management System [PhD thesis]*. Roskilde University.
- Andersen, L. G., Larsen, J. K., Fraser, E. S., Schmidt, B., & Dyre, J. C. (2015). Rolling resistance measurement and model development. *Journal of Transportation Engineering*, 141(2), 04014075. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000673](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000673)
- Andr n, P. (2006). Power spectral density approximations of longitudinal road profiles. *International Journal of Vehicle Design*, 40(1–3), 2–14. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2006.008450>
- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., & Silva, H. M. R. D. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006>
- Balzarini, D., Chatti, K., Zaabar, I., Butt, A. A., & Harvey, J. T. (2019). Mechanistic-Based Parametric Model for Predicting Rolling Resistance of Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, 2673(7), 341–350. <https://doi.org/10.1177/0361198119847611>
- Balzarini, D., Zaabar, I., & Chatti, K. (2017a). Impact of concrete pavement structural response on rolling resistance and vehicle fuel economy. *Transportation Research Record*, 2640(1), 84–94. <https://doi.org/10.3141/2640-10>
- Balzarini, D., Zaabar, I., & Chatti, K. (2017b). Impact of PCC Pavement Structural Response on Rolling Resistance and Vehicle Fuel Economy. In *Pavement Life-Cycle Assessment: Vol. CRC Press* (pp. 69–78). <https://doi.org/10.1201/9780429264702-17>
- Balzarini, D., Zaabar, I., Chatti, K., & Losa, M. (2019). Impact of flexible pavement structural response on rolling resistance and vehicle fuel economy. In *Pavement and Asset Management* (pp. 135–141). <https://doi.org/10.1201/9780429264702-17>
- Bazi, G., Hajj, E. Y., Ulloa-Calderon, A., & Ullidtz, P. (2020). Finite element modelling of the rolling resistance due to pavement deformation. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(3), 365–375. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1480778>
- Bennett, C. R., & Greenwood, I. D. (2003). Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4. In *Highway Development and Management Series* (Vol. 7).
- Bradley, R. (2000). Technology roadmap for the 21st century truck program. 21CT-001, USA, Download from: www.Doe.Gov/Bridge, December.
- Butt, A. A., Harvey, J. T., Fitch, D., Kedarisetty, S., Lea, J. D., Lea, J., & Reger, D. (2022). *Investigation of the Effect of Pavement Deflection on Vehicle Fuel Consumption: Field Testing and Empirical Analysis*. <https://doi.org/10.7922/G2X34VRF>
- Cebon, D. (1999). *Handbook of Vehicle-Road Interaction*.
- Cengel, Boles, & Lacroix. (2014). *Thermodynamique: une approche pragmatique* (C. Education, Ed.).

- Chatti, K., & Zaabar, I. (2012). Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs. In *Transportation Research Board* (Vol. 720). <https://doi.org/10.17226/22808>
- Chowdhury, H., Moria, H., Ali, A., Khan, I., Alam, F., & Watkins, S. (2013). A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck. *Procedia Engineering*, 56, 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.108>
- Chupin, O., Piau, J.-M., & Chabot, A. (2013). Evaluation of the Structure-induced Rolling Resistance (SRR) for pavements including viscoelastic material layers. *Materials and Structures*, 46(4), 683–696. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9925-z>
- Cider, L., Pettersson, E., Larsson, L., Johansson, T., Johansson, S., Iven, G., Replinger, C., & Technology, V. (2023). *Analysis of axle configuration, tire pressure, and tire temperature on fuel consumption of hct combinations*. 1–15.
- Clark, J. M. C., & Smith, M. C. (2012). Power absorption invariance for brownian spring forcing. *51st IEEE Conference on Decision and Control*, 4396–4399. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426727>
- Coleri, E., & Harvey, J. T. (2017). Impact of pavement structural response on vehicle fuel consumption. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 143(1), 04017002. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000004>
- Cunanan, C., Tran, M. K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., & Fowler, M. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies*, 3(2), 474–489. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028>
- Dhokal, N., & Elseifi, M. A. (2017). Effects of Asphalt-Mixture Characteristics and Vehicle Speed on Fuel-Consumption Excess Using Finite-Element Modeling. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143(9), 04017047. <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000074>
- Direction du transport routier des Marchandises. (2013). *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers*.
- Dodds, C. J., & Robson, J. D. (1973). The description of road surface roughness. *Journal of Sound and Vibration*, 31(2), 175–183. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80373-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80373-6)
- Domprobst, F. (2021). TRUCK TIRE ROLLING RESISTANCE IN REAL USAGE. *16th International Symposium on Heavy Vehicle Transport & Technology, HVTT16*.
- Domprobst, F., & Beaupere, J.-F. (2023). Truck tire and real-life fuel consumption. *Technology Convergence 2023 Setting the Wheels In Motion: Reimagining the Future of Heavy Vehicles, Roads and Freight*, 1–12.
- Ejsmont, J. A., Ronowski, G., Świczko-Żurek, B., & Sommer, S. (2017). Road texture influence on tyre rolling resistance. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), 181–198. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1160835>
- Ejsmont, J. A., Ronowski, G., & Wilde, J. (2012). *Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility*.
- Ejsmont, J. A., Świczko-Żurek, B., Ronowski, G., & Wilde, J. (2014). *Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility, Round 2*.

- Ejsmont, J., & Sommer, S. (2021). Selected aspects of pavement texture influence on tire rolling resistance. *Coatings*, 11(7), 776. <https://doi.org/10.3390/coatings11070776>
- Estaji, M., Coleri, E., Harvey, J. T., & Butt, A. A. (2021). Predicting excess vehicle fuel use due to pavement structural response using field test results and finite element modelling. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(8), 973–983. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1655563>
- Fradette, N., Doré, G., Pierre, P., & Hébert, S. (2005). Evolution of pavement winter roughness. *Transportation Research Record*, 1913, 137–147. <https://doi.org/10.3141/1913-14>
- Fraggstedt, M. (2008). *Vibrations, damping and power dissipation in Car Tyres [PhD thesis]*. Royal Institute of Technology.
- Fuel Efficiency Benchmarking in Canada's Trucking Industry*. (2019). <https://www.nrcan.gc.ca/energy/efficiency/transportation/commercial-vehicles/reports/7607>
- Hammarström, U., Eriksson, J., Karlsson, R., & Yahya, M.-R. (2012). Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface conditions. *Statens Väg-Och Transportforskningsinstitut*.
- hosravi, M., Osaddeghi, F., Veisi, M., & Hodayari-b, A. (2015). Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis. *Journal of Central South University*, 22(12), 4645–4652. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3015-7>
- Hyttinen, J., Ussner, M., Österlöf, R., Jerrelind, J., & Drugge, L. (2023a). Truck tyre transient rolling resistance and temperature at varying vehicle velocities - Measurements and simulations. *Polymer Testing*, 122(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108004>
- Hyttinen, J., Ussner, M., Österlöf, R., Jerrelind, J., & Drugge, L. (2023b). Truck tyre transient rolling resistance and temperature at varying vehicle velocities - Measurements and simulations. *Polymer Testing*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108004>
- International Organization for Standardization. (1996). *ISO 8608:1995, Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data*. <https://www.iso.org/standard/71202.html>
- Karlsson, R., Carlson, A., & Dolk, E. (2012). Energy use generated by traffic and pavement maintenance: decision support for optimization of low rolling resistance maintenance treatments. *Statens Väg-Och Transportforskningsinstitut*.
- Karlsson, R., Hammarström, U., Sörensen, H., & Eriksson, O. (2011a). Road surface influence on rolling resistance: Coastdown measurements for a car and an HGV. *Statens Väg-Och Transportforskningsinstitut*.
- Karlsson, R., Hammarström, U., Sörensen, H., & Eriksson, O. (2011b). *Road surface influence on rolling resistance Coastdown measurements for a car and an HGV. VTI notat 24A-2011*.
- Khosravi, M., Mosaddeghi, F., OVeisi, M., & Khodayari-b, A. (2015). Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by

- CFD analysis. *Journal of Central South University*, 22(12), 4645–4652. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3015-7>
- Kim, R. E., Kang, S., Spencer, B. F., Al-Qadi, I. L., & Ozer, H. (2017). New Stochastic Approach of Vehicle Energy Dissipation on Nondeformable Rough Pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, 143(4), 04016118. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001192](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001192)
- Kropáč, O., & Můčka, P. (2008). Indicators of longitudinal unevenness of roads in the USA. *International Journal of Vehicle Design*, 46(4), 393–415. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2008.020306>
- LaClair, T. J. (2006). Rolling Resistance. In *The Pneumatic Tire* (1er ed., pp. 475–529).
- Lépine, J. (2016). *An Optimised Machine Learning Algorithm for Detecting Shocks in Road Vehicle Vibration [PhD thesis]*. Victoria University.
- Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2021). *Analyse de l'effet du type de revêtement de chaussée sur la résistance au roulement des véhicules au Québec - Rapport d'étape 2 : Revue de l'art antérieur*.
- Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2023a). Effects of Pavement Characteristics on Rolling Resistance of Heavy Vehicles: A Literature Review. *Transportation Research Record*, 1–21. <https://doi.org/10.1177/03611981221145125>
- Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2023b). Introducing a Novel Method for Measuring Rolling Resistance and Dynamic Vertical Load on a Semi-Trailer Suspension. *Technology Convergence 2023: Setting the Wheels In Motion: Reimagining the Future of Heavy Vehicles, Roads and Freight*. https://www.techconverge23.org/_files/ugd/5eb250_49c894e34b334e64bc07125a6f74bdd8.pdf
- Levesque, W., Samson, N., & Julien, L. (2023). Pavement-effects on heavy-vehicle fuel consumption in cold climate using a statistical approach. *Transportation Research Part D*, 120(103792).
- Liu, X., & Al-Qadi, I. (2022). Integrated Vehicle–Tire–Pavement Approach for Determining Pavement Structure–Induced Rolling Resistance under Dynamic Loading. *Transportation Research Record*, 036119812110677. <https://doi.org/10.1177/03611981211067797>
- Liu, X., & Al-Qadi, I. L. (2021). Development of a simulated three-dimensional truck model to predict excess fuel consumption resulting from pavement roughness. *Transportation Research Record*, 2675(9), 1444–1456. <https://doi.org/10.1177/03611981211007849>
- Loprencipe, G., & Zoccali, P. (2017). Use of generated artificial road profiles in road roughness evaluation. *Journal of Modern Transportation*, 25(1), 24–33. <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0122-1>
- Louhghalam, A., Akbarian, M., & Ulm, F.-J. (2014). Scaling relationships of dissipation-induced pavement-vehicle interactions. *Transportation Research Record*, 2457(1), 95–104. <https://doi.org/10.3141/2457-10>
- Louhghalam, A., Akbarian, M., & Ulm, F.-J. (2015). Roughness-Induced Pavement–Vehicle Interactions: key Parameters and impact on Vehicle fuel consumption. *Transportation Research Record*, 2525(1), 62–70. <https://doi.org/10.3141/2525-07>

- Louhghalam, A., Tootkaboni, M., Igusa, T., & Ulm, F. J. (2019). Closed-form solution of road roughness-induced vehicle energy dissipation. *Journal of Applied Mechanics*, 86(1), 011003–1. <https://doi.org/10.1115/1.4041500>
- Louhghalam, A., Tootkaboni, M., & Ulm, F.-J. (2015). Roughness-Induced Vehicle Energy Dissipation: Statistical Analysis and Scaling. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(11), 04015046. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000944](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000944)
- Lu, X.-P. (1985). Effects of Road Roughness on Vehicular Rolling Resistance. *ASTM International*.
- Madhusudhanan, A. K., Ainalis, D., Na, X., Garcia, I. V., Sutcliffe, M., & Cebon, D. (2021). Effects of semi-trailer modifications on HGV fuel consumption. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92, 102717. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102717>
- Mohanraj, K., & Merritt, D. K. (2023). Use of Pavement–Vehicle Interaction-Related Models to Estimate Excess Fuel Consumption of Pavement Alternatives During the Design Stage. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2677(3), 104–112. <https://doi.org/10.1177/03611981221113567>
- Nielsen, N. R. (2020). *Investigating pavement response to a moving vehicle [PhD thesis]*. Roskilde University.
- Nielsen, N. R., Hecksher, T., Nielsen, C. P., & Hjorth, P. G. (2020). Measurement of structural rolling resistance at two temperatures. *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction II*, 220–224. <https://doi.org/10.1201/9781003027362-52>
- Odhams, A. M. C., Roebuck, R. L., Lee, Y. J., Hunt, S. W., & Cebon, D. (2010). Factors influencing the energy consumption of road freight transport. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224(9), 1995–2010. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES2004>
- Pacejka, H. B. (2012). Theory of Steady-State Slip Force and Moment Generation. In *Tire and Vehicle Dynamics* (pp. 87–147). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-097016-5.00003-6>
- Paterlini, G., Yucel, S., Lucking, M. M., & Magnuson, J. (2015). Rolling Resistance Validation. In *Minnesota Department of Transportation, Tech Rep*.
- Perrotta, F., Parry, T., & Neves, L. C. (2018). A machine learning approach for the estimation of fuel consumption related to road pavement rolling resistance for large fleets of trucks. *The Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018)*, 1–5.
- Perrotta, F., Parry, T., Neves, L. C., Buckland, T., Benbow, E., & Mesgarpour, M. (2019). Verification of the HDM-4 fuel consumption model using a Big data approach: A UK case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.001>
- Pevitt, C., Chowdury, H., Moriaand, H., & Alam, F. (2012). A computational simulation of aerodynamic drag reductions for heavy commercial vehicles. *Proceedings of the 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, AFMC 2012, January*.

- Popov, A. A., Cole, D. J., Winkler, C. B., & Cebon, D. (2003). Laboratory measurement of rolling resistance in truck tyres under dynamic vertical load. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(12), 1071–1079. <https://doi.org/10.1243/09544070360729419>
- Pouget, S., Sauzéat, C., Benedetto, H. D., & Olard, F. (2012). Viscous Energy Dissipation in Asphalt Pavement Structures and Implication for Vehicle Fuel Consumption. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(5), 568–576. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000414](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000414)
- Robson, J. D., & Kamash, K. M. A. (1977). Road Surface Description in Relation to Vehicle Response. *Vehicle System Dynamics*, 6(2–3), 153–157. <https://doi.org/10.1080/00423117708968527>
- Samson, N., Levesque, W., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2021). Modelling and Mapping of Heavy-Vehicle Energy Consumption. *16th International Symposium on Heavy Vehicle Transport & Technology, HVTT16*.
- Sandberg, T. (2001a). *Heavy Truck Modeling for Fuel Consumption Simulations and Measurements*. (Doctoral dissertation, Linköping University).
- Sandberg, T. (2001b). Modeling and validation of traveling resistance for heavy trucks. *Electronic Engine Controls SP-1585*, 47–51. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0555>
- Sandberg, T., Ramdén, C., & Gamberg, M. (2004). Tire Temperature Measurements for Validation of a New Rolling Resistance Model. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(22), 589–594. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)30407-x](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)30407-x)
- Sandberg, U., Bergiers, A., Ejsmont, J. A., Goubert, L., Karlsson, R., & Zöller, M. (2011). *Road surface influence on tyre/road rolling resistance*.
- Sandberg, U., Bergiers, A., Ejsmont, J. A., Goubert, L., & Zöller, M. (2012). *Rolling Resistance – Measurement Methods for Studies of Road Surface Effects*.
- Shakiba, M., Ozer, H., Ziyadi, M., & Al-Qadi, I. L. (2016). Mechanics based model for predicting structure-induced rolling resistance (SRR) of the tire-pavement system. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 20(4), 579–600. <https://doi.org/10.1007/s11043-016-9313-0>
- Smith, D., Ozpineci, B., Graves, R., Jones, P. T., Lustbader, J., Kelly, K., Walkowicz, K., Birky, A., Payne, G., Sigler, C., & Mosbacher, J. (2020). *Medium- and Heavy-Duty Vehicle Electrification: An Assessment of Technology and Knowledge Gaps* (Issue December 2019). <https://doi.org/10.2172/1615213>
- Smith, M. C., & Swift, S. J. (2011). Power dissipation in automotive suspensions. *Vehicle System Dynamics*, 49(1–2), 59–74. <https://doi.org/10.1080/00423110903427421>
- Sollazzo, G., Fwa, T. F., & Bosurgi, G. (2017). An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 134, 684–693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.186>
- Tadja, H. D., Bégin-Drolet, A., & Lépine, J. (2023). The effect of truck loading factor on a major trucking route in Québec and on GHG emissions. *Transportation Association of Canada 2023 Conference and Exhibition-*

- Lessons in Leadership//Association Des Transports Du Canada 2022 Congrès et Exposition-Lecons de Leadership.*, 1–21.
- Taylor, G., & Patten, J. (2006). Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption. *Centre for Surface Transportation Technology (CSTT), National Research Council of Canada (NRC), Ontario, Canada.*
- Wang, D., Wang, Y., Han, Y., Dang, Y., Fan, D., & Li, L. (2015). Numerical simulation of the influence of additional aerodynamic devices on the aerodynamic drag of van-body truck. *SAE-China Congress 2014: Selected Papers*, 15–26.
- Ydrefors, L., Hjort, M., Kharrazi, S., Jerrelind, J., & Stensson Trigell, A. (2021). Rolling resistance and its relation to operating conditions – a literature review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(12), 2931–2948. <https://doi.org/10.1177/09544070211011089>
- Zaabar, I., & Chatti, K. (2010). Calibration of HDM-4 Models for Estimating the Effect of Pavement Roughness on Fuel Consumption for U.S. Conditions. *Transportation Research Record*, 2155, 105–116. <https://doi.org/10.3141/2155-12>
- Zhang, B., Tan, C. A., & Dai, T. (2021). Ride comfort and energy dissipation of vehicle suspension system under non-stationary random road excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 511, 116347. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116347>
- Ziyadi, M., Ozer, H., Shakiba, M., & Al-Qadi, I. L. (2022). Vehicle excess fuel consumption due to pavement deflection. *Road Materials and Pavement Design*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2027264>