

HEC MONTRÉAL

**Évaluation des coûts et des bénéfices économiques et énergétiques d'un
transfert modal du transport routier lourd de marchandises vers le
ferroviaire au Canada**

par
Joséphine De Bruycker

**Pierre-Olivier Pineau
HEC Montréal
Codirecteur de recherche**

**Justin Leroux
HEC Montréal
Codirecteur de recherche**

**Sciences de la gestion
(Spécialisation Économie appliquée)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences en gestion
(M. Sc.)*

Septembre 2023
© Joséphine De Bruycker, 2023

Résumé

Le transport de marchandises au Canada est majoritairement effectué par les modes de transport ferroviaire et routier. En 2019, les trains transportaient 1,6 fois plus de tonnes-kilomètres de marchandises que les camions, tandis que ces trains ont consommé 5,1 fois moins d'énergie, et ont émis 4,6 fois moins de gaz à effet de serre (GES). À la lumière de ce constat, ce mémoire évalue les investissements dans les infrastructures routières et ferroviaire nécessaires pour subvenir à une demande supplémentaire en transport de marchandises. Des projections de la demande en transport de marchandises sont estimées à l'horizon 2050, et les scénarios étudiés comparent les investissements et les coûts actualisés associés au transport de ces tonnes supplémentaires par train seulement puis par camion seulement. Une analyse de la sensibilité des hypothèses ayant le plus d'influence sur les résultats (coûts actualisés) permet de considérer leur sous- et surestimation potentielle. La comparaison des coûts actualisés des deux modes dans le cadre d'un scénario de base mène à des coûts actualisés du transport ferroviaire 2,2 fois inférieurs à ceux du transport routier. Ainsi, selon les hypothèses du scénario de base, transporter l'entièreté des tonnes de marchandises projetées entre 2018 et 2050 par train coûte 2,2 fois moins que si ce même volume de marchandises est transporté par camion, en plus de générer plus de huit fois moins de gaz à effet de serres (GES). Une analyse de sensibilité des variables ayant la plus grande influence sur le calcul des coûts actualisés permet de confirmer la robustesse de ces résultats. Contrairement aux actions qui coûtent de l'argent pour réduire les GES, il est estimé que le transfert modal vers le train représente un gain économique de 643 \$ par tonne. Le train devrait conséquemment être fortement priorisé dans les actions de décarbonation en transport des marchandises.

Abstract

The transportation of goods in Canada is predominantly carried out by railway and road modes. In 2019, trains transported 1.6 times more tonne-kilometers of goods than trucks, while trains consumed 5.1 times less energy (and emitted 4.6 times fewer greenhouse gas emissions) than trucks. Considering this observation, this report evaluates the required rail and road infrastructure investments to meet the growing demand for freight transportation. Projections of freight transportation demand are estimated until 2050, and the studied scenarios compare the investments and discounted costs associated with transporting these additional tonnes solely by train and solely by truck. An analysis of the sensitivity of assumptions in the scenario design, which have the most influence on calculating total discounted costs, allows considering their potential under- and overestimations. Comparing the discounted costs of both modes in the base scenario leads to railway transportation costs being 2.2 times lower than road transportation costs. Thus, according to the assumptions of the baseline scenario, transporting all the tonnes of goods projected between 2018 and 2050 by rail costs 2.2 times less than if the same volume of goods were transported by truck, in addition to generating more than eight times less greenhouse gas (GHG) emissions. A sensitivity analysis of the variables with the greatest influence on the calculation of discounted costs confirms the robustness of these results. Unlike actions that cost money to reduce GHGs, it is estimated that modal shift to rail represents an economic gain of \$643 per tonne. Rail should therefore be given high priority in decarbonizing freight transport.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux et des figures	ix
Remerciements.....	xiii
Introduction.....	1
Chapitre 1 Mise en contexte.....	3
Historique du transport de marchandises au Canada	3
Caractéristiques actuelles du transport de marchandises au Canada	4
Propriété des infrastructures de transport.....	4
Quantité de marchandises transportées	6
Énergie consommée pour le transport de marchandises	7
Émissions de GES.....	8
Le réseau de transport ferroviaire actuel.....	9
Caractéristiques du réseau et des véhicules	10
Le réseau de transport routier actuel	11
Caractéristiques du réseau et des véhicules	11
Question de recherche.....	12
Demande de transport de marchandises au Canada en 2018	13
Projection de la croissance de la demande pour le transport de marchandises à l’horizon 2050	15
Scénario étudié.....	18
Chapitre 2 Revue de la littérature.....	21

L'interrelation économie-transport-émissions	21
Opportunité pour le transfert modal du routier vers le ferroviaire.....	24
Facteurs influençant le choix modal	25
Faisabilité du transfert modal dans le contexte nord-américain	26
Estimation des coûts de transport appliqué au transfert modal.....	27
Contribution à la littérature	36
Chapitre 3 Méthodologie	37
Niveau d'augmentation de la capacité du réseau de transport	37
Investissements dans le réseau ferroviaire	38
Investissements dans le réseau routier	40
Coûts des investissements.....	40
Investissements dans le réseau ferroviaire	41
Investissements dans le réseau routier	41
Coûts d'opération.....	42
Dépenses annuelles du camionnage.....	43
Dépenses annuelles du transport ferroviaire	44
Émissions de GES et consommation d'énergie	45
Projections de la croissance des tonnes-kilomètres	46
Comparaison des coûts totaux	46
Conclusion de la méthodologie.....	47
Chapitre 4 Données et résultats.....	49
Niveau d'augmentation de la capacité du réseau de transport	49
Investissements dans le réseau ferroviaire	49
Investissements dans le réseau routier	51
Coûts unitaires des investissements	53

Investissements dans le réseau ferroviaire	53
Investissements dans le réseau routier	54
Coûts unitaires des opérations.....	54
Coûts unitaires des émissions de GES et de la consommation énergétique	55
Comparaison des coûts à l’horizon 2050	56
Scénario de base.....	57
Scénario de base sans coûts des émissions	57
Scénario avec coûts augmentés pour le transport ferroviaire.....	59
Analyse de sensibilité.....	60
Méthodologie de l’analyse de sensibilité de +/- 25 %	61
Résultats de l’analyse de sensibilité de +/- 25 %	63
Conclusion de l’analyse de sensibilité de +/- 25 %	65
Méthodologie de l’analyse de sensibilité des taux de croissance projetés.....	65
Résultats de l’analyse de sensibilité des taux de croissance projetés.....	66
Conclusion de l’analyse de sensibilité des taux de croissance projetés	67
Méthodologie de l’analyse limite.....	70
Résultats de l’analyse limite	71
Conclusion de l’analyse limite.....	73
Chapitre 5 Limites de l’étude.....	75
Estimation de la demande de transport actuelle et future	75
Électrification des transports.....	76
Autres éléments omis	77
Pistes de réflexion futures	78
Conclusion	79
Bibliographie.....	i

Liste des tableaux et des figures

Liste des tableaux

Tableau 1. Type de propriété des infrastructures de transport	5
Tableau 2. Tonnes-kilomètres de marchandises transportées au Canada en 2019 selon le mode de transport.....	6
Tableau 3. Consommation d'énergie secondaire et intensité énergétique par mode de transport pour le transport de marchandises au Canada, 2019.....	7
Tableau 4. Émissions de GES et intensité en GES du transport de marchandises par mode de transport au Canada, 2019	8
Tableau 5. Tonnes transportées selon le mode au Canada, 2018.....	14
Tableau 6. Taux de croissance du transport de marchandises selon le mode	15
Tableau 7. Résultats de Forkenbrock (1999), coûts du transport de marchandises routier	29
Tableau 8. Résultats de Forkenbrock (2001), coûts du transport de marchandises ferroviaire.....	30
Tableau 9. Coûts par unité de distance de construction de projets autoroutiers en Amérique du Nord	35
Tableau 10. Produits-marchandises moyens par tonne-mile commerciale (TMC) aux États-Unis, 2018 et convertis en CAD	42
Tableau 11. Dépenses du camionnage pour compte d'autrui, 2019 (milliers de dollars canadiens de 2019).....	43
Tableau 12. Charges d'exploitation du transport ferroviaire de marchandises, 2019 (millions de dollars canadiens de 2019).....	45
Tableau 13. TCAC des tonnes-kilomètres selon le mode de transport entre 2000 et 2018, Canada.....	46
Tableau 14. Taux de croissance annuel composé des tonnes, des locomotives et des wagons en service au Canada entre 1986 et 2021	50
Tableau 15. Infrastructures ferroviaires à ajouter au réseau existant pour subvenir à la demande projetée	51

Tableau 16. Infrastructures routières à ajouter au réseau existant pour subvenir à la demande projetée	53
Tableau 17. Coûts unitaires des infrastructures ferroviaires à ajouter, 2018.....	53
Tableau 18. Coûts unitaires des infrastructures routières à ajouter, 2018	54
Tableau 19. Coûts unitaires des opérations de transport de marchandises par mode, 2019	54
Tableau 20. Intensité énergétique et émissions de GES par tonne-kilomètre selon le mode de transport, 2019.....	55
Tableau 21. Prix minimal de la pollution par le carbone de 2018 à 2030	55
Tableau 22. Coûts actualisés par mode de transport, scénario de base.....	57
Tableau 23. Émissions de GES par mode de transport, scénario de base.....	57
Tableau 24. Coûts actualisés par mode de transport, scénario de base en considérant des coûts d'émissions de GES nuls	58
Tableau 25. Estimation des coûts évités par tonne de GES non émis du transport ferroviaire.....	58
Tableau 26. Coûts actualisés du transport ferroviaire - Coûts de construction des voies, des installations de transbordement et des opérations doublés.....	59
Tableau 27. Part du total des éléments de coûts par mode de transport	60
Tableau 28. Résultats de l'analyse de sensibilité de +/- 25 %.....	63
Tableau 29. Résultats de l'analyse de sensibilité des taux de croissance projetés	66
Tableau 30. Résultats de l'analyse limite	71

Table des figures

Figure 1. Répartition des groupes de marchandises des wagons complets à l'origine, 2019	10
Figure 2. Comparaison des émissions de GES, de la consommation d'énergie, et des tonnes-kilomètres de marchandises transportées, 2019	12
Figure 3. Carte du réseau ferroviaire canadien, comparaison du trafic total en 2018 versus la moyenne des trois années précédentes	17
Figure 4. Carte du réseau routier national et flux de trafic aux postes frontaliers, 2018	18
Figure 5. Corridors ferroviaires et tonnages transportés en Amérique du Nord, 2018...	38
Figure 6. Approche méthodologique utilisée pour les coûts d'investissement	47
Figure 7. Approche méthodologique utilisée pour les coûts d'opération et de la pollution	48
Figure 8. Graphiques en tornade de l'analyse de sensibilité +/- 25 %	68

Remerciements

Je tiens à remercier mes co-directeurs de mémoire, Pr. Justin Leroux et Pr. Pierre-Olivier Pineau pour leur soutien et leur disponibilité au cours des derniers mois. Je les remercie pour leurs conseils et leurs commentaires qui m'ont grandement aidé durant le processus de rédaction de ce mémoire.

Je souhaite remercier Pierre-Antoine pour son support et sa compagnie durant les dernières années. Il a contribué à rendre mes années universitaires extraordinaires. Je remercie également mon père, Jean Jacques, de m'avoir soutenu et encouragé à me dépasser durant mon parcours scolaire et universitaire. Je remercie ma mère, Virginie, pour sa douceur et son aide inconditionnelle. Je remercie aussi mon frère, Eliot, de m'aider à garder les pieds sur terre.

Finalement, je remercie mes collègues et amies Anne-Gabrielle, Mya et Ola. En plus de rencontrer des futures économistes brillantes, j'ai fait la connaissance d'amies inoubliables. Cette maîtrise a été des plus agréables grâce à vous.

Introduction

Le secteur des transports est le deuxième secteur qui contribue le plus aux émissions de gaz à effets de serre (GES) du Canada, après le secteur du pétrole et gaz, selon les secteurs économiques canadiens (Environnement et Changement climatique Canada, 2023). Le transport de marchandises émet le tiers des GES de ce secteur, dont les camions lourds sont les principaux émetteurs (Environnement et Changement climatique Canada, 2023). C'est toutefois le mode de transport ferroviaire qui transporte la plus grande quantité de marchandises, mesurées en tonnes-kilomètres. À ce jour, le transport de marchandises routier lourd possède moins d'alternatives à faibles émissions de GES, tel que l'électrification, que le transport routier de passagers, notamment dû à la longueur des trajets et au poids des chargements de marchandises. Étant donné l'intensité énergétique moindre du transport ferroviaire comparé au transport routier lourd, ce mémoire explore le potentiel de réduction des émissions du secteur du transport de marchandises par le transfert modal du transport routier vers le transport ferroviaire.

L'objectif de ce mémoire est d'estimer les coûts associés au transport de marchandises par train, et de les comparer aux coûts associés à leur transport par camion. Pour cela, ce mémoire estime la quantité du total des marchandises transportées par camions et par trains au Canada à l'horizon 2050, et compare les coûts associés au transport de ces projections de volume de marchandises par train, aux coûts de transporter ces volumes par camion. Ceci permet notamment d'estimer les investissements et leurs coûts pour des volumes identiques de marchandises pour les deux modes de transport, afin de comparer les coûts du transport ferroviaire et routier sur la base la plus équivalente possible. Après avoir estimé la demande projetée en transport de marchandises, cette approche nécessite d'estimer le niveau d'investissements dans les infrastructures et le matériel roulant requis dans chaque réseau pour subvenir à cette demande. Ensuite, il est possible d'estimer les coûts unitaires des investissements dans les infrastructures et dans le matériel roulant, et les coûts unitaires des opérations de transport. Ces estimations permettent alors d'étudier deux scénarios de transport de marchandises, le premier utilisant le transport ferroviaire et le second utilisant le transport routier, et de comparer leurs coûts actualisés respectifs

sur la période à l'étude. Une analyse de sensibilité subséquente permet de considérer l'influence de la valeur des paramètres utilisés dans les scénarios ayant le plus d'influence sur le calcul des coûts actualisés totaux.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre présente une mise en contexte du secteur du transport de marchandises au Canada, en mettant l'accent sur le transport ferroviaire et routier, ainsi que la définition de la question de recherche. Le deuxième chapitre présente une revue de la littérature pertinente à l'étude du transfert modal dans le cas du transport de marchandises. Le troisième chapitre présente la méthodologie utilisée pour estimer les résultats. Le quatrième chapitre présente les données utilisées, les résultats obtenus, ainsi qu'une analyse de sensibilité appliquée aux résultats. Le cinquième chapitre présente les limites de l'étude.

Chapitre 1

Mise en contexte

Le secteur du transport de marchandises du Canada dépend majoritairement du transport ferroviaire et routier. L'étude du développement historique du transport de marchandises met la lumière sur les enjeux ayant façonné le secteur depuis le 19^e siècle, alors dominé par le transport ferroviaire, et montre leurs répercussions sur le secteur dans son état actuel. La présentation des caractéristiques du transport de marchandises et des réseaux de transport ferroviaire et routier permet de déterminer les enjeux associés à chaque mode de transport, afin de mener à la formulation de la question de recherche.

Historique du transport de marchandises au Canada

L'essor économique du Canada durant le 19^e siècle est lié au transport ferroviaire, alors que des compagnies de chemin de fer privées sont actives au pays depuis les années 1850 (Office des transports du Canada, 2017). Avant la fin du siècle, trois lignes ferroviaires majeures voient le jour : le chemin de fer du Grand Trunk, reliant Montréal à Toronto; le chemin de fer Intercolonial, reliant la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick au Québec; et le Chemin de fer Canadien Pacifique (CFCP ou CP), premier chemin de fer transcontinental canadien (Office des transports du Canada, 2017). À cette époque, le gouvernement fédéral soutient l'expansion de nouvelles compagnies de chemin de fer pour introduire la concurrence et réduire les tarifs élevés (Office des transports du Canada, 2017). Toutefois, le début de la Première Guerre mondiale marque la fin des appuis gouvernementaux au Grand Trunk et au Canadian Northern qui sont endettés à la suite de leurs travaux d'expansion majeurs, tandis que le CP parvient à générer des bénéfices (Office des transports du Canada, 2017). Ainsi, en 1919, la Compagnie des chemins de fer nationaux (CN) est créée par la fusion du Canadian Northern et du Grand Trunk Pacific avec les compagnies de chemins de fer déjà détenues par le gouvernement, et en 1923, le Grand Trunk se joint à la Compagnie des chemins de fer nationaux et la nationalisation du réseau ferroviaire canadien est complétée (CN, 2019; Office des transports du Canada, 2017).

La construction de la route transcanadienne débute en 1950 et est entièrement payée par le gouvernement (Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière, 2019). Ces nouveaux liens routiers reliant les provinces du pays contribuent à retirer le statut de moyen de transport principal au transport ferroviaire et érodent sa position de monopole naturel (Office des transports du Canada, 2017). S’ajoutant à cela, des gazoducs et oléoducs sont construits à travers le pays, et la voie maritime du Saint-Laurent commence à être exploitée, permettant le transport de marchandises de grand volume entre Montréal et les Grands Lacs (Office des transports du Canada, 2017). La solidification de ces alternatives de transport contribue à la baisse considérable du pouvoir de marché des deux compagnies ferroviaires principales (Caves et Christensen, 1980). En 1954, la *Loi sur les transports routiers* remet aux provinces la compétence relative au camionnage commercial interprovincial (Office des transports du Canada, 2017).

Par la suite, les coupures de dépenses, les reports de projets et les abandons de lignes se multiplient, notamment en réponse à l’augmentation des coûts de transport (Office des transports du Canada, 2017). Par conséquent, en 1995, la privatisation du CN est officialisée pour un montant de 2,079 milliards de dollars, dont approximativement 900 millions de dollars ont été utilisés pour rembourser la dette de la compagnie (CN, 2019; Office des transports du Canada, 2017; Padova, 2005). La privatisation est indicatrice d’un changement dans les objectifs de politiques publiques du gouvernement concernant les chemins de fer, et la possession d’une compagnie ferroviaire de transport de marchandises n’en fait plus partie (Padova, 2005).

Caractéristiques actuelles du transport de marchandises au Canada

La présentation des caractéristiques du secteur du transport de marchandises permet d’identifier les éléments qui peuvent influencer le choix de mode de transport.

Propriété des infrastructures de transport

Le réseau de transport de marchandises canadien dispose de quatre modes de transport principaux. Le Tableau 1 décrit la nature de gestion des différentes infrastructures de transport.

Tableau 1. Type de propriété des infrastructures de transport

Infrastructure de transport	Propriété
Chemin de fer	Privée
Routes	Publique
Ports maritimes	Mixte
Aéroports	Sans but lucratif

Source : Association des transports du Canada (2021)

En 2019, plus de 80 % du réseau de voies de chemin de fer était détenu par le CN et le CP, le reste appartenant à des chemins de fer d'intérêt local¹ (CFIL) et à VIA Rail (Transports Canada, 2020a). Puisque le CN et le CP sont des compagnies privées cotées en bourse, le gouvernement n'a pas de pouvoir décisionnel concernant les investissements dans les infrastructures (Association des transports du Canada, 2021). Le réseau routier du Canada est majoritairement détenu et exploité par les gouvernements provinciaux, territoriaux et municipaux, et une petite partie est détenue par le gouvernement fédéral (Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière, 2019). Il existe 17 ports maritimes qui sont gérés par des administrations portuaires et 37 ports qui sont exploités par Transports Canada (Transports Canada, 2021b). Les administrations portuaires sont sous la supervision du gouvernement fédéral et sont financièrement autonomes (Port de Vancouver). Les autres ports sont gérés par des entités provinciales ou locales, ou par d'autres ministères fédéraux (Transports Canada, 2021b). Il y a 23 aéroports appartenant au gouvernement fédéral, et ils sont loués à des administrations aéroportuaires qui exploitent ces aéroports (Transports Canada, 2020c). Les administrations aéroportuaires sont des sociétés sans but lucratif et sans capital-actions (Transports Canada, 2020c).

Le Canada fait face à une situation similaire à celle des États-Unis, où le gouvernement fédéral a historiquement privilégié les investissements dans les autoroutes par rapport aux chemins de fer, ce qui a conduit à une situation où le transport routier bénéficie d'une subvention implicite en raison de son utilisation des routes construites et entretenues par l'État (Kaack *et al.*, 2018). En revanche, le transport ferroviaire, qui est géré par des

¹ Il existe 39 CFIL au Canada (Association des chemins de fer du Canada, 2021).

entreprises privées, doit supporter tous les coûts liés à la possession, à la construction, à l'entretien des infrastructures et au paiement des taxes qui sont ensuite reflétés dans les tarifs (Kaack *et al.*, 2018).

Quantité de marchandises transportées

En 2019 au Canada, le transport intérieur et international de marchandises s'élève à 1 031 395 millions de tonnes-kilomètres (Ressources naturelles Canada). L'addenda statistique de 2020 de Transport Canada contient uniquement des données sur les tonnes-kilomètres transportées pour le transport ferroviaire, routier pour compte d'autrui et aérien, et n'inclut pas de données sur l'activité du transport maritime de marchandises, ni sur le transport par camion, lorsqu'effectué par la même compagnie qui possède la marchandise transportée. En raison de ces limites sur la disponibilité des données venant de Transport Canada, les analyses de l'activité en tonnes-kilomètres se basent sur les données de Ressources naturelles Canada. Les tonnes-kilomètres sont une mesure de l'activité du transport de marchandises permettant de comparer les différents modes. Le Tableau 2 présente le détail des tonnes-kilomètres de marchandises transportées au Canada en 2019 en fonction du mode de transport.

Tableau 2. Tonnes-kilomètres de marchandises transportées au Canada en 2019 selon le mode de transport

	Tonnes-kilomètres (millions)	Part du total
Transport des marchandises	1 031 395	100,0 %
Ferroviaire	451 277	43,8 %
Routier	368 436	35,7 %
<i>Légers</i>	35 832	3,5 %
<i>Moyens</i>	52 628	5,1 %
<i>Lourds</i>	279 976	27,1 %
Maritime	208 429	20,2 %
Aérien	3 253	0,3 %

Source : Tableau 14 , 21, 27, 28, 53, 57, 59 (Ressources naturelles Canada)

Le Tableau 2 montre que le transport ferroviaire est le mode principal de transport de marchandises en matière de tonnes-kilomètres. Puisque le transport routier de longue distance s'effectue majoritairement par camion lourd, il est pertinent de comparer le

transport ferroviaire de marchandises au transport routier lourd (Fan et Heminthavong, 2022). De plus, 76 % du transport routier de marchandises est effectué par camions lourds, constituant le type de camion le plus utilisé en matière de tonnes-kilomètres. En 2019, les tonnes-kilomètres transportées en train sont donc 1,6 fois supérieures aux tonnes-kilomètres transportées en camions lourds.

Énergie consommée pour le transport de marchandises

La base de données de Ressources naturelles Canada permet d'analyser des statistiques de la consommation d'énergie secondaire du transport de marchandises par source d'énergie et par mode de transport. La consommation d'énergie secondaire représente l'énergie consommée par les utilisateurs finaux, et n'inclut pas l'énergie utilisée pour transformer de l'énergie et pour acheminer de l'énergie (Ressources naturelles Canada, 2020). En 2019, l'énergie secondaire consommée pour le transport de marchandises au Canada est évaluée à 1 219,6 pétajoules (PJ), permettant à 1 031 395 millions de tonnes-kilomètres d'être transportées, pour une intensité énergétique de 1,18 MJ par tonne-kilomètre (Ressources naturelles Canada). Le Tableau 3 présente la consommation d'énergie secondaire et l'intensité énergétique du transport de marchandises en fonction du mode de transport au Canada en 2019.

Tableau 3. Consommation d'énergie secondaire et intensité énergétique par mode de transport pour le transport de marchandises au Canada, 2019

	Consommation d'énergie (PJ)	Intensité énergétique (MJ/Tkm)
Transport des marchandises	1 219,6	1,18
Ferroviaire	96,0	0,21
Routier	1 033,3	2,80
<i>Légers</i>	<i>242,0</i>	<i>6,75</i>
<i>Moyens</i>	<i>305,5</i>	<i>5,80</i>
<i>Lourds</i>	<i>485,8</i>	<i>1,74</i>
Maritime	82,7	0,40
Aérien	7,7	2,35

Source : Tableau 7, 14, 21, 27, 28, 53, 57, 59 (Ressources naturelles Canada)

Le Tableau 3 montre que 85 % de la consommation d'énergie du transport de marchandises est attribuable au transport routier en 2019. En particulier, le transport par

camions lourds totalise 40 % de la consommation d'énergie du transport des marchandises, contre 8 % pour le transport ferroviaire. De plus, le Tableau 3 indique que c'est le transport par camions légers qui possède l'intensité énergétique la plus élevée parmi tous les modes, s'élevant à 6,75 MJ/Tkm. En 2019, l'énergie consommée par le transport ferroviaire est donc 5,1 fois inférieure à l'énergie consommée par les camions lourds.

Émissions de GES

En 2019, le carburant diesel est la source d'énergie générant 64,6 % des émissions de GES du transport des marchandises, suivi de l'essence automobile qui génère 30,5 % des émissions de GES (Ressources naturelles Canada). La même année, l'Association des chemins de fer du Canada indique que les compagnies ferroviaires ont consommé 2,1 milliards de litres de carburant pour le transport de marchandises (Association des chemins de fer du Canada, 2021). Le carburant utilisé par l'industrie ferroviaire est le diesel. Le transport routier des marchandises utilise majoritairement le carburant diesel, qui génère 63,1 % des émissions de GES, suivi de l'essence automobile, qui génère 36,4 % des émissions de GES (Ressources naturelles Canada). Le Tableau 4 présente les émissions de GES et l'intensité en GES du transport de marchandises en fonction du mode de transport au Canada en 2019.

Tableau 4. Émissions de GES et intensité en GES du transport de marchandises par mode de transport au Canada, 2019

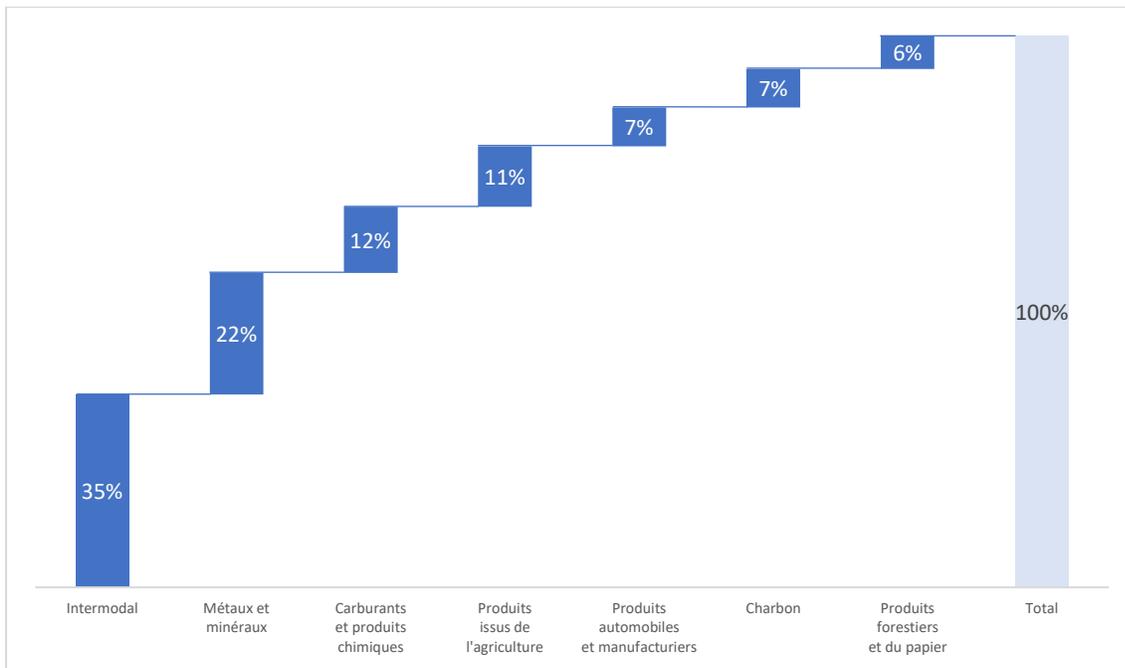
	Émissions de GES (Mt éq CO₂)	Intensité en GES (tonnes éq CO₂/ millions Tkm)
Transport des marchandises	86,0	83,4
Ferroviaire	7,5	16,6
Routier	72,0	195,3
<i>Légers</i>	16,2	452,3
<i>Moyens</i>	21,2	402,2
<i>Lourds</i>	34,6	123,6
Maritime	6,0	29,0
Aérien	0,5	162,6

Source : Tableau 6, 14, 21, 27, 28, 53, 57, 59 (Ressources naturelles Canada)

Le Tableau 4 indique qu'approximativement 84 % des émissions de GES du transport de marchandises sont attribuables au transport routier en 2019. En particulier, le transport par camions lourds totalise 40 % des émissions de GES du transport de marchandises, contre 9 % pour le transport ferroviaire. En 2019, les GES émis par le transport ferroviaire sont donc 4,6 fois inférieurs aux GES émis par les camions lourds. Ceci se traduit par une intensité en GES du transport ferroviaire 7,4 fois inférieure à l'intensité en GES du transport routier lourd.

Le réseau de transport ferroviaire actuel

Le réseau ferroviaire canadien transporte majoritairement des marchandises depuis et vers les États-Unis, en plus d'être relié aux marchés internationaux au travers des ports (Transports Canada, 2020a). Le transport de marchandises par rail transporte principalement des produits lourds et en vrac et des conteneurs sur des longues distances (Transports Canada, 2020a). En 2019, 35 % des wagons complets à l'origine étaient des wagons intermodaux (Association des chemins de fer du Canada, 2020). Les wagons intermodaux contiennent des palettes ou des conteneurs qui sont interchangeés avec les transporteurs maritimes et routiers (BNSF Railway, 2022). Ainsi, les marchandises sont successivement transportées dans la même unité de chargement par différents modes de transport (CPCS, 2013). La Figure 1 présente la répartition des différents groupes de marchandises des wagons complets à l'origine en 2019.



Source : Association des chemins de fer du Canada (2020)

Figure 1. Répartition des groupes de marchandises des wagons complets à l'origine, 2019

La Figure 1 montre qu'en 2019, 22 % des wagons complets à l'origine ont transporté des métaux et minéraux, 12 % des carburants et produits chimiques, 11 % des produits issus de l'agriculture, 7 % des produits automobiles et manufacturiers, 7 % du charbon, et 6 % des produits forestiers et du papier (Association des chemins de fer du Canada, 2020).

Caractéristiques du réseau et des véhicules

En 2018, le réseau ferroviaire de marchandises a exploité plus de 41 000 kilomètres de voies ferrées au Canada² (Association des chemins de fer du Canada, 2020). En 2019, environ 52 % du réseau de voies de chemin de fer était détenu par le CN, 30 % par le CP, et 18 % par des compagnies de chemin de fer d'intérêt local et VIA Rail (Transports Canada, 2020a). La grande majorité des trains en fonction au Canada utilisent le diesel comme carburant, et seulement quelques trains de banlieue possèdent un réseau électrifié. En 2019, il y avait 3 554 locomotives diesel utilisées pour le transport de marchandises au Canada (Association des chemins de fer du Canada, 2019). De ces locomotives, 2 633 sont utilisées par les chemins de fer de classe 1, et 272 appartiennent à des compagnies de

² Les segments se terminant aux États-Unis ne sont pas inclus dans les voies en exploitation.

chemin de fer local et régional (Association des chemins de fer du Canada, 2019). À titre d'exemple, les locomotives de classe 1 de BNSF Railway ont la capacité de parcourir plus de 7,5 millions de kilomètres durant leur vie utile (BNSF Railway, 2022). Après 8 à 10 ans, les locomotives sont soumises à un entretien approfondi et le moteur est reconstruit ou remplacé (BNSF Railway, 2022). En 2019, il y avait 61 030 wagons en services (Association des chemins de fer du Canada, 2019).

Le réseau de transport routier actuel

Le transport routier est le principal mode de transport de marchandises au Canada (Transports Canada, 2020a). 44 % des entreprises de camionnage sont situées en Ontario, 18 % au Québec, 14 % en Alberta et 13 % en Colombie-Britannique (Transports Canada, 2020a). Le transport routier transporte majoritairement des produits alimentaires et des produits manufacturés et transportés de valeur supérieure (Transports Canada, 2020a). Le secteur de fabrication automobile comporte une chaîne d'approvisionnement interconnectée dépendante du transport routier entre les États-Unis et le Canada (Transports Canada, 2020a). Dans la région de l'Ontario, les produits manufacturés de l'industrie automobile sont transportés plusieurs fois à travers la frontière avec les États-Unis durant le processus de fabrication (Transports Canada, 2020a).

Caractéristiques du réseau et des véhicules

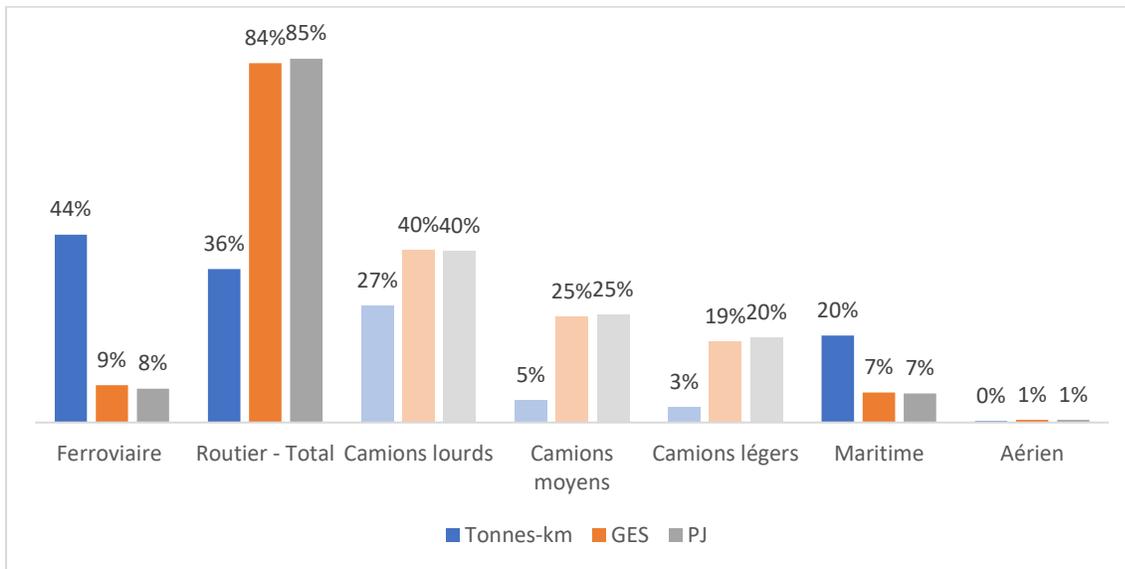
Au Canada en 2017, il existe plus de 1,13 million de kilomètres de voies équivalentes à deux voies publiques (Transports Canada, 2020b). Le Réseau routier national (RRN) du Canada est constitué de liens routiers interprovinciaux et internationaux, et 95 % de ce réseau est détenu et exploité par les gouvernements provinciaux et territoriaux (Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière, 2019). En 2019, 25,4 millions de véhicules automobiles routiers sont immatriculés au Canada, dont 92 % sont des véhicules pesant moins de 4 500 kilogrammes, 4,4 % sont des camions moyens et lourds pesant plus de 4 500 kilogrammes, et 3,3 % sont d'autres véhicules (Transports Canada, 2020b). Au Canada en 2019, le transport routier des marchandises utilise le carburant diesel dans près de 62 % des déplacements, et l'essence automobile dans près de 38 % des déplacements (Ressources naturelles Canada). La durée de vie utile d'un

véhicule lourd se situe entre 10 et 12 ans (Gouvernement du Québec - Ministère des Transports, 2018).

Question de recherche

La section ci-dessus présente la composition du secteur du transport de marchandises canadien et fait ressortir une différence dans les proportions entre les tonnes-kilomètres transportées et les GES émis, ainsi que l'énergie consommée par les différents modes de transport. Cette différence dans les proportions introduit la question de recherche de ce mémoire : quels types d'investissements dans les infrastructures sont nécessaires pour subvenir à une demande en transport de marchandises où le transport ferroviaire de marchandises serait davantage utilisé par rapport au transport routier, et quels sont les coûts associés à ces investissements ?

La Figure 2 permet de comparer la répartition des GES émis et des tonnes-kilomètres transportées selon le mode de transport de marchandises en 2019 au Canada.



Source : Tableau 7, 14, 21, 27, 28, 53, 57, 59 (Ressources naturelles Canada)

Note : les pourcentages représentent la répartition de chaque caractéristique analysée par rapport au total du transport de marchandises

Figure 2. Comparaison des émissions de GES, de la consommation d'énergie, et des tonnes-kilomètres de marchandises transportées, 2019

La Figure 2 montre qu'en 2019, les camions lourds émettent 40 % des GES totaux du transport de marchandises, et consomment 40 % de l'énergie totale du transport de marchandises, mais ne transportent que 27 % des tonnes-kilomètres totales. La Figure 2 montre également qu'en 2019, les trains émettent 9 % des GES totaux du transport de marchandises, et consomment 8 % de l'énergie totale du transport de marchandises, et transportent 44 % des tonnes-kilomètres totales. C'est cette inversion des proportions de GES émis et de l'énergie consommée avec les tonnes-kilomètres transportées entre le transport ferroviaire et le transport routier lourd qui conduit à la formulation de la question de recherche. En effet, les tonnes-kilomètres peuvent être utilisées comme mesure de part de marché, ce qui positionne le transport ferroviaire comme mode de transport très utilisé et peu émetteur en comparaison aux autres modes.

De plus, la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*, sanctionnée en 2021, définit la carboneutralité comme la cible nationale en matière d'émissions de gaz à effet de serre pour 2050 (*Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*, 2021). Cette cible de carboneutralité implique par le fait même la décarbonisation du secteur des transports, tel que mentionné dans le *Plan de réduction des émissions pour 2030* (Gouvernement du Canada, 2022). Il est alors intéressant d'étudier la demande en transport de marchandises (mesurée en tonnes ou en volume) à l'horizon 2050, afin d'identifier les défis potentiels liés aux émissions de GES de ce secteur dans un contexte de décarbonisation des transports. Cette analyse nécessite de déterminer le taux de croissance projeté de la demande en transport de marchandises, ainsi que de statuer sur la demande actuelle. L'année 2050 a été choisie, car elle concorde avec les cibles gouvernementales de réduction des émissions de GES, même s'il est entendu que les actions de réduction des émissions de GES vont devoir persister au-delà de l'année 2050. De plus, la cible de 2050 implique une période d'étude de 32 ans qui est similaire à la durée de vie utile des infrastructures ferroviaires.

Demande de transport de marchandises au Canada en 2018

Deux sources canadiennes font état des tonnes de marchandises par mode de transport : Statistique Canada et Transports Canada. Les données les plus récentes concernant le transport routier de marchandises datent de 2018, ce qui constitue l'année de référence

pour tous les modes dans le cadre de ce mémoire. Le Tableau 5 présente un sommaire des tonnes transportées selon le mode en 2018 au Canada en fonction de la source.

Tableau 5. Tonnes transportées selon le mode au Canada, 2018

Mode de transport	Volume (millions de tonnes)	Source	Notes
Routier	754,0	Statistique Canada	Transporteurs pour compte d'autrui et pour compte propre inclus.
Ferroviaire	358,0	Statistique Canada	-
Routier – intérieur	659,3	Transports Canada (2021b)	L'addenda statistique indique que les données concernent les transporteurs pour compte d'autrui seulement, mais la
Routier – international	95,7	Transports Canada (2021b)	source fournie pour ces données fait référence à l'enquête sur l'origine et la destination des marchandises transportées par camion, qui inclut à la fois les transporteurs routiers pour compte d'autrui et pour compte propre.
Routier – TOTAL	755,0	Transports Canada (2021b)	
Ferroviaire – intérieur	188,5	Transports Canada (2021b)	-
Ferroviaire – international	140,0	Transports Canada (2021b)	-
Ferroviaire – TOTAL	328,5	Transports Canada (2021b)	Calculé avec les données du transport intérieur et international.

Les données de Statistique Canada indiquent que le tonnage transporté par les camions et les trains en 2018 totalise 1 112 millions de tonnes. Les données de Transports Canada indiquent que le tonnage transporté par les camions et les trains en 2018 totalise 1 083,5 millions de tonnes. Ceci indique qu'en moyenne, les tonnes transportées par camions sont 2,2 fois supérieures aux tonnes transportées par train en 2018.

Projection de la croissance de la demande pour le transport de marchandises à l'horizon 2050

Il n'existe pas de source canadienne indiquant précisément le taux de croissance projeté du transport de marchandises à l'horizon 2050. Différentes sources ont donc été étudiées afin de comparer les taux de croissance utilisés pour des analyses existantes, telles que présentées au Tableau 6.

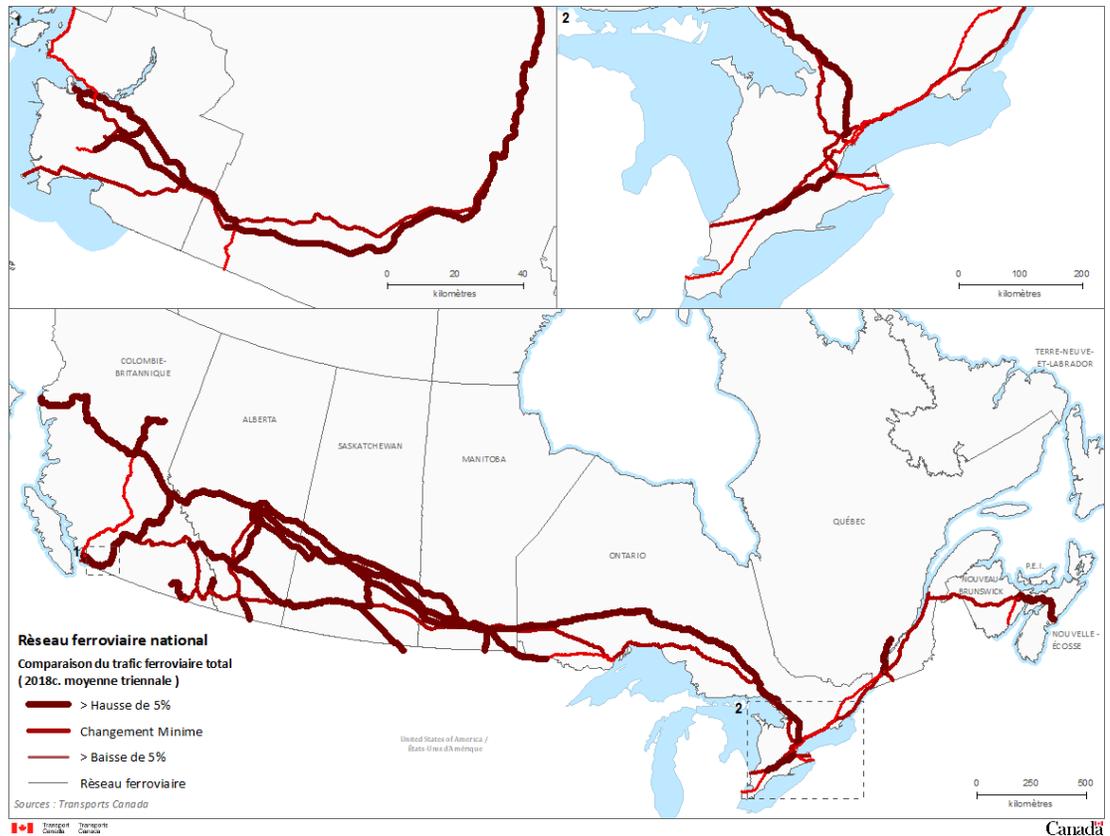
Tableau 6. Taux de croissance du transport de marchandises selon le mode

Mode de transport	Croissance annuelle	Période	Source	Notes
Routier	1,8 %	2008-2026	CPCS (2013)	Croissance annualisée du nombre de <i>déplacements</i> de camions lourds participant au marché québécois. Québec.
Ferroviaire	2,1 %	2008-2026	CPCS (2013)	Croissance annualisée du nombre de <i>tonnes-kilomètres</i> sur le réseau à l'étude. Québec.
Ferroviaire	2,13 %	2005-2035	Cambridge Systematics (2007)	Estimé par le U.S. DOT, <i>tonnage</i> . États-Unis.
Tous	1,1 %	2017-2050	U.S. Department of Transportation (2022)	Données pour le transport de marchandises en général, <i>tonnage</i> . États-Unis.
Tous	1,8 %	2020-2025		
Tous	1,1 %	2025-2030		
Tous	1,1 % à 1,5 %	2030-2050		
Taux de croissance passés				
Ferroviaire	0,15 %	2004-2018	Statistique Canada	Calculé avec les données, <i>tonnage</i> . Canada.
Routier	2,29 %	2004-2018	Statistique Canada	Calculé avec les données, <i>tonnage</i> . Canada.
Ferroviaire	3,4 %	1999-2010	CPCS (2013)	Croissance des moyennes mobiles sur

Mode de transport	Croissance annuelle	Période	Source	Notes
				12 mois des <i>tonnages</i> totaux. Québec.
Ferroviaire	1,1 %	1999-2011	CPCS (2013)	Croissance du <i>tonnage</i> des marchandises en vrac mensuel moyen. Québec.
Ferroviaire	30,5 %	1999-2011	CPCS (2013)	Croissance du <i>volume</i> intermodal mensuel moyen. Québec.

L'étude de ces sources a mené au choix d'un taux de croissance annuel de 1 % pour le transport de marchandises par camions et par trains à l'horizon 2050, correspondant à une augmentation totale de 37 % entre 2018 et 2050. Ce taux de croissance est jugé conservateur en comparaison aux taux présentés au Tableau 6. De plus, la *Federal Highway Administration* prédit que la totalité des expéditions (mesurées en tonnes) va faire face à une croissance de 30 % entre 2020 et 2040, ce qui est aligné avec les hypothèses de ce mémoire (Association of American Railroads, 2023).

La Figure 3 présente le réseau ferroviaire national et compare le trafic ferroviaire total en 2018 à la moyenne des trois années précédentes.

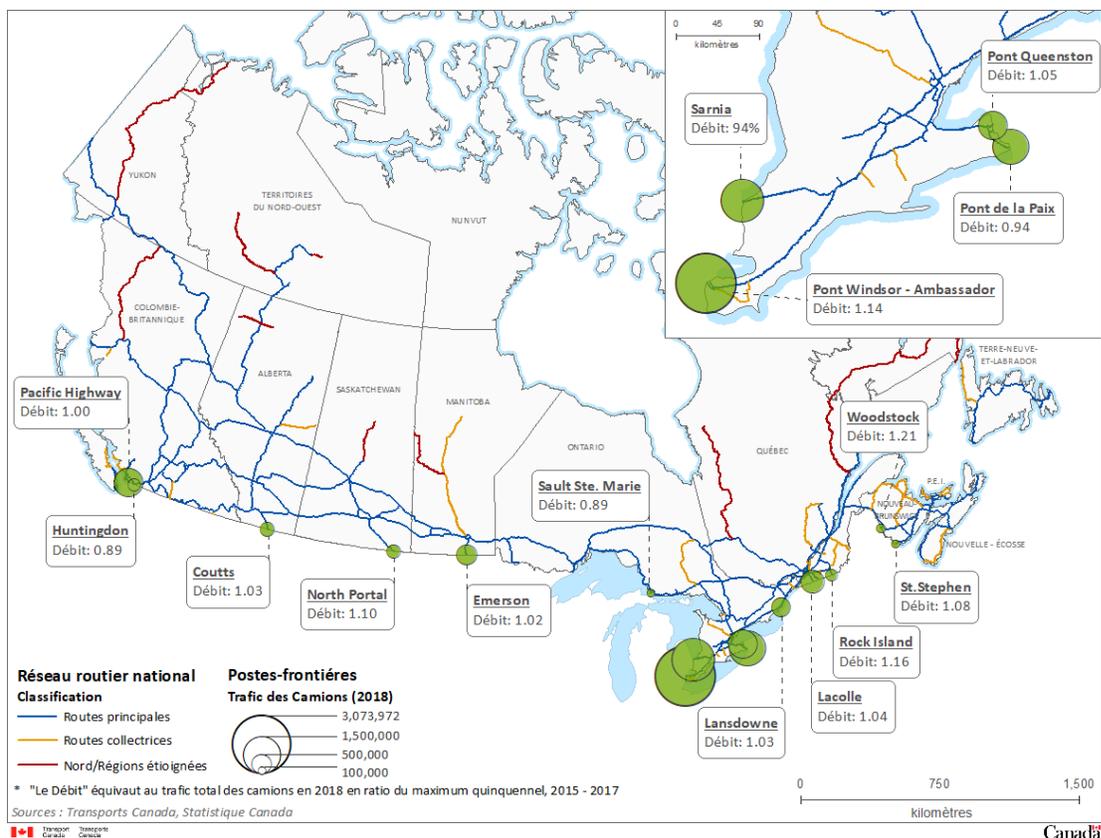


Source : Transports Canada (2019)

Figure 3. Carte du réseau ferroviaire canadien, comparaison du trafic total en 2018 versus la moyenne des trois années précédentes

La Figure 3 permet de visualiser le taux de croissance « naturel » du trafic sur le réseau ferroviaire en 2018, et une grande partie du réseau a vu une croissance de plus de 5 % en comparaison à la moyenne des trois années précédentes. Il faut noter que cette carte n’inclut pas les unités utilisées pour estimer le trafic ferroviaire. Il est possible que les unités utilisées soient des tonnes, des tonnes-kilomètres, des wagons ou des trains, ce qui n’impliquerait pas les mêmes conclusions.

La Figure 4 présente le réseau routier national du Canada et 15 postes frontaliers majeurs utilisés par les camions de marchandises.



Source : Transports Canada (2019)

Figure 4. Carte du réseau routier national et flux de trafic aux postes frontaliers, 2018

Les débits indiqués à la Figure 4 permettent de constater que 11 des 15 postes frontaliers ont observé des trafics bidirectionnels de camions supérieurs à ceux des trois années précédentes. Bien que la Figure 3 et la Figure 4 n'indiquent pas le trafic total annuel sur les réseaux de transport, les cartes servent d'indication des tendances d'utilisation des réseaux en 2018 en comparaison aux trois années précédentes.

Scénario étudié

Sur la base de la prémisse que la demande en transport de marchandises va augmenter de 37 % entre 2018 et 2050, et que les émissions de GES doivent considérablement baisser durant la même période, ce mémoire étudie une situation hypothétique de réallocation des modes de transport de marchandises. Afin de comparer les coûts et la consommation énergétique du transport routier et ferroviaire sur une base équivalente, ce mémoire considère le cas général suivant qui compare les deux modes de transport à l'étude :

- Transport ferroviaire : des kilomètres de voies et des sites de transbordement doivent être ajoutés, des locomotives et des wagons doivent également être ajoutés;
- Transport routier : des kilomètres d'autoroutes doivent être ajoutés, des camions doivent également être ajoutés.

Ensuite, les coûts d'investissement pour chaque mode peuvent être comparés aux coûts d'opération et à la consommation énergétique reliée, afin de déterminer dans quelle mesure chaque type d'investissement est intéressant d'un point de vue économique et énergétique. Pour cela, seuls les coûts associés aux investissements supplémentaires et à la demande supplémentaire en transport de marchandises sont étudiés. Les coûts liés au transport des tonnes déjà transportées en 2018 (358 millions de tonnes pour le transport ferroviaire et 755 millions de tonnes pour le transport routier) ne sont donc pas inclus dans ce mémoire.

Cette approche constitue une alternative à l'étude d'un scénario « idéal » qui analyserait le transfert modal direct du routier vers le ferroviaire, en étudiant le transfert des tonnes transportées par camions lourds (qui sont le type de camions qui fournissent le service le plus semblable au ferroviaire) au train. Cela permettrait de comparer les gains énergétiques de ce transfert aux coûts d'infrastructure requis pour supporter la demande supplémentaire. Cependant, cette étude nécessiterait notamment des données concernant les tonnes transportées selon le type de camion (léger, moyen ou lourd) qui sont actuellement indisponibles au niveau canadien. En effet, le transfert modal cible le transport routier de longue distance, puisque le transport ferroviaire, tout comme le transport routier lourd, est rarement utilisé pour le transport des derniers kilomètres (« *last-mile delivery* ») (Kaack *et al.*, 2018). De plus, le transport de marchandises sur les derniers kilomètres est comparativement plus facile à décarboner, notamment par l'utilisation de plus petits véhicules à faibles émissions de GES, par exemple des camions électriques (Kaack *et al.*, 2018). Ce mémoire vise donc à documenter les impacts de l'utilisation distincte de chaque mode, en estimant les gains énergétiques, les économies et les coûts associés, et le niveau d'investissement requis.

Chapitre 2

Revue de la littérature

L'étude du transfert modal est motivée par le potentiel de réduction d'émissions de GES et d'autres polluants atmosphériques documenté dans la littérature. Alors que de nombreux articles étudient le potentiel des alternatives à faibles émissions de GES pour le transport routier de marchandises (camions électriques à batteries, camions à pile combustible à hydrogène, camions à caténaires), ce mémoire se penche sur le potentiel énergétique de la hausse de l'utilisation du transport ferroviaire comme alternative au transport routier pour le transport de marchandises au Canada. Les coûts et les impacts économiques associés à la modification de la part modale des transports routiers et ferroviaires sont estimés dans le but d'évaluer l'intérêt (ou la valeur) et la faisabilité d'un tel transfert modal au Canada.

L'interrelation économie-transports-émissions

Le secteur des transports de marchandises est étroitement lié à la croissance économique, et le gouvernement du Canada stipule même que « le transport favorise la croissance économique » (Transports Canada, 2020a). Entre 2015 et 2019 au Canada, le taux de croissance annuel composé (TCAC) du PIB dans le secteur des transports a dépassé celui de l'ensemble de l'économie, s'élevant à 3,4 % contre 2,0 % (Transports Canada, 2020a). Cependant, en 2019, l'industrie du transport et de l'entreposage ne représente que 4,5 % du PIB, mais soutient de nombreuses industries connexes, telles que le secteur manufacturier et les industries de gros et de détail (Transports Canada, 2020a). Cette croissance du secteur des transports devient toutefois problématique lorsque l'évolution des émissions de GES s'y rattachant est analysée. Entre 1990 et 2021, les émissions du secteur des transports³ ont augmenté de 29 %, et entre 2005 et 2021, ces émissions ont baissé de 2 %, correspondant respectivement à une augmentation de 42 Mt d'éq. CO₂ et à une baisse de 3 Mt d'éq. CO₂ (Environnement et Changement climatique Canada, 2023). Cependant, entre 1990 et 2021, les émissions de GES totales du Canada ont augmenté de

³ Secteur du GIEC.

13,7 %, correspondant à 81 Mt d'éq. CO₂, et entre 2005 et 2021, les émissions de GES totales du Canada ont diminué de 8,4 %, correspondant à 62 Mt d'éq. CO₂ (Environnement et Changement climatique Canada, 2023). Il faut noter que la baisse des émissions de GES en transport entre 2005 et 2021 est essentiellement liée à la baisse de l'activité économique causée par la pandémie de COVID-19, et non pas à des changements structurels. Chapman (2007) étudie la relation entre la croissance économique, le transport de marchandises et les émissions de GES et souligne que le transport de marchandises est l'un des secteurs dont les émissions de GES continuent de croître. Il explique que les camions démontrent le taux de croissance le plus élevé parmi les différents modes de transport de marchandises globalement, en plus d'être le mode le plus utilisé. Chapman (2007) présente le transfert modal vers le ferroviaire et le maritime comme une solution logique au transport de marchandises de longue distance, tout en soulignant le caractère initialement coûteux du transport ferroviaire, notamment causé par les investissements requis.

Bien que le transport de passagers soit également un sous-secteur émetteur de GES au Canada, ce mémoire se concentre sur le transport de marchandises. Cette décision repose sur la croissance des émissions de GES du secteur du transport de marchandises⁴ qui a augmenté de 61,3 % entre 1990 et 2021, et de 4,2 % entre 2005 et 2021 alors que les émissions de GES du transport de passagers ont augmenté de 7,5 % entre 1990 et 2021 et a baissé de 9,5 % entre 2005 et 2021 (Environnement et Changement climatique Canada, 2023). Comme indiqué précédemment, l'activité du transport de marchandises au Canada en 2019, mesurée en tonnes-kilomètres, est majoritairement effectuée par transport ferroviaire (44 % du total, une augmentation de 40 % depuis 2000), suivi du transport routier (36 % du total, une augmentation de 53 % depuis 2000) (Ressources naturelles Canada). Cependant, la majorité des émissions de GES du transport de marchandises sont attribuables au transport routier (84 % du total, une augmentation de 44 % depuis 2000), suivi par le transport ferroviaire (9 % du total, une augmentation de 18 % depuis 2000) (Ressources naturelles Canada). Eom, Schipper et Thompson (2012) analysent les tendances en matière d'émissions de CO₂ du transport de marchandises dans 11 pays de

⁴ Secteur économique canadien.

l'Agence internationale de l'énergie (AIE) entre 1970 et 2010. Ils expliquent que le Canada est un des pays analysés où la part du transport routier de marchandises est la plus faible, notamment attribuable à l'étendue géographique du pays qui requiert des distances de transport importantes pour acheminer les biens. Toutefois, le Canada fait également partie des pays analysés où la part du transport routier dans l'activité totale de transport de marchandises a considérablement augmenté entre 1990 et 2010 (Eom *et al.*, 2012). Les auteurs mentionnent qu'il n'y a pas d'indication de découplage majeur entre le PIB et l'activité du transport routier dans les pays étudiés. Le Canada fait partie des pays où l'intensité du transport routier (mesurée en tonnes-km de camionnage par 1 000 \$ de PIB, PPP) a augmenté entre 1990 et 2010, en réponse à la demande croissante pour le transport de marchandises (Eom *et al.*, 2012). Les auteurs expliquent que cette tendance peut s'expliquer par une évolution de la structure économique de ces pays, où la croissance du transport ferroviaire et maritime n'a pas été aussi rapide que celle du transport routier (Eom *et al.*, 2012). Ils concluent que dans les pays développés étudiés, le transfert modal du transport routier vers le transport ferroviaire représente une importante opportunité pour réduire les émissions de CO₂, bien que l'ampleur de cette opportunité varie considérablement d'un pays à l'autre. En effet, les réductions potentielles d'émissions de CO₂ résultant du transfert modal dépendent principalement de deux facteurs : l'intensité énergétique relative entre le transport ferroviaire de marchandises et le transport routier, ainsi que le coefficient de carbone relatif du carburant utilisé pour chaque mode de transport (Eom *et al.*, 2012). Cependant, le transport ferroviaire au Canada utilise le diesel comme carburant, ne permettant pas au transfert modal de bénéficier du coefficient de carbone relatif du carburant entre le ferroviaire et le routier, puisque les deux modes utilisent le même carburant. Il est cependant possible de penser que la plus faible intensité énergétique du train faciliterait le passage à des énergies non-émettrices, ce qui permettrait plus facilement de faire baisser le coefficient de carbone des carburants ferroviaires. Cette question n'est pas traitée dans ce mémoire.

Un défi qui apparaît dans la promotion du transfert modal au Canada réside dans l'utilisation actuelle du transport ferroviaire de marchandises, qui notamment lorsque comparé à l'Union européenne, présente une part modale élevée. Wiegmans *et al.* (2018) comparent l'efficacité des réseaux de transport de marchandises routiers et ferroviaires du

Canada, des États-Unis et de pays membres de l'Union européenne. Ils expliquent que l'efficacité du camionnage au Canada et aux États-Unis est plus élevée qu'en Europe en raison des plus gros camions qui sont autorisés à circuler, tandis que la pression environnementale sur le camionnage est plus élevée en Europe. Cependant, les distances entre les centres de population sont plus grandes en Amérique du Nord, ce qui donne également un avantage au transport ferroviaire. Les trains sont plus longs en Amérique du Nord, les wagons sont plus grands et les trains de conteneurs peuvent être empilés deux fois, ce qui rend le transport ferroviaire plus efficace.

Opportunité pour le transfert modal du routier vers le ferroviaire

La raison principale de l'étude du transfert modal provient du potentiel de réduction des émissions de GES documenté dans la littérature, découlant de la différence des intensités énergétiques entre les modes de transport (Kaack *et al.*, 2018). En guise de rappel, au Canada en 2019, le transport de marchandises présente une intensité énergétique de 1,18 MJ/Tkm (Ressources naturelles Canada). Au sein du transport des marchandises, le transport ferroviaire présente la plus faible intensité énergétique, soit 0,21 MJ/Tkm, alors que le transport routier présente une intensité énergétique de 2,80 MJ/Tkm, et le transport routier lourd une intensité de 1,74 MJ/Tkm (Ressources naturelles Canada). Kaack *et al.* (2018) concluent que le transfert modal a le potentiel de réduire les émissions de GES, mais la magnitude de cette réduction et les coûts associés ne sont pas répertoriés dans la littérature qu'ils étudient. Ils soulignent que dans la plupart des cas, seulement une section du transport des marchandises peut être transférée vers un autre mode, engendrant des expéditions multimodales (Kaack *et al.*, 2018). Ainsi, les émissions de GES des expéditions dépendent de la proportion du transport transféré à un autre mode, et varient selon l'origine et la destination ainsi que selon la proximité des terminaux intermodaux⁵ (Kaack *et al.*, 2018).

De nombreux articles (tels que Heinold et Meisel (2018), Hwang et Ouyang (2014) et Palmer *et al.* (2018)) évaluent le potentiel environnemental de l'utilisation du transport

⁵ Le transport intermodal désigne le transport d'un produit dans une seule unité, tel un conteneur, sans être déballé (Kaack *et al.*, 2018).

ferroviaire plutôt que du transport routier pour le transport de marchandises par l'estimation de modèles de demande spécifiques. Par exemple, Craig, Blanco et Sheffi (2013) analysent des données réelles en Amérique du Nord afin de calculer l'intensité en CO₂ d'expéditions intermodales afin de les comparer avec des estimations de transports identiques effectués par camions uniquement. Craig *et al.* (2013) estiment que l'intensité en GES moyenne du transport intermodal est de 67g CO₂/tonne-mile, soit 46 % plus faible que le transport routier. Ils soulignent que l'intensité en GES réelle des expéditions intermodales varie entre 29 et 220 g CO₂/tonne-mile dépendamment du corridor considéré. Cette variation est expliquée par le fait que les expéditions intermodales sont plus efficaces que les expéditions routières seulement dans une zone spécifique autour des terminaux intermodaux.

Facteurs influençant le choix modal

Les caractéristiques intrinsèques des modes de transport étudiés contribuent au profil de l'industrie du transport de marchandises, et expliquent en partie pourquoi aucun transfert modal naturel du routier vers le rail n'a été observé dans les dernières années. Pinto *et al.* (2018) présentent les caractéristiques qui font des camions le mode de transport le plus utilisé : portée, flexibilité, vitesse, faibles coûts, faibles investissements requis, puisque ceux-ci sont considérés comme acquis contrairement au rail. Ils présentent aussi les désavantages liés à l'utilisation du transport routier de marchandises : susceptibilité au trafic dans les centres urbains, accidents, capacité de chargement limitée, émissions élevées de gaz associés aux changements climatiques (Pinto *et al.*, 2018). Les avantages du rail proviennent de la capacité à transporter de grandes quantités de matériaux sur de longues distances, permettant d'éviter la majorité des problèmes reliés à la météo et à la congestion, mais en étant moins flexibles que les camions. Le transport ferroviaire nécessite cependant des coûts élevés d'investissement et d'entretien (Pinto *et al.*, 2018). Dès lors, c'est la fiabilité et la faible consommation de carburant par tonne transportée des trains qui les positionnent comme alternative aux modes de transport générant comparativement plus d'émissions atmosphériques (Pinto *et al.*, 2018). Toutefois, Pinto *et al.* (2018) soulignent que le manque d'infrastructures ferroviaires et les coûts d'investissement élevés constituent le frein principal à la faisabilité d'une transition du

transport de marchandises routier vers le ferroviaire. Les expéditeurs tiennent compte de ces caractéristiques lorsqu'ils choisissent leur mode de transport, ainsi que d'autres facteurs tels que les caractéristiques des marchandises, le coût de transport, l'accès au mode de transport, et les impacts environnementaux (Kaack *et al.*, 2018).

Faisabilité du transfert modal dans le contexte nord-américain

La faisabilité d'un transfert modal au sein du réseau de transports canadien dans son état actuel est limitée en raison de contraintes de capacité et financières. Pinto *et al.* (2018) expliquent que la faisabilité d'un transfert modal complet globalement est impactée par le manque d'infrastructures ferroviaires et les coûts d'investissement élevés. Larson (2013) reconnaît l'opportunité pour le rail de capturer une partie de la part de marché du camionnage, mais rappelle les barrières causées par le manque de capacité du réseau ferroviaire nord-américain et l'absence de service de qualité dans certains cas.

La mise en œuvre d'un transfert modal du routier vers le ferroviaire nécessite des infrastructures ferroviaires accessibles et disponibles, combinées à des conditions de marché favorables. L'évolution de l'industrie ferroviaire en Amérique du Nord au cours du 20^e siècle a conduit à une consolidation et un resserrement du marché, ce qui rend subséquentement difficile l'entrée de nouveaux acteurs. Historiquement, les compagnies ferroviaires ont misé sur l'efficacité du réseau, en procédant notamment à l'abandon progressif des lignes non rentables. Cette optimisation du réseau a mené à la présence de monopoles ferroviaires régionaux, qui constitue une barrière au transfert modal en raison de la faible connectivité entre les différents segments ferroviaires des expéditions longue distance (Kaack *et al.*, 2018). Aux États-Unis (et semblablement au Canada), les opérateurs ferroviaires détiennent les voies ferrées, et ont la capacité de bloquer les nouveaux entrants en facturant des frais d'accès élevés aux voies, contrôlant partiellement la croissance du trafic ferroviaire (Kaack *et al.*, 2018).

D'après Tong *et al.* (2021), la congestion au sein des corridors ferroviaires principaux et l'accès limité aux infrastructures spécialisées et coûteuses ont exacerbé la compétition entre le rail et le transport routier de longue distance, qui bénéficie d'une plus grande vitesse et flexibilité. Néanmoins, des projets de lignes ferroviaires réservées aux passagers

(par exemple, le corridor Windsor-Québec) pourraient libérer davantage de capacité ferroviaire pour le transport de marchandises, comme le soulignent Ramani *et al.* (2019). Toutefois, ces auteurs insistent sur l'importance d'évaluer la faisabilité d'un transfert modal en tenant compte des conditions du marché existantes. En effet, la disponibilité d'infrastructures adéquates est cruciale pour la réussite d'une telle transition, bien qu'elles soient généralement indisponibles dans les zones urbaines où les réductions de polluants atmosphériques seraient les plus bénéfiques (Ramani *et al.*, 2019).

Estimation des coûts de transport appliqué au transfert modal

Bien que la littérature indique que le transfert modal peut entraîner des avantages énergétiques, il est pertinent d'examiner les coûts et les bénéfices financiers d'un tel transfert dans le but d'évaluer la faisabilité de sa mise en œuvre. Le coût total du transport de marchandises comprend à la fois des coûts internes et externes. Les coûts internes, tels que définis par Janic (2007) et Forkenbrock (1999), comprennent les coûts opérationnels privés encourus par les opérateurs de transport, qui sont des coûts directement encourus par les transporteurs. Izadi, Nabipour et Titidezh (2019) proposent une autre subdivision pour les coûts totaux du transport, comprenant les coûts d'opération (coûts fixes et variables), la valeur du temps (temps de déplacement et qualité du service), et coûts externes (environnementaux, congestion et accidents). Les coûts externes du transport de marchandises représentent les coûts des impacts sur la société et l'environnement. Forkenbrock (1999) définit les coûts externes comme les coûts qui comprennent les accidents, les émissions, le bruit ainsi que les coûts non récupérés associés à la fourniture, l'exploitation et la maintenance des infrastructures publiques. Janic (2007) et Izadi *et al.* (2019) incluent également la congestion comme un coût externe, qui est omise par Forkenbrock (1999) puisqu'il étudie uniquement le transport interurbain qui est considéré comme exempt de congestion.

La littérature fournit plusieurs approches pour l'estimation des coûts totaux du transport des marchandises. Janic (2007), Pinto *et al.* (2018), Hanssen, Mathisen et Jørgensen (2012) procèdent à la création de modèles de coûts appliqués à des réseaux spécifiques. Janic (2007) développe un modèle de calcul des coûts totaux d'un réseau donné de transport intermodal et de son équivalent routier et l'applique à un réseau en Europe. Pinto

et al. (2018) estiment les coûts de transport facturés à un opérateur logistique tiers pour déterminer la différence de coûts entre le transport routier et intermodal, afin de déterminer si celle-ci pourrait justifier le transfert modal, dans le cadre d'une étude de cas appliquée à l'industrie des pâtes et papiers au Brésil. Hanssen *et al.* (2012) construisent un modèle de coûts généralisés du transport intermodal de marchandises et présentent une relation entre les coûts généralisés de transport et la distance de transport routier ou intermodal appliqué à une étude de cas en Norvège. Puisque ce mémoire n'utilise pas des données relatives à des déplacements individuels de marchandises, ce type de modèles sort du présent cadre d'analyse. Néanmoins, ces articles comprennent plusieurs éléments pertinents à ce mémoire, concernant des éléments de coûts à considérer. Janic (2007) et Izadi *et al.* (2019) incluent explicitement la valeur du temps de transport dans leurs analyses, et Janic (2007) détermine un coût unitaire du temps par unité de transport de 6 mètres et 14,3 tonnes, estimé à 0,028 € h-tonne. Hanssen *et al.* (2012) portent une attention particulière aux coûts de pré et postacheminement et de transbordement aux terminaux intermodaux. Ils expliquent que les coûts de transbordement des conteneurs dans les terminaux sont supportés, quelle que soit la distance sur laquelle les conteneurs sont transportés, et que la compétitivité du transport intermodal dépend du coût des activités de pré et postacheminement, qui représente de 25 à 40 % des coûts totaux de déplacement des unités intermodales (Hanssen *et al.*, 2012). Pinto *et al.* (2018) étudient la différence de coûts entre les opérations intermodales et routières afin d'évaluer si cet écart justifie le transfert modal. Ils soulignent la relation inverse entre les tarifs du transport de marchandises et la consommation de carburant, et combinent ceci avec les émissions de gaz polluants afin de déterminer les quantités d'émissions causées par chaque dollar dépensé en transport de marchandises (Pinto *et al.*, 2018). Leurs calculs leur permettent de conclure que chaque dollar dépensé pour le transport de marchandises avec le mode routier génère 15,40 mg d'émissions, contre 14,83 mg d'émissions pour le mode intermodal routier-rail (Pinto *et al.*, 2018).

Les articles de Forkenbrock (1999) et Forkenbrock (2001) incluent une méthodologie détaillée du calcul des coûts externes et privés du transport de marchandises routier et ferroviaire, fournissant des valeurs de coûts de référence pour ce mémoire. Forkenbrock (1999) estime les coûts privés du transport routier de marchandises avec des données

agrégées de l'*American Trucking Association (ATA)* afin de les comparer aux coûts externes de transport. Le Tableau 7 présente les résultats de l'analyse des coûts privés du transport de marchandises routier tels que présentés dans Forkenbrock (1999).

Tableau 7. Résultats de Forkenbrock (1999), coûts du transport de marchandises routier

Élément	Coût (US cent par tonne-mile)
Coûts privés	8,42
Coûts externes :	0,72
<i>Accidents</i>	<i>0,59</i>
<i>Pollution atmosphérique</i>	<i>0,08</i>
<i>Émissions de CO₂</i>	<i>0,15</i>
<i>Pollution sonore</i>	<i>0,04</i>
Total	9,14

Source : Forkenbrock (1999)

Forkenbrock (1999) considère également le coût des externalités liées aux subsides gouvernementaux provenant de l'usure des routes supplémentaire à l'usure naturelle sans le passage du camion de marchandises. Un subside implicite apparaît si les frais d'utilisation de la route payés par l'utilisateur sont inférieurs au coût occasionné par son passage (Forkenbrock, 1999). Dépendamment du mode de financement des infrastructures utilisées, la subvention peut provenir d'un transfert de la société ou du gouvernement (Forkenbrock, 1999). Forkenbrock (1999) estime que les camions paient 0,25 cent de moins par tonne-mile pour les coûts non récupérés liés aux activités d'opération et d'entretien des infrastructures telles que le pavage des routes, la réparation et la construction des ponts (Forkenbrock, 1999). La totalité des coûts externes et des charges sous-payées s'élève donc à 1,11 cent par tonne-mile, impliquant une augmentation des coûts de transport routier de marchandises de 13,2 % pour que les externalités et les subsides soient internalisés (Forkenbrock, 1999).

Forkenbrock (2001) estime les coûts externes du transport ferroviaire de marchandises, les compare aux coûts privés de transport, et les compare ensuite aux résultats obtenus par Forkenbrock (1999). Afin d'estimer les coûts privés de transport, Forkenbrock (2001) utilise une fonction de demande translog avec quatre intrants (main-d'œuvre, matériaux, carburant et autres), et ne considère pas les chemins de fer locaux ni les activités de

drayage, afin d'étudier un transport comparable au transport routier. Le Tableau 8 présente les résultats de l'analyse des coûts privés du transport de marchandises routier tels que présentés dans Forkenbrock (2001).

Tableau 8. Résultats de Forkenbrock (2001), coûts du transport de marchandises ferroviaire

Élément	Coût (US cent par tonne-mile)
Coûts privés	1,53
Coûts externes	0,25
<i>Accidents</i>	<i>0,17</i>
<i>Pollution atmosphérique</i>	<i>0,02</i>
<i>Émissions de CO₂</i>	<i>0,02</i>
<i>Pollution sonore</i>	<i>0,04</i>
Total	1,78

Source : Forkenbrock (2001)

Dans l'ensemble, les coûts externes du transport ferroviaire s'élèvent à 0,25 cent par tonne-mile, soit moins du quart des coûts externes du transport routier.

Janic (2007), Forkenbrock (1999), Forkenbrock (2001), Pinto *et al.* (2018) et Hanssen *et al.* (2012) omettent le calcul des coûts d'investissement reliés aux infrastructures dans leurs estimations. Ceci n'est pas le cas dans ce mémoire, puisque le scénario étudié nécessite des infrastructures supplémentaires pour subvenir à l'augmentation de la demande en transport projetée. Janic (2007) considère que l'infrastructure du réseau intermodal est déjà en place et n'inclut pas les coûts d'investissement d'infrastructure supplémentaire ou de matériel roulant additionnel. Forkenbrock (1999) (et Forkenbrock (2001)) considère uniquement les coûts d'exploitation dans sa comparaison, car ceux-ci sont liés à la quantité de services fournis et aux opérations quotidiennes, comme les coûts externes. Pinto *et al.* (2018) ne considèrent pas les coûts d'investissement puisqu'ils basent leur estimation des coûts sur les frais associés à la facturation des coûts de transport facturés à un opérateur logistique tiers. Hanssen *et al.* (2012) estiment les coûts généralisés du transport, qui n'incluent pas les coûts d'investissement.

Dès lors, les articles présentés qui étudient à la fois les bénéfices énergétiques du transfert modal et les coûts associés ne considèrent pas les coûts d'investissement associés à cette modification structurelle du réseau de transport. Cependant, il est attendu que les coûts d'investissement représentent une fraction significative des coûts totaux de transport, et qu'ils puissent devenir par conséquent une barrière au changement de mode de transport. Dans le cadre du scénario étudié dans ce mémoire, la majorité des coûts d'investissement à considérer proviennent des coûts reliés à la construction ou l'augmentation de capacité d'infrastructures ferroviaires et intermodales. Le rapport de Baumgartner (2001) offre une liste exhaustive de l'entièreté des éléments de coûts à considérer lors de l'estimation des coûts d'investissement reliés aux infrastructures ferroviaires, et peut servir de référence pour les estimations obtenues dans ce mémoire. Baumgartner (2001) présente des estimations pour les coûts totaux du transport ferroviaire, dans le but de fournir des références et des ordres de grandeur. Les coûts incluent des informations sur les investissements, la durée de vie et les coûts d'entretien et sont subdivisés entre les coûts reliés aux infrastructures et à l'équipement fixe, les coûts des véhicules, et les coûts de la consommation de carburant (Baumgartner, 2001).

Le rapport de Cambridge Systematics (2007), préparé pour l'*Association of American Railroads*, étudie les besoins d'augmentation de la capacité ferroviaire aux États-Unis en lien avec les projections de demande pour le transport ferroviaire de marchandises du *U.S. Department of Transportation (U.S. DOT)* à l'horizon 2035. Le *U.S. DOT* prévoit une augmentation de la demande pour le transport ferroviaire de marchandises de 88 % entre 2007 et 2035, et Cambridge Systematics (2007) a pour objectif d'identifier les améliorations et investissements nécessaires dans l'infrastructure ferroviaire pour répondre à la demande prévue sur les corridors ferroviaires principaux. Pour cela, les coûts reliés à l'entretien et à l'opération des nouvelles lignes ferroviaires, à l'acquisition de locomotives et de wagons supplémentaires, et à l'entretien, à l'opération et au remplacement des lignes ferroviaires, ne sont pas inclus dans les calculs (Cambridge Systematics, 2007). Les infrastructures considérées dans les estimations de Cambridge Systematics (2007) incluent les expansions de lignes (amélioration des voies principales et secondaires, des ponts et tunnels importants pour accommoder les wagons plus lourds),

et les expansions des installations (terminaux de chargement, des gares intermodales et des installations de service et de soutien pour améliorer les capacités de transport).

Dans un premier temps, Cambridge Systematics (2007) présente les volumes transportés et la capacité ferroviaire en 2007 aux États-Unis, et estime les volumes et la capacité future (2035). Ensuite, le rapport estime les améliorations de la capacité ferroviaire nécessaire pour subvenir à la demande projetée, et identifie ensuite le coût des investissements requis pour ces améliorations. L'estimation des volumes ferroviaires et de la capacité du réseau en 2007 est détaillée en fonction du corridor ferroviaire étudié, et permet d'identifier les corridors précis faisant face à des contraintes de capacité. L'estimation des volumes ferroviaires et de la capacité future par Cambridge Systematics (2007) utilise les prédictions du *U.S. DOT* pour développer des taux de croissance de transport selon le type de transport ferroviaire (transport d'automobiles, vrac, intermodal, et autres), et compare les volumes projetés par tronçon à la capacité des tronçons en 2035. L'estimation de la capacité ferroviaire selon le tronçon sort du cadre d'analyse de ce mémoire, et la croissance de la demande considérée ne désigne pas des corridors ferroviaires particuliers. Il est donc attendu que les projections de demande en transport de ce mémoire soient moins précises que celles présentées par Cambridge Systematics (2007). Ensuite, Cambridge Systematics (2007) détermine les investissements requis pour subvenir à la croissance de la demande projetée, dont les coûts sont estimés à 148 milliards \$ (dollars américains de 2007). Le rapport détaille les coûts d'investissement selon le type d'infrastructure, et fournit les coûts de construction moyens par mile pour chaque type d'amélioration (d'un type de capacité à un autre). À titre d'exemple, le coût moyen par mile de passer d'un corridor à une voie vers un corridor double voie s'élève à 3 800 000 \$, et inclut les coûts de conception, d'ingénierie et les dépenses en lien avec les installations (Cambridge Systematics, 2007). Cambridge Systematics (2007) estime également que des économies proviennent d'amélioration de la productivité liée à la recherche et au développement des technologies ferroviaires, et évalue ces gains de productivité à 0,5 % par année, réduisant la demande projetée en 2035 de 13 %. Finalement, le rapport estime que les compagnies ferroviaires de classe 1 vont investir cumulativement 70 milliards \$ entre 2007 et 2035, étant donné les investissements effectués par les compagnies depuis 1980 et si les projections de croissances de la

demande sont accompagnées d'une croissance identique au niveau des investissements. De plus, les gains de productivité estimés ont le potentiel d'engendrer des économies de 26 milliards \$, ce qui signifie qu'il manquerait 39 milliards \$ (ou 1,4 milliard par année sur 28 ans), qui pourraient notamment provenir d'incitatifs fiscaux ou de partenariats publics-privés (Cambridge Systematics, 2007).

La méthodologie présentée par Cambridge Systematics (2007) n'est pas directement transférable à ce mémoire, puisqu'elle n'inclut pas de détails de calculs des coûts spécifiques pour des raisons de confidentialité exigées par les compagnies ferroviaires. Cependant, ce mémoire a pour objectif de déterminer les coûts d'investissement requis pour augmenter la capacité du réseau de transport ferroviaire, et de comparer cet investissement avec une augmentation équivalente en termes de capacité pour le réseau autoroutier.

Le mémoire de maîtrise de von Brown (2011) a pour objectif de développer une méthodologie d'estimation du coût par mile de la construction de chemin de fer aux États-Unis. L'auteur admet les incertitudes entourant l'estimation des coûts d'investissements ferroviaires, étant donné la rareté des constructions de nouveaux projets au fil des années. Les estimations de von Brown (2011) découlent des projections d'augmentation de la demande pour le transport ferroviaire de marchandises présentées par Cambridge Systematics (2007). von Brown (2011) souligne qu'avant de construire de nouvelles lignes ferroviaires, il existe des améliorations de la capacité du réseau ferroviaire qui peuvent être effectuées : communication et signalisation, capacité des wagons, électrification, structures (ponts, tunnels), installations et équipements, freins pneumatiques à commande électronique, amélioration des systèmes de contrôle, réalignement des rails. Le calcul des coûts est subdivisé en cinq composantes de construction : droit de passage sur lequel la voie ferrée est construite, conception et construction de la voie ferrée, matières premières et produits finis nécessaires, systèmes de contrôle des trains et de communication (von Brown, 2011). De plus, les paramètres de conception des chemins de fer varient selon la vitesse de conception, la géographie du terrain, l'utilisation du territoire, le nombre de voies et la puissance motrice (von Brown, 2011). L'auteur n'inclut pas les coûts liés à la maintenance, au contrôle, les dépenses

pour les stations ou le matériel roulant, car ces dépenses dépendent principalement de la fréquentation prévue des corridors, une analyse distincte de l'estimation des coûts ferroviaires. À titre d'exemple, les estimations de von Brown (2011) indiquent que les coûts de construction d'une ligne ferroviaire à une voie sur un terrain plat en banlieue, roulant à une vitesse moyenne de 79 mph, s'élèvent à 4 321 223 \$ par mile (2,68 millions \$ par kilomètre). Cependant, l'auteur explique qu'il est plus intéressant d'étudier le coût d'améliorer les corridors ferroviaires plutôt que le coût de construction de nouvelles lignes, puisque la construction de nouvelles lignes est plus coûteuse et engendre une plus grande empreinte territoriale. En effet, les coûts d'amélioration d'une ligne ferroviaire pour une voie sur un terrain plat en banlieue, roulant à une vitesse moyenne de 79 mph, s'élèvent à 1 627 763 \$ par mile ou 1,01 million \$ par km (von Brown, 2011).

Contrairement aux projets de construction ferroviaire, la construction et la réparation des routes et d'autoroutes sont un phénomène récurrent, notamment influencé par la durée de vie moindre des infrastructures routières en comparaison aux infrastructures ferroviaires. Toutefois, le nombre élevé de projets autoroutiers au Canada implique également une variation élevée dans les coûts par unité de distance des différents projets, qui varient notamment selon la géographie du terrain (et la nécessité de ponts ou tunnels), le type de tracé et l'emplacement. Kyte *et al.* (2004) mettent en évidence le manque de précision des estimations de coûts de construction routiers largement identifiés dans la littérature. Les auteurs indiquent que trois pratiques principales conduisent à des estimations de coûts inexacts : l'application d'un coût par unité de distance basé sur le « meilleur jugement » des ingénieurs, la prise en compte inadéquate de l'inflation, et la négligence des coûts inhabituels et extraordinaires. Toutefois, puisque ce mémoire vise à comparer les ordres de grandeur des coûts de construction des infrastructures, il est pertinent de présenter le Tableau 9 qui indique les coûts de construction d'une autoroute par distance (mile ou kilomètre) selon différentes sources sélectionnées.

Tableau 9. Coûts par unité de distance de construction de projets autoroutiers en Amérique du Nord

Valeur (millions \$)	Unités	Source	Notes
3,340 – 3,780 ⁶	\$ US par kilomètre	Compass International (2023)	Route majeure, 2 voies, sans ponts, États-Unis, 2023
4,040 – 4,220	\$ US par kilomètre	Compass International (2023)	Route majeure, 2 voies, avec 1 pont, États-Unis, 2023
0,890 – 1,020	\$ US par kilomètre	Compass International (2023)	Ajout d'une voie à une route majeure existante, États-Unis, 2023
12,010 – 12,690	\$ US par kilomètre	Compass International (2023)	Autoroute majeure de 4 voies, avec 1 pont
3,000	\$ CA par kilomètre	Government of Nova Scotia (2021)	Coût pour doubler 1 kilomètre d'autoroute
3,500	\$ CA par kilomètre	Government of Nova Scotia (2021)	Construction de 1 kilomètre d'une autoroute à 2 voies
0,427	\$ CA par kilomètre	Lipscombe (2019)	Moyenne des trois soumissions les plus basses pour des projets en Ontario et au Manitoba (2016)
8,204	\$ US par mile	Florida Department of Transportation (2022)	Construction d'une autoroute de 4 voies, milieu rural, Floride
0,821	\$ US par mile	Florida Department of Transportation (2022)	Ajout d'une voie sur une autoroute, milieu rural, Floride
1,000 – 8,500 (médiane = 1,600)	\$ US par voie-mile	United States General Accounting Office (2003)	Coûts de construction moyens pour 1 voie mile, selon une étude du Washington State Department of Transportation et des réponses de 24 États en 2002
1,937 – 15,400	\$ US par voie-mile	Victoria Transport Policy Institute (2023)	Coûts typique des projets variés de construction d'autoroute, ajout d'une voie, États-Unis, 2014

Le Tableau 9 fournit des indications en lien avec les ordres de grandeur des projets de construction autoroutiers en Amérique du Nord, et va pouvoir guider les estimations utilisées dans ce mémoire. Il est reconnu que ces estimations ne constituent pas des valeurs exactes, puisque ces dernières dépendent des caractéristiques propres à chaque projet de

⁶ Les coûts incluent : excavation, pavage, matériaux, main-d'œuvre, équipement de construction, conception et gestion (précision +/- 20 %) (Compass International, 2023).

construction autoroutier. Une analyse de sensibilité va également permettre de tenir compte des incertitudes entourant les estimations des coûts de construction.

Contribution à la littérature

La contribution principale de ce mémoire provient de la comparaison des investissements dans les infrastructures ferroviaires et routières sur une base équivalente. Avec la définition de scénarios de comparaison se basant sur les projections de la demande en transport de marchandises, ce mémoire compare les coûts associés au transport du même volume de marchandises pour les deux modes de transport étudiés. La délimitation des scénarios de comparaisons combinés à une définition claire des hypothèses de conception se basant sur la littérature et les données disponibles permet de comparer les coûts actualisés du transport de marchandises par train et par camion sur une base équivalente.

Chapitre 3

Méthodologie

La première étape de la méthodologie consiste à déterminer les améliorations à effectuer aux réseaux ferroviaires et routiers afin de soutenir les scénarios de demande projetée, en termes de kilomètres de voies et d'installations. Ensuite, il faut estimer le coût unitaire des infrastructures à construire pour soutenir la demande projetée, ainsi que les coûts d'utilisation des réseaux respectifs et la consommation énergétique reliée.

Niveau d'augmentation de la capacité du réseau de transport

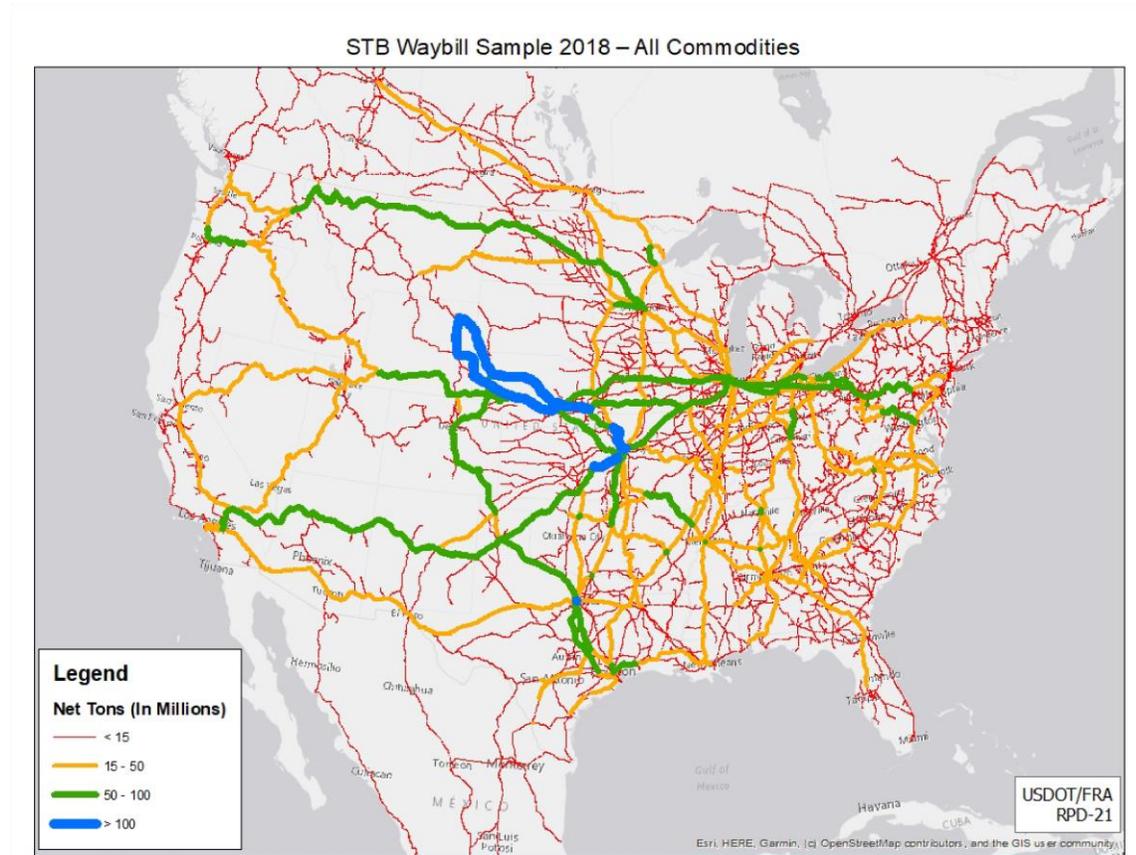
Il faut d'abord noter que dans le cadre de ce mémoire, il n'est pas possible d'estimer le taux d'utilisation global des deux réseaux en 2018, représenté par le ratio du volume sur la capacité d'un corridor de transport ou par un certain niveau de service. De plus, il est attendu que certains corridors (ceci est valable pour les deux réseaux) et certains points clefs (gares de triage, ports, centres intermodaux) présentent des contraintes de capacité plus critiques que d'autres en 2018. Ce mémoire considère donc les investissements requis pour soutenir un scénario de demande de transport hypothétique, mais qui s'appuie sur la littérature et sur les données publiques disponibles.

L'étude de sources présentées à la section *Projection de la croissance de la demande pour le transport de marchandises à l'horizon 2050* a mené au choix d'un taux de croissance annuel de 1 % pour le transport de marchandises par camions et par trains à l'horizon 2050, soit une augmentation totale de 37 % de la demande entre 2018 et 2050. Cela correspond donc à une augmentation de 37 % des tonnes transportées par camions et par trains, correspondant approximativement à 1 500 millions de tonnes transportées en 2050, soit 410 millions de tonnes de plus qu'en 2018. Cette augmentation du volume transporté implique une augmentation de 116 % pour le ferroviaire seulement (pour passer de 358 à 775 millions de tonnes), ou à une augmentation de 55 % pour le routier seulement (pour passer de 755 à 1 171 millions de tonnes). Les améliorations aux infrastructures existantes et les nouvelles constructions requises dépendent de ces hypothèses d'augmentation de la

demande à l'horizon 2050, et les investissements requis sont étudiés séparément pour chaque mode.

Investissements dans le réseau ferroviaire

La Figure 5 constitue une indication concernant le trafic ferroviaire au Canada, et est présentée en termes de millions de tonnes transportées durant l'année 2018.



The Waybill is a stratified sample of carload waybills for all U.S. rail traffic submitted by those rail carriers terminating 4,500 or more revenue carloads annually. Image created by Federal Railroad Administration, Office of Railroad Policy and Development (Office of Policy), based on Surface Transportation Board's 2018 Carload Waybill Sample.

Source : Federal Railroad Administration (2023)

Figure 5. Corridors ferroviaires et tonnages transportés en Amérique du Nord, 2018

La Figure 5 indique que la majorité des corridors ferroviaires canadiens présente un trafic de moins de 15 millions de tonnes transportées, à l'exception du corridor Winnipeg-Edmonton qui présente un trafic de 15 à 50 millions de tonnes transportées.

Tel que mentionné précédemment, ce mémoire ne détermine pas avec précision le type d'améliorations dans le réseau ferroviaire requises pour transporter 400 millions de tonnes supplémentaires en 2050, puisque cette estimation nécessite des données de demande en fonction de chaque corridor de transport. Les investissements dans le réseau ferroviaire considèrent le nombre de kilomètres de voies à doubler, le type d'amélioration de la capacité des sites de transbordement et des terminaux intermodaux, et le nombre de locomotives et de wagons à ajouter, pour subvenir à la demande projetée.

Le nombre de kilomètres de voies ferroviaires à doubler est calculé en estimant la proportion des voies actuelles qui vont atteindre leur capacité. Pour cela, il est considéré que seules les voies détenues par les compagnies ferroviaires de classe 1 sont sujettes à des améliorations, et elles totalisent 80 % du total des kilomètres de voies au Canada. Ensuite, il est estimé que 75 % des voies du réseau ferroviaire de classe 1 vont faire face à des contraintes de capacité selon les projections d'augmentation de la demande. Dans le cadre du mémoire, et en accord avec la méthodologie présentée par Cambridge Systematics (2007), il est plus adéquat de considérer l'augmentation de la capacité de corridors existants plutôt que la construction de nouvelles lignes ferroviaires. C'est la proportion des voies du réseau qui vont faire face à des contraintes de capacité qui constitue l'hypothèse majeure de cette partie du scénario. Cette estimation de la proportion découle de l'analyse de la Figure 3 et de la Figure 5, et de la comparaison avec la proportion des corridors à améliorer considérée par Cambridge Systematics (2007).

Selon les hypothèses d'augmentation de la demande, les sites de transbordement et terminaux intermodaux existants vont également faire face à des contraintes de capacité qui vont nécessiter des améliorations. Il est estimé que ce sont les sites et terminaux existants qui vont subir des améliorations afin d'augmenter leur capacité, et qu'il ne va pas y avoir de construction de nouveaux sites et terminaux. De cette manière, il n'est pas nécessaire de déterminer avec exactitude la quantité et le type d'installations à ajouter. Les coûts d'améliorations des sites et des terminaux vont être calculés comme un pourcentage des coûts des voies ferroviaires.

Le nombre de locomotives et de wagons à ajouter est calculé en étudiant les tendances historiques du nombre d'équipements en service, et en tenant compte de la croissance projetée.

Investissements dans le réseau routier

Les investissements dans le réseau routier considèrent le nombre de kilomètres de voies à doubler, et le nombre de camions à ajouter pour subvenir à la demande projetée. L'augmentation du tonnage transporté par camions nécessite une augmentation de la capacité routière. Cependant, les autoroutes ne sont pas entièrement dédiées au transport de marchandises. Dans le cadre de ce mémoire, les investissements dans le réseau routier se basent uniquement sur l'augmentation de la demande du transport de marchandises, même si l'utilisation initiale du réseau est partagée avec le transport de passagers. Ce mémoire étudie donc les investissements requis dans le cadre de la situation hypothétique où la demande pour le transport routier de passagers demeure constante jusqu'en 2050, alors que la demande pour le transport routier de marchandises augmente de 55 %. Il est également estimé que les segments autoroutiers situés dans les centres urbains du Canada sont déjà à capacité maximale et ne peuvent pas être doublés étant donné les contraintes d'espace. Dans le cadre de ce mémoire, c'est l'augmentation de la capacité de corridors existants qui est considérée, plutôt que la construction de nouveaux liens routiers. C'est donc la proportion des voies du réseau routier qui vont faire face à des contraintes de capacité qui constitue l'hypothèse majeure de cette partie du scénario.

Il est considéré que les coûts associés aux sites de transbordement et terminaux intermodaux sont inclus dans les coûts des voies routières. Le nombre de camions à ajouter est calculé en étudiant les tendances historiques du nombre d'équipements en service, et en tenant compte de la croissance projetée. Dans l'analyse, il est considéré que les camions à ajouter sont des camions à carburant diesel.

Coûts des investissements

L'estimation des coûts des investissements dans les infrastructures ferroviaires et routières pour subvenir aux scénarios de projection de la demande a pour objectif de présenter un ordre de grandeur et une base de comparaison entre les deux types

d'infrastructures. Il est entendu que ces estimations se basent sur des hypothèses généralisatrices et présentent un ordre de grandeur moyen pour les coûts des infrastructures au Canada. Les coûts relatifs aux investissements concernent exclusivement les augmentations à effectuer au réseau pour subvenir à la demande additionnelle aux tonnes déjà transportées. Ainsi, les coûts des investissements excluent les coûts d'entretien des infrastructures et du matériel en service avant 2018.

Investissements dans le réseau ferroviaire

L'estimation des coûts des investissements dans le réseau ferroviaire est basée sur la littérature. Le coût pour doubler une voie ferroviaire est un coût de construction par kilomètre et est estimé en calculant la moyenne de valeurs présentées par von Brown (2011). Le coût unitaire d'une locomotive et d'un wagon est estimé en se basant sur la littérature. Il est estimé que les infrastructures ferroviaires considérées ont une durée de vie utile qui égale ou surpasse la période d'étude de 32 ans (Crozet et Chassagne, 2013; Vidau *et al.*, 2012).

Investissements dans le réseau routier

L'estimation des coûts des investissements dans le réseau routier se base sur les sources présentées dans la revue de la littérature. L'estimation des coûts de construction pour l'ajout d'un kilomètre de voie autoroutière est effectuée en prenant la moyenne de valeurs présentées dans Victoria Transport Policy Institute (2023). La moyenne est effectuée sur les coûts de l'ajout d'une voie (coûts normaux) des éléments suivants : autoroute, artère principale, mineure et collecteur principal en région rurale, terrain plat ou vallonné. L'estimation des coûts de resurfaçage des voies routières existantes utilise la même méthodologie que pour les coûts de construction pour l'ajout d'un kilomètre de voie autoroutière, en prenant la moyenne sur les coûts de resurfaçage d'une voie existante. L'estimation des coûts d'acquisition d'un camion à propulsion diesel est effectuée en calculant la moyenne des valeurs présentées dans la revue de littérature de Sharpe et Basma (2022). Il est estimé que la durée de vie utile d'un camion à propulsion diesel est de onze ans (Gouvernement du Québec - Ministère des Transports, 2018). La durée de vie utile jusqu'à la réfection du pavage des nouvelles voies autoroutières est estimée à huit

ans, et il est estimé que les coûts associés incluent les coûts d'entretien routiniers (Burningham et Stankevich, 2005).

Coûts d'opération

Les coûts d'opération selon le mode de transport sont estimés en se basant sur les données et calculs du Bureau of Transportation Statistics, de Forkenbrock (1999), de Forkenbrock (2001), ainsi que sur les données de Statistique Canada et Association des chemins de fer du Canada (2020). Une valeur moyenne a été retenue afin de présenter des estimations réalistes. Seuls les coûts des opérations liés aux tonnes-kilomètres additionnelles sont considérés, les coûts des opérations des tonnes-kilomètres déjà transportées en 2018 ne sont pas considérés dans les estimations présentées. Ceci vise à estimer uniquement les coûts reliés aux tonnes-kilomètres associés aux nouveaux investissements dans chaque réseau.

Il n'existe pas de données canadiennes agrégées concernant le coût de transport des marchandises selon le mode de transport. Afin d'estimer ces coûts, il est cependant possible de se baser sur les données du U.S. Bureau of Transportation Statistics (BTS), l'agence américaine de statistique sur les transports. Le Tableau 10 présente les produits-marchandises moyens par tonne-mile commerciale (TMC) pour les différents modes de transports de marchandises aux États-Unis en 2019, ainsi que les valeurs converties⁷ en centimes de dollars canadiens de 2019 par tonne-kilomètre.

Tableau 10. Produits-marchandises moyens par tonne-mile commerciale (TMC) aux États-Unis, 2018 et convertis en CAD

Produits marchandises moyens par TMC		
	US\$ cent, 2018	CAD cent, 2019
Ferroviaire	4,23	9,44
Routier	17,55	38,42
Maritime	2,88	6,88
Aérien	137,49	293,99

Source : Bureau of Transportation Statistics, calculs de l'auteur

⁷ Le taux de change moyen en 2019 est de 1,3269 CAD par USD (Banque du Canada). Une tonne-mile correspond approximativement à 1,60934 tonne-kilomètre.

Les produits marchandises par TMC peuvent être considérés comme une approximation des tarifs de transport de marchandises puisqu'ils représentent le niveau de revenu gagné lors du transport de marchandises sur une distance d'un mille (Association des chemins de fer du Canada, 2021). Ainsi, il est possible d'estimer que les tarifs marchandises du transport routier sont approximativement quatre fois plus élevés que les tarifs marchandises du transport ferroviaire.

Dépenses annuelles du camionnage

L'enquête annuelle sur le camionnage pour le compte d'autrui de Statistique Canada fournit des statistiques financières sur le camionnage en 2019. Il n'existe cependant pas de données similaires pour des années antérieures. Ce mémoire tente d'estimer les coûts du transport routier de marchandises, et ces données constituent les meilleures estimations trouvées pour les dépenses du camionnage au Canada. Puisque ces dépenses concernent le camionnage pour compte d'autrui, il est pertinent de les comparer avec les tonnes-kilomètres transportées par camionnage pour compte d'autrui. Cependant, les données les plus récentes de Transports Canada concernant le camionnage pour compte d'autrui correspondent à l'année 2018. Dans le cadre de cette étude, ce sont donc les données sur les tonnes-kilomètres fournies par Ressources naturelles Canada pour 2019 qui sont utilisées. Toutefois, comme mentionnées plus haut, ces valeurs sont nettement supérieures aux valeurs fournies par Transport Canada pour l'année 2018. Il faut donc considérer les dépenses par tonnes-kilomètres comme une valeur plancher. Le Tableau 11 présente les dépenses par catégorie et par type de transporteur, ainsi qu'une estimation des dépenses par tonnes-kilomètres pour le transport routier de marchandises au Canada en 2019.

Tableau 11. Dépenses du camionnage pour compte d'autrui, 2019 (milliers de dollars canadiens de 2019)

Catégorie de dépenses	Dépenses par type de transporteur (milliers \$)		
	Petits	Grands et moyens	Total
Salaires, traitements et avantages sociaux versés aux employés	3 854 775	11 268 952	15 123 726
Paiements aux chauffeurs contractants	3 036 928	10 172 715	13 209 642

Catégorie de dépenses	Dépenses par type de transporteur (milliers \$)		
	Petits	Grands et moyens	Total
Achats de services de transport	1 176 058	4 063 333	5 239 391
Dépenses en carburant pour les véhicules	2 661 438	6 397 320	9 058 759
Frais de réparation et d'entretien	1 396 799	3 328 452	4 725 251
Amortissement d'actifs corporels et incorporels	732 966	2 050 071	2 783 037
Toutes les autres dépenses d'exploitation	2 489 746	7 220 183	9 709 929
Autres dépenses	1 174 829	3 623 001	4 797 830
Total des dépenses	16 523 539	48 124 027	64 647 565
Tonnes-kilomètres (millions)	35 832	332 604	368 436
Dépenses par tonne-km (cents)	46,11	14,47	17,55

Source : Tableau 53, 57, 59 (Ressources naturelles Canada), Statistique Canada

Les données sur les dépenses de Statistique Canada divisent les transporteurs entre petits et grands et moyens. À des fins de comparaison, les tonnes-kilomètres des camions légers ont été associées aux petits transporteurs, et celles des camions moyens et lourds aux grands et moyens transporteurs. Les dépenses par tonne-kilomètre représentent donc les coûts déboursés par les transporteurs pour compte d'autrui pour transporter une tonne de marchandises sur un kilomètre, mais ne correspondent pas spécialement aux coûts dépensés par les expéditeurs pour utiliser le service de transport. Afin de confirmer la magnitude des résultats obtenus, il est utile de les comparer aux données obtenues par Forkenbrock (1999) qui estime des coûts privés du transport routier de marchandises de 8,42 centimes de dollars américains de 1994 par tonne-mile⁸.

Dépenses annuelles du transport ferroviaire

Dans son rapport « Tendances ferroviaires 2020 », l'ACFC présente de l'information financière concernant les chemins de fer du Canada. Le détail des charges d'exploitation pour l'année 2019 tel que présenté dans le rapport est présenté au Tableau 12.

⁸ Lorsque convertis, les coûts par unité de transport obtenus par Forkenbrock (1999) sont de 31 cents par tonne-kilomètre, soient des coûts plus faibles, mais du même ordre de grandeur. La conversion considère un IPC de 148,2 en 1994 et 256,759 en 2019, un taux de change moyen de 1,3269 CAD par USD en 2019 (Banque du Canada; U.S. Bureau of Labor Statistics).

Tableau 12. Charges d'exploitation du transport ferroviaire de marchandises, 2019 (millions de dollars canadiens de 2019)

Catégorie de charges	Charges totales (millions \$)
Transport	3 718
Carburant	2 008
Entretien du matériel	2 136
Entretien de la voie et des ouvrages	2 280
Charges générales et d'administration	2 483
Total des charges	12 626
Rémunération globale ⁹	3 477
Tonnes-kilomètres (milliards)	455,8
Charges par tonnes-km (cents) ¹⁰	2,77
Dépenses par tonnes-km (cents)¹¹	3,53

Source : Association des chemins de fer du Canada (2020)

Afin de confirmer la magnitude des résultats obtenus, il est utile de les comparer aux données obtenues par Forkenbrock (2001). L'auteur estime des coûts privés de quatre scénarios de transport ferroviaire de marchandises¹² et obtient une moyenne de 1,53 cent de dollars américains de 1994 par tonne-mile¹³.

Émissions de GES et consommation d'énergie

Les données sur la consommation d'énergie et les émissions de GES par mode de transport présentées au Chapitre 1 permettent d'estimer la consommation d'énergie et les émissions de GES par tonne-kilomètre pour chaque mode de transport. En associant une valeur monétaire aux tonnes équivalentes de CO₂ émises, il est possible d'estimer les coûts des émissions de GES par mode de transport.

⁹ La rémunération globale n'est pas incluse par l'ACFC dans le calcul des charges d'exploitation. Cette valeur a toutefois été ajoutée pour refléter le détail des dépenses du camionnage pour compte d'autrui.

¹⁰ Sans la rémunération globale.

¹¹ Incluant la rémunération globale.

¹² Marchandises lourdes, marchandises mixtes, intermodal et superposé.

¹³ Lorsque convertis, les coûts par unité de transport obtenus par Forkenbrock (2001) sont de 5,7 cents par tonne-kilomètre, des coûts similaires aux dépenses par tonnes-kilomètres. Les valeurs de conversion utilisées sont les mêmes que celles présentées ci-dessus.

Projections de la croissance des tonnes-kilomètres

Comme présenté ci-dessus, l'estimation des coûts d'opération par mode de transport dépend directement des tonnes-kilomètres transportées. Il est donc nécessaire d'estimer le taux de croissance des tonnes-kilomètres par mode de transport à l'horizon 2050. Le Tableau 13 présente le TCAC des tonnes-kilomètres selon le mode de transport entre 2000 et 2018 au Canada.

Tableau 13. TCAC des tonnes-kilomètres selon le mode de transport entre 2000 et 2018, Canada

Mode de transport	TCAC des tonnes-kilomètres 2000-2018
Ferroviaire	1,85 %
Routier	2,21 %
Ferroviaire et routier	2,00 %

Source : Tableau 14, 27 (Ressources naturelles Canada)

La méthodologie utilisée pour estimer les tonnes-kilomètres transportées à l'horizon 2050 est similaire à celle utilisée pour les projections de la demande. Le TCAC historique (2000 à 2018) de la totalité tonnes-kilomètres transportée par camion et par train est de 2 %, et c'est ce taux annuel qui sera utilisé pour les projections des tonnes-kilomètres entre 2018 et 2050 (Ressources naturelles Canada). Le taux de 2 % correspond à une augmentation totale de 88 % des tonnes-kilomètres transportées par camion et par train entre 2018 et 2050, soient approximativement 1 500 milliards de tonnes-kilomètres transportées en 2050, soit 710 milliards de tonne-kilomètre de plus qu'en 2018. Cette augmentation du volume transporté implique une augmentation approximative de 159 % pour le transport ferroviaire seulement (pour passer de 440 à 1 160 milliards de tonnes-kilomètres), ou à une augmentation de 200 % pour le transport routier seulement (pour passer de 355 à 1 070 milliards de tonnes-kilomètres).

Comparaison des coûts totaux

Le taux d'actualisation utilisé dans le calcul des coûts totaux s'appuie sur les recommandations du gouvernement du Canada et suit les valeurs proposées par Jenkins et Kuo (2007). Le taux d'actualisation utilisé est donc un taux réel de 8 %.

La méthode utilisée pour évaluer les coûts totaux des deux types d'infrastructures est une comparaison des coûts actualisés sur une période de 32 ans, débutant en 2018 et terminant en 2049, afin d'avoir les nouvelles infrastructures en place pour l'année 2050. La formule utilisée pour le calcul des coûts actualisés nets (CAN) est présentée ci-dessous.

$$CAN = \sum_{t=2018}^{t=2049} \frac{c_t}{(1+r)^t}$$

Conclusion de la méthodologie

La Figure 6 présente un résumé des étapes de l'approche méthodologique utilisée pour le calcul des coûts d'investissements. Ce résumé de l'approche méthodologie est à la fois valable pour le transport ferroviaire et routier.

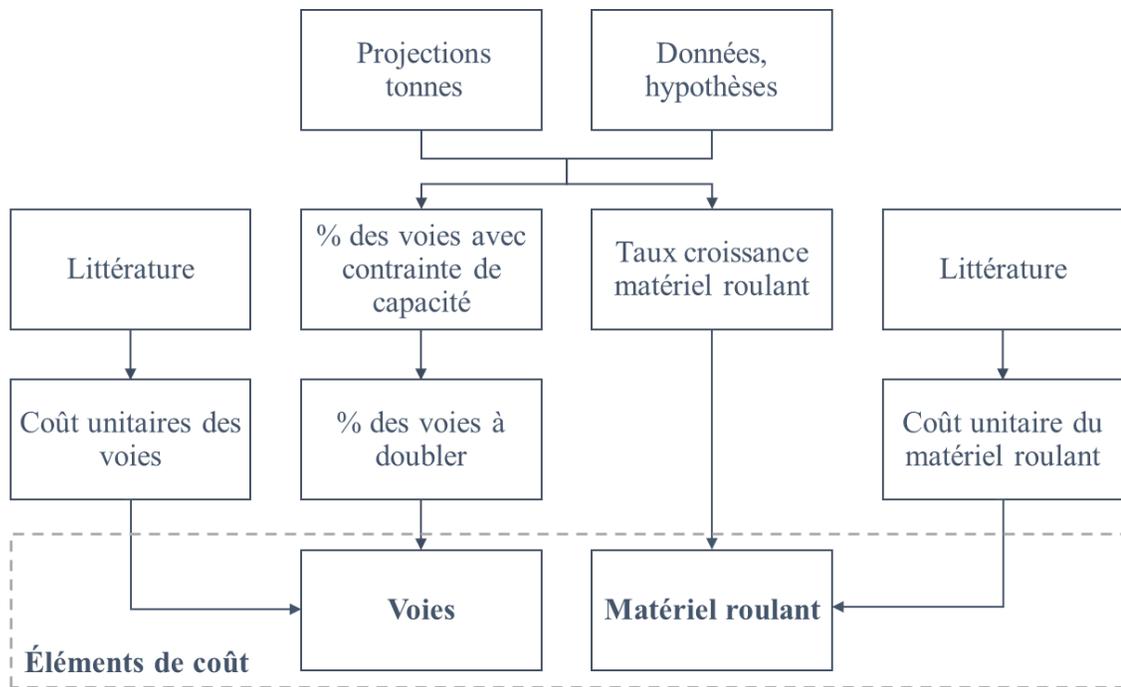


Figure 6. Approche méthodologique utilisée pour les coûts d'investissement

La Figure 6 montre l'interdépendance des variables et des hypothèses utilisées pour calculer un élément de coût d'investissement. Ce diagramme est notamment utile à la compréhension de l'analyse de sensibilité présentée ci-après. En effet, il permet de comprendre que les coûts actualisés des voies dépendent à la fois des coûts unitaires des

voies et de la proportion des voies à doubler. Ainsi, une variation d'un certain pourcentage des coûts unitaires des voies aura le même impact sur les coûts actualisés des voies qu'une variation du même pourcentage de la proportion des voies à doubler ou de la proportion des voies qui vont expérimenter des contraintes de capacité. De même, les coûts actualisés du matériel roulant dépendent à la fois de leurs coûts unitaires et de leur taux de croissance projeté.

La Figure 7 présente un résumé des étapes de l'approche méthodologique utilisée pour le calcul des coûts d'opération et de la pollution. Ce résumé de l'approche méthodologie est à la fois valable pour le transport ferroviaire et routier.

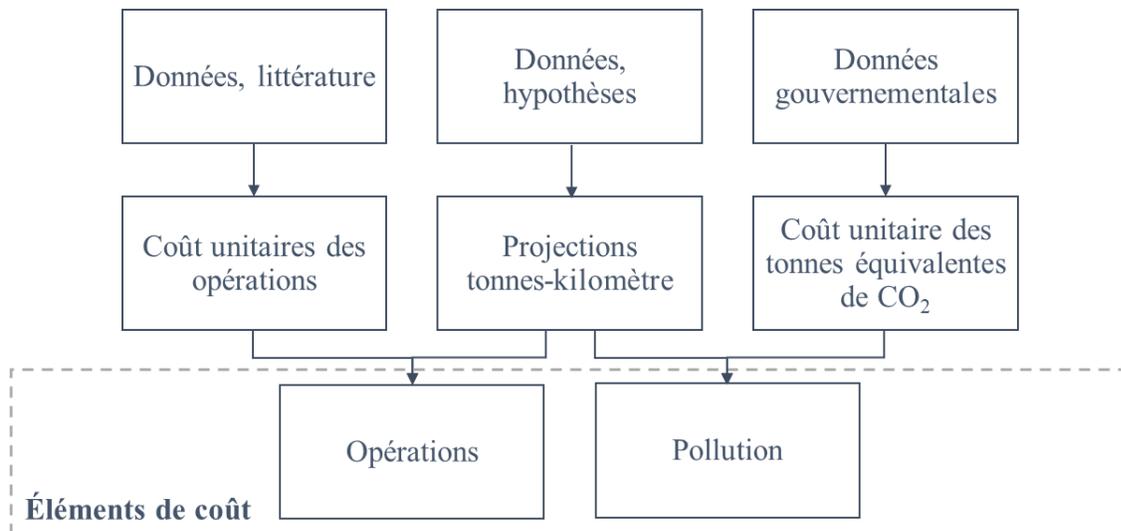


Figure 7. Approche méthodologique utilisée pour les coûts d'opération et de la pollution

La Figure 7 montre l'interdépendance des variables et des hypothèses utilisées pour calculer les coûts d'opération. Ce diagramme est également utile pour la compréhension de l'analyse de sensibilité présentée plus bas. En effet, il permet de comprendre que les coûts d'opération dépendent à la fois des coûts unitaires des opérations et des projections des tonnes-kilomètres, qui reposent sur des hypothèses, des données et la littérature.

Chapitre 4

Données et résultats

La présentation des données et des résultats débute par l'estimation du niveau d'augmentation de la capacité du réseau de transport requise pour subvenir à la demande projetée en transport de marchandises, suivie par l'estimation des différents coûts unitaires nécessaires au calcul des coûts totaux. Le niveau d'investissements requis combinés aux coûts unitaires permet de comparer les coûts actualisés totaux entre les deux modes de transport. Après avoir comparé les coûts actualisés totaux, une analyse de sensibilité est effectuée afin de considérer la potentielle sous- et surestimation des hypothèses de conception du scénario ayant le plus d'influence sur le calcul des coûts actualisés totaux.

Niveau d'augmentation de la capacité du réseau de transport

L'estimation du niveau d'augmentation de la capacité de chaque réseau de transport constitue la base de la comparaison des coûts d'investissement et d'opérations selon le mode de transport. Cette estimation repose sur des hypothèses émises par l'auteure étant donné le manque de données précises concernant la capacité actuelle et future des réseaux de transports routiers et ferroviaires à l'échelle canadienne.

Investissements dans le réseau ferroviaire

Puisque le réseau ferroviaire initial totalise approximativement 42 000 kilomètres de voies, le nombre de voies à doubler correspond à un total de 25 200 kilomètres pour subvenir à la demande projetée.

Le Tableau 14 présente le taux de croissance annuel composé (TCAC) des locomotives et wagons en service ainsi que le nombre de tonnes transportées pour certaines périodes.

Tableau 14. Taux de croissance annuel composé des tonnes, des locomotives et des wagons en service au Canada entre 1986 et 2021

	TCAC 2004-2021	TCAC 2004-2018	TCAC 2013-2021	TCAC 1986-2021
Locomotives	0,63 %	1,14 %	2,12 %	N/A
Wagons (milliers)	-2,90 %	-3,63 %	0,21 %	N/A
Tonnes (millions)	-0,39 %	-0,08 %	-0,44 %	0,59 %

Source : Statistique Canada

Entre 2004 et 2018, le nombre de locomotives¹⁴ en service au Canada a augmenté à un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 1,14 %, le nombre de wagons en service au Canada a baissé à un TCAC de 3,63 %, et les tonnes transportées par rail ont baissé à un TCAC de 0,08 % sur la même période (Association des chemins de fer du Canada, 2021; Statistique Canada). Les données les plus récentes de l'ACFC concernant les locomotives et wagons en service remontent à 2004. Le scénario étudié considère une augmentation des tonnes de marchandises transportées par rail de 116 % entre 2018 et 2050, ce qui correspond à une augmentation moyenne annuelle de 2,44 % sur la période de 32 ans. À la lumière de l'évolution des variables présentées au Tableau 14 et du scénario considéré, ce mémoire se base sur l'hypothèse que le nombre de locomotives en service vont augmenter à un taux annuel moyen de 4 % entre 2018 et 2050, et les wagons à un taux annuel moyen de 2 %. Ces taux ont été choisis car ils représentent une augmentation approximative d'un point de pourcentage aux taux historiques moyens, ce qui constitue une hypothèse de conception du scénario. Les valeurs ont été choisies car elles sont approximativement supérieures de deux points de pourcentage à la moyenne des taux de croissance observés entre 2013 et 2021. Le total des tonnes de marchandises transportées par transport ferroviaire a été divisé par le nombre de wagons et de locomotives en service pour les années 2018 à 2050. La comparaison de ces ratios à ceux observés pour les années 2004 à 2018 donne lieu à des ratios similaires. Puisque le scénario de croissance des locomotives et wagons est étudié au sein d'un scénario de

¹⁴ Afin de déterminer le taux de croissance du nombre de locomotives et de wagons, les données des rapports « Tendances ferroviaires » de l'Association des chemins de fer du Canada des années 2015 à 2022 ont été utilisées.

croissance des tonnes transportées, il est important que le choix de taux de croissance des locomotives et wagons en service à l’horizon 2050 permette de conserver des ratios de tonnes transportées par locomotives et par wagons similaires entre 2004 et 2018 et les projections jusqu’en 2050.

Ainsi, le scénario choisi donne lieu à 13 289 locomotives et 111 188 wagons en service en 2050. Le Tableau 15 présente les quantités d’infrastructures à ajouter au réseau existant pour subvenir à l’augmentation de la demande en transport selon le scénario étudié dans le cadre de ce mémoire.

Tableau 15. Infrastructures ferroviaires à ajouter au réseau existant pour subvenir à la demande projetée

Type d’infrastructure	Quantité
Voies ferroviaires à doubler (km)	25 200
Locomotives	9 501
Wagons	52 188

Source : calculs et estimations de l’auteur.

Le matériel roulant ferroviaire à ajouter au réseau d’ici 2050 correspond à un total de 9 501 locomotives, pour une augmentation totale de 251 %, et 52 188 wagons, pour une augmentation totale de 88 %. La quantité de voies ferroviaires à doubler correspond à 25 200 kilomètres, une donnée qui se base sur l’étude du trafic ferroviaire au Canada en 2018, présenté à la Figure 3 et à la Figure 5. Ceci a mené à l’estimation que 75 % des voies du réseau ferroviaire de classe 1 vont faire face à des contraintes de capacité d’ici 2050 selon les projections d’augmentation de la demande de ce mémoire. Cette proportion du réseau a été comparée aux et sur la proportion des corridors ferroviaires considérés par Cambridge Systematics (2007) dans l’étude du trafic ferroviaire aux États-Unis. Cambridge Systematics (2007) estime que 55 % des corridors principaux vont opérer sur ou au-dessus de leur capacité d’ici 2035 dans le cas où les tonnes transportées par train augmentent de 88 % entre 2005 et 2035.

Investissements dans le réseau routier

La longueur du Réseau routier national du Canada est estimée à plus de 38 098 voies-kilomètres en 2017, et 72,8 % sont classées comme des routes principales, soit

approximativement 27 735 voies-kilomètres (Transports Canada, 2021a). Il est estimé qu'une augmentation de 25 % de la capacité routière permettrait au réseau de subvenir à l'augmentation de 55 % de la demande, correspondant à un total de 34 669 voies-kilomètres en 2050, ou 6 934 voies-kilomètres supplémentaires. Le nombre de voies-kilomètres à doubler pour subvenir à la demande projetée du transport routier de marchandises est donc estimé à 6 934.

En 2019, il y a approximativement 1 117,6 milliers de véhicules moyens et lourds immatriculés au Canada (Transports Canada, 2020b). La totalité des véhicules immatriculés au Canada a expérimenté une augmentation de 1,4 % entre 2019 et 2018, et une hausse de 16,4 % par rapport à 2009, correspondant à un TCAC de 1,5 % sur 10 ans (Transports Canada, 2020b). Il est estimé que les véhicules lourds présentent approximativement le même taux de croissance que la totalité des véhicules. Durant la période de 2009 à 2018, le volume de marchandises transportées par camion pour compte d'autrui a quant à lui augmenté de 44,3 %, équivalant à un TCAC de 4,3 % sur 9 ans (Transports Canada, 2021b). Le scénario étudié considère une augmentation des tonnes de marchandises transportées par camion de 55 % entre 2018 et 2050, ce qui correspond à une augmentation moyenne annuelle de 1,38 % sur la période de 32 ans. À la lumière de l'évolution de ces variables et du scénario considéré, ce mémoire se base sur l'hypothèse que le nombre de camions en service va augmenter à un taux annuel moyen de 1 % entre 2018 et 2050. Ces taux ont été choisis, car ils représentent une augmentation approximative d'un point de pourcentage aux taux historiques moyens, ce qui constitue une hypothèse de conception du scénario. Les taux de croissance historiques des camions en service sont situés approximativement un à deux points de pourcentages sous les taux de croissance historiques des locomotives et des wagons en service. Le total des tonnes de marchandises transportées par transport routier a été divisé par le nombre de camions en service pour les années 2018 à 2050. La comparaison de ces ratios à ceux observés pour les années 2004 à 2018 donne lieu à des ratios similaires. Puisque le scénario de croissance des camions est étudié au sein d'un scénario de croissance des tonnes transportées, il est important que le choix de taux de croissance des camions en service à l'horizon 2050 permette de conserver des ratios de tonnes transportées par camions entre 2004 et 2018 et les projections jusqu'en 2050.

Ainsi, le scénario choisi donne lieu à 1,52 million de camions en service en 2050. Le Tableau 16 présente les quantités d'infrastructures à ajouter au réseau existant pour subvenir à l'augmentation de la demande en transport selon le scénario étudié dans le cadre de ce mémoire.

Tableau 16. Infrastructures routières à ajouter au réseau existant pour subvenir à la demande projetée

Type d'infrastructure	Quantité
Voies routières à doubler (km)	6 934
Camions	419 034

Source : calculs et estimations de l'auteur

Les camions à ajouter au réseau d'ici 2050 se dénombrent à 419 034, pour une augmentation totale de 37 %.

Coûts unitaires des investissements

L'estimation des coûts unitaires des investissements est préalable à la comparaison des coûts totaux d'investissement par mode de transport. Les coûts unitaires présentés constituent des estimations en dollars canadiens de 2018.

Investissements dans le réseau ferroviaire

Le Tableau 17 présente les coûts unitaires des infrastructures ferroviaires qui sont utilisés dans le cadre du calcul des coûts totaux d'investissement.

Tableau 17. Coûts unitaires des infrastructures ferroviaires à ajouter, 2018

Type d'infrastructure	Coût unitaire
Voies ferroviaires à doubler (\$/km) ¹⁵	2 373 937
Locomotives (\$/unité) ¹⁶	3 887 100
Wagons (\$/unité)	135 000

Source : Atkins (2017); Nguyen (2018); von Brown (2011)

¹⁵ La conversion des valeurs présentées par von Brown (2011) considère un IPC de 148,2 en 1994 et 251,107 en 2018 et un taux de change moyen de 1,2957 CAD par USD en 2018 (Banque du Canada; U.S. Bureau of Labor Statistics).

¹⁶ La conversion des valeurs présentées dans Atkins (2017) considère un taux de change moyen de 1,2957 CAD par USD en 2018 (Banque du Canada).

Les coûts unitaires représentent une estimation du coût associé à chaque infrastructure ferroviaire en 2018 au Canada.

Investissements dans le réseau routier

Le Tableau 18 présente les coûts unitaires des infrastructures routières qui sont utilisés dans le cadre du calcul des coûts totaux d'investissement.

Tableau 18. Coûts unitaires des infrastructures routières à ajouter, 2018

Type d'infrastructure	Coût unitaire
Voies routières à doubler (\$/km) ¹⁷	4 839 981
Resurfacement des voies routières existantes (\$/km) ¹⁸	860 668
Camions (\$/unité) ¹⁹	172 454

Source : Sharpe *et al.* (2022); Victoria Transport Policy Institute (2023)

Les coûts unitaires représentent une estimation du coût associé à chaque infrastructure routière en 2018 au Canada.

Coûts unitaires des opérations

L'estimation des coûts unitaires des opérations est également préalable à la comparaison des coûts totaux d'investissement par mode de transport. Les coûts unitaires présentés constituent des estimations en dollars canadiens de 2019, et sont présentés au Tableau 19 en termes de dollars par tonne-kilomètre transportée.

Tableau 19. Coûts unitaires des opérations de transport de marchandises par mode, 2019

Mode de transport	Coût unitaire
Routier (\$/tkm)	0,2899
Ferroviaire (\$/tkm)	0,0622

Source : calculs de l'auteur

¹⁷ La conversion des valeurs présentées dans Victoria Transport Policy Institute (2023) considère un IPC de 236,736 en 2014 et 251,107 en 2018 et un taux de change moyen de 1,2957 CAD par USD en 2018 (Banque du Canada; U.S. Bureau of Labor Statistics).

¹⁸ Les mêmes valeurs de conversion ont été utilisées que dans le cas des voies ferroviaires à doubler.

¹⁹ La conversion des valeurs présentées dans Sharpe *et al.* (2022) considère un IPC 251,107 en 2018 et 260,280 en 2020 et un taux de change moyen de 1,2957 CAD par USD en 2018 (Banque du Canada; U.S. Bureau of Labor Statistics).

Le Tableau 19 permet d'estimer que les coûts d'opération, mesurés en dollars par tonne-kilomètre, sont approximativement 4,7 fois plus élevés pour le transport routier que pour le transport ferroviaire de marchandises. Il est considéré que ces coûts incluent les coûts d'entretien et de carburant.

Coûts unitaires des émissions de GES et de la consommation énergétique

En considérant une intensité en GES de 94,2 grammes de CO₂ équivalent par MJ de diesel consommé, tel que présenté dans Sharpe (2019), et en utilisant les intensités énergétiques par mode de transport rapporté par Ressources naturelles Canada, il est possible d'estimer les émissions de GES par tonne-kilomètre par mode de transport, tel que présenté au Tableau 20.

Tableau 20. Intensité énergétique et émissions de GES par tonne-kilomètre selon le mode de transport, 2019

	Intensité énergétique (MJ/Tkm)	Émissions de GES (gCO₂e/Tkm)
Ferroviaire	0,21	20,04
Routier	1,74	163,45

Source : Ressources naturelles Canada ; Sharpe (2019), calculs de l'auteur

Le Tableau 20 permet d'estimer que le transport routier de marchandises génère approximativement huit fois plus de grammes équivalents de CO₂ par tonne-kilomètre transportée en 2019 au Canada.

La valeur monétaire associée à la tonne de CO₂ équivalent se base sur « L'approche pancanadienne pour une tarification de la pollution par le carbone » du gouvernement du Canada, tel que présenté au Tableau 21.

Tableau 21. Prix minimal de la pollution par le carbone de 2018 à 2030

Année	Prix minimal de la pollution par le carbone (\$/TCO₂e)
2018	30
2019	35
2020	40

Année	Prix minimal de la pollution par le carbone (\$/TCO_{2e})
2021	45
2022	50
2023	65
2024	80
2025	95
2026	110
2027	125
2028	140
2029	155
2030	170

Source : Environnement et Changement climatique Canada (2021); Gouvernement du Canada (2021)

Il est estimé que le prix minimal de la pollution par le carbone va demeurer constant entre 2030 et 2050.

Comparaison des coûts à l’horizon 2050

L’étude des coûts actualisés du transport ferroviaire et routier de marchandises permet de comparer les coûts d’investissements et les coûts variables des deux modes selon les hypothèses considérées dans ce mémoire. Cette comparaison repose donc sur l’entièreté des hypothèses reliées à la projection de la demande de transport, au niveau d’agrandissement des infrastructures de transport relié à la projection de la demande, et aux coûts unitaires correspondant aux différentes infrastructures. Il est donc important de rappeler que les coûts actualisés présentés sont des estimations qui sont utilisées pour comparer les ordres de grandeur de ces coûts. L’objectif des différentes hypothèses est de pouvoir comparer les coûts de deux types d’investissement et modes de transport qui ne sont pas exactement équivalents selon la base la plus comparable possible. Les résultats sont présentés en dollars canadiens de 2018. Différents scénarios sont présentés, afin de prendre en compte des cas « extrêmes » susceptibles de changer les ordres de grandeur des coûts actualisés du scénario de base.

Scénario de base

Le scénario de base utilise les valeurs présentées dans ce mémoire, selon les hypothèses présentées dans les sections précédentes. Le Tableau 22 présente les coûts actualisés pour chaque mode de transport.

Tableau 22. Coûts actualisés par mode de transport, scénario de base

Mode de transport	Coûts actualisés (milliards \$)
Ferroviaire	57,72
Routier	127,14

Source : calculs de l'auteur

Dans le cadre du scénario de base, les coûts actualisés reliés aux investissements et aux opérations du transport routier sont approximativement 2,2 fois supérieurs aux coûts actualisés reliés aux investissements et aux opérations du transport ferroviaire. Pour mettre ces résultats en contexte, le Tableau 23 présente les émissions de GES par mode de transport associé au total des tonnes-kilomètres transportées durant la période de 32 ans.

Tableau 23. Émissions de GES par mode de transport, scénario de base

Mode de transport	Émissions de GES (millions de tonnes de CO₂ éq.)
Ferroviaire	14,25
Routier	116,26

Source : calculs de l'auteur

Ainsi, le scénario de base montre qu'en plus de présenter des coûts actualisés plus de deux fois supérieurs, le transport routier de marchandises génère des émissions de GES plus de huit fois supérieures.

Scénario de base sans coûts des émissions

Ce scénario utilise le scénario de base, mais considère des coûts nuls associés aux émissions de GES sur la totalité de la période étudiée. Ces coûts actualisés sont présentés au Tableau 24.

Tableau 24. Coûts actualisés par mode de transport, scénario de base en considérant des coûts d'émissions de GES nuls

Mode de transport	Coûts actualisés (milliards \$)
Ferroviaire	57,19
Routier	122,81

Source : calculs de l'auteur

En considérant le cas où les coûts associés aux émissions de GES sont nuls, les coûts actualisés du transport routier demeurent supérieurs à ceux du transport ferroviaire, par un facteur de 2,1. Toutefois, en comparaison au scénario de base, les coûts actualisés du transport ferroviaire ont diminué de 0,9 %, alors que les coûts actualisés du transport routier ont diminué de 5,4 %. Ceci est dû au fait que le transport routier possède une intensité énergétique plus de huit fois supérieure au transport ferroviaire, tel que présenté au Tableau 20. Cette variante au scénario de base est importante à considérer puisque la valeur monétaire associée à la tonne équivalente de carbone est une valeur proposée par le gouvernement fédéral qui pourrait être amenée à changer dans le futur pour diverses raisons, notamment à la suite d'élections.

Il est alors possible d'utiliser ce scénario et les données du Tableau 23 afin d'évaluer la différence des coûts actualisés entre les deux modes par rapport à la différence des GES émis, et ainsi calculer le coût évité par tonne de GES non émise, tel que présenté au Tableau 25.

Tableau 25. Estimation des coûts évités par tonne de GES non émis du transport ferroviaire

Mode de transport	Coûts actualisés (milliards \$)	GES émis (millions de tonnes de CO ₂ éq.)	Coût évité par tonne de GES non émis (\$/tonne de GES)
Ferroviaire	57,19	14,25	-
Routier	122,81	116,26	-
Différence	-65,62	-102,00	-643,31²⁰

Source : calculs de l'auteur

²⁰ Le coût évité par tonne de GES non émise est calculé en divisant la différence des coûts actualisés entre les deux modes (-65,62 G\$) par la différence des GES émis entre les deux modes (-102,00 millions de tonnes de CO₂ éq)

Le Tableau 25 illustre les avantages économiques et environnementaux du train dans ce scénario, en montrant que le mode de transport ferroviaire permet d'économiser 643,31 \$ par tonne de GES non émis comparativement au transport routier. Ceci peut être interprété par le fait que l'industrie du transport de marchandises est prête à payer 643,31 \$ par tonne de GES pour émettre les GES provenant du transport routier plutôt que d'utiliser le transport de marchandises. Dans ce cas, cela peut représenter le coût du désavantage logistique du transport ferroviaire : malgré les avantages économiques et environnementaux du train, l'industrie est prête à payer 643,31 \$ par tonne de GES émis pour profiter de la flexibilité du camion. Un encadrement réglementaire qui forcerait l'usage du train pour le transport de marchandises sur les longues distances ferait gagner 643,31 \$ par tonne de GES évitée. Ce type d'encadrement ne serait pas discriminatoire pour les compagnies, puisqu'elles seraient toutes soumises à la même contrainte. Cela est parfaitement contraire à l'idée qu'il est coûteux de réduire les GES. Le seul coût, dans ce cas, c'est celui du renoncement à la flexibilité du transport par camion.

Scénario avec coûts augmentés pour le transport ferroviaire

Ce scénario prend en compte la possibilité de sous-estimation majeure dans les hypothèses reliées aux coûts des infrastructures et des opérations ferroviaires. Pour cela, le scénario s'appuie sur le scénario de base et considère le cas où les coûts de construction des voies ferroviaires, des installations de transbordement et des opérations sont doublés. Les coûts actualisés du transport ferroviaire selon ces hypothèses sont présentés au Tableau 26.

Tableau 26. Coûts actualisés du transport ferroviaire - Coûts de construction des voies, des installations de transbordement et des opérations doublés

Mode de transport	Coûts actualisés (milliards \$)
Ferroviaire	99,19

Source : calculs de l'auteur

Ce scénario implique des coûts actualisés du transport ferroviaire 1,7 fois supérieurs aux coûts actualisés du transport ferroviaire du scénario de base, correspondant à une augmentation de 72 %. Cependant, les coûts actualisés du transport ferroviaire présentés au Tableau 26 demeurent inférieurs aux coûts actualisés du transport routier du scénario de base par un facteur de 1,3. Pour compléter ce scénario, il est intéressant de déterminer

par quelle magnitude les mêmes éléments de coûts du transport routier devraient être surestimés afin que les coûts actualisés totaux des deux modes soient égaux. En utilisant le solveur sur Excel, il est possible de trouver la variation en pourcentage des éléments de coûts correspondant à ceux doublés pour le transport ferroviaire (voies et opérations) qui conduisent à des coûts actualisés totaux de 99,19 G\$. La variation trouvée est de -32 %, signifiant que si ces éléments de coûts du transport routier sont surestimés de plus de 32 %, les coûts actualisés totaux du transport ferroviaire dans le scénario avec coûts augmentés dépassent les coûts actualisés du transport routier.

Analyse de sensibilité

Il est essentiel de présenter une analyse de sensibilité à la suite de la présentation des résultats de comparaison des coûts actualisés étant donné la variabilité observée dans la littérature de certains paramètres de coûts utilisés. L'objectif de l'analyse de sensibilité est de représenter l'impact de modifications aux hypothèses prises en compte dans le calcul sur les résultats finaux des différents scénarios. Le Tableau 27 présente l'importance de chaque élément de coût par rapport aux coûts totaux non actualisés sur 32 ans.

Tableau 27. Part du total des éléments de coûts par mode de transport

Élément de coût	Part du total
Ferroviaire	
Voies	37 %
Transbordement	7 %
Locomotives et wagons	27 %
Opérations	27 %
Pollution	1 %
Routier	
Voies	9 %
Camions	31 %
Resurfacement des voies	2 %
Opérations	54 %
Pollution	4 %

Source : calculs de l'auteur

Le Tableau 27 montre que la répartition des coûts diffère entre les deux modes de transport. Pour le scénario de base, dans le cas du transport ferroviaire, l'élément de coût avec le plus grand impact sur les coûts totaux est le coût de construction des voies, suivi du coût d'acquisition du matériel roulant et des coûts d'opération, comptabilisant pour 91 % des coûts totaux. Pour le scénario de base du transport routier, ce sont les coûts d'opération qui ont le plus grand impact sur les coûts totaux, suivis des coûts d'acquisition des camions, comptabilisant à eux deux pour 85 % des coûts totaux. Il peut ainsi être observé que dans le cas du scénario de base, ce sont principalement les proportions des coûts de construction des voies et des opérations qui sont inversées.

Méthodologie de l'analyse de sensibilité de +/- 25 %

Il est pertinent de s'intéresser aux hypothèses sur lesquelles reposent les éléments de coûts avec le plus grand impact sur les coûts totaux. La Figure 6 présentée au Chapitre 3 illustre l'interrelation des variables utilisées pour déterminer les différents éléments de coûts d'investissement. Pour le scénario de base du transport ferroviaire, les coûts de construction des voies dépendent du coût unitaire de construction et de la quantité de voies à doubler. La quantité de voies à doubler dépend de l'hypothèse sur la proportion des voies du réseau ferroviaire qui vont faire face à des contraintes de capacité. Il est estimé que le coût unitaire de construction et la proportion des voies sujettes à des contraintes de capacité sont les hypothèses les plus importantes à tester concernant l'élément de coût relatif aux voies ferroviaires. Le coût unitaire de construction de voies ferroviaires découle de la moyenne de valeurs provenant de la littérature, qui s'inscrivent cependant dans un grand intervalle de valeurs. La proportion des voies sujettes à des contraintes de capacité ne s'appuie pas sur des données réelles de capacité des voies ferroviaires, étant donné la non-accessibilité de telles données dans le cadre de ce mémoire, et repose donc sur un postulat de conception. De plus, la quantité de voies à doubler est répartie linéairement à travers les 32 années, constituant également une hypothèse de conception du scénario. La Figure 7 présentée au Chapitre 3 illustre l'interrelation des variables utilisées pour déterminer les différents éléments de coûts d'opération. Les coûts d'acquisition du matériel roulant dépendent du coût unitaire d'acquisition des locomotives et des wagons et de la quantité de locomotives et de wagons à ajouter. Le nombre de locomotives et de

wagons à ajouter repose sur les hypothèses de taux de croissance, qui découlent d'une analyse des taux de croissance historique et non de sources de la littérature, étant donné l'indisponibilité de telles données. De plus, il est considéré que les taux de croissance choisis sont fixes à travers les 32 années étudiées. Les coûts d'opération reposent sur l'estimation du coût unitaire des opérations du transport ferroviaire, et sur les projections des tonnes-kilomètres transportées à l'horizon 2050.

Pour le scénario de base du transport routier, les coûts d'opération reposent sur l'estimation du coût unitaire des opérations du transport routier, et sur les projections des tonnes-kilomètres transportées à l'horizon 2050. Les coûts d'acquisition des camions dépendent du coût unitaire d'acquisition, et du nombre de camions à ajouter. Le nombre de camions à ajouter repose sur l'hypothèse du taux de croissance des camions en services, qui découlent d'une analyse des taux de croissance historique et non de sources de la littérature, étant donné l'indisponibilité de telles données. De plus, il est considéré que les taux de croissance choisis sont fixes à travers les 32 années étudiées. Dès lors, les variables du scénario de base du transport routier étudiées dans le cadre de l'analyse de sensibilité sont : le taux de croissance des tonnes-kilomètres transportées et le taux de croissance des camions en service. Le coût unitaire de construction d'une voie routière supplémentaire va également être étudié dans le cadre de l'analyse de sensibilité, afin de refléter l'analyse de sensibilité des variables équivalentes du transport ferroviaire.

Dès lors, les variables du scénario de base du transport ferroviaire et routier étudiées dans le cadre de l'analyse de sensibilité sont :

- Voies, qui peuvent représenter une variation des coûts unitaires des voies, ou de la proportion des voies à doubler;
- Matériel roulant, qui peut représenter une variation des coûts unitaires du matériel roulant (camions ou locomotives et wagons), ou de la quantité de matériel roulant ajouté chaque année;
- Tonnes-kilomètres, qui impliquent à la fois une variation des coûts d'opération et de la pollution, et qui peuvent représenter une variation du coût unitaire des

opérations (en dollars par kilomètre) ou de la tonne équivalente de carbone, ou une variation des tonnes-kilomètres transportées chaque année;

- Coûts unitaires des opérations, qui impliquent une variation des coûts d'opération uniquement.

Résultats de l'analyse de sensibilité de +/- 25 %

Les résultats de l'analyse de sensibilité présentent les coûts actualisés à la suite d'une multiplication de chaque variable étudiée par +/- 25 %. La valeur de 25 % a été retenue, car les données utilisées provenant de la littérature se situent dans un large intervalle de valeurs. La variation de 25 % permet donc de tenir compte de cet intervalle en analysant l'impact potentiel d'une sur- ou sous-estimation des valeurs retenues.

Le Tableau 28 présente les résultats de l'analyse de sensibilité, soient les coûts actualisés par mode de transport pour chaque variation des variables étudiées. Les résultats sont présentés sous la forme des limites inférieures et supérieures des coûts actualisés et de leur différence.

Tableau 28. Résultats de l'analyse de sensibilité de +/- 25 %

Variable	Mode	Coûts actualisés		Différence (G\$)
		Limite inférieure (G\$)	Limite supérieure (G\$)	
Voies	Ferroviaire	51,30	64,13	12,83
	Routier	123,74	130,54	6,80
Matériel roulant	Ferroviaire	53,79	61,55	7,86
	Routier	118,26	136,02	17,76
Tonnes-kilomètres	Ferroviaire	53,63	61,80	8,17
	Routier	107,63	146,64	39,01
Coûts unitaires des opérations	Ferroviaire	53,76	61,67	7,91
	Routier	108,72	145,56	36,84

Source : calculs de l'auteur

Le Tableau 28 indique la variation dans les coûts actualisés totaux en fonction de la variable testée, et montre que la limite supérieure de l'analyse de sensibilité pour le transport ferroviaire ne dépasse jamais la limite inférieure de l'analyse de sensibilité pour le transport routier. Cela signifie que dans le cadre de cette analyse de sensibilité, les coûts actualisés du transport ferroviaire ne dépassent jamais ceux du transport routier. La variable qui implique la plus grande différence entre les limites inférieures et supérieures est les tonnes-kilomètres pour le transport routier, et les voies pour le transport ferroviaire. La plus grande différence entre les limites inférieures et supérieures, tous modes et catégories confondus, concerne la variation des tonnes-kilomètres pour le transport routier, atteignant 39,01 G\$. Ceci est notamment dû au fait que les coûts d'opération du transport routier, qui dépendent directement des tonnes-kilomètres, sont l'élément de coût qui représente la plus grande proportion des coûts actualisés totaux, soit 54 % dans le cas du scénario de base, tel que présenté au Tableau 27. La Figure 7 a montré que la variation des tonnes-kilomètres impacte à la fois les coûts d'opération et les coûts de la pollution, qui représentent une plus grande proportion des coûts actualisés totaux pour le transport routier. Les coûts unitaires des opérations présentent la deuxième plus grande différence des coûts actualisés dans le cas du transport routier, reprenant une partie de la variation incluse dans la variation des tonnes-kilomètres.

Le Tableau 27 a également fait ressortir que l'élément de coût qui représente la plus grande proportion des coûts actualisés totaux pour le transport ferroviaire concerne les voies ferroviaires. Suivant ces proportions, le Tableau 28 indique que les voies ferroviaires, pouvant représenter une variation du coût unitaire des voies ferroviaires ou une variation de la quantité de voies à doubler, présentent la différence des limites inférieures et supérieures la plus importante pour ce mode. Ce résultat de l'analyse de sensibilité peut donc être interprété comme une analyse de la sensibilité du nombre de kilomètre de voies ferroviaires à doubler. Il faut noter que pour cet élément de coût, les coûts actualisés totaux du transport routier présentent une différence des limites inférieures plus de deux fois inférieures à la différence des coûts actualisés totaux pour le transport ferroviaire (respectivement 6,80 G\$ comparé à 12,83 G\$), soulignant la moindre influence de cet élément de coût sur les coûts actualisés totaux dans le cas du transport routier. Il s'agit du seul élément de coût pour lequel le transport ferroviaire présente une

plus grande différence des limites inférieures et supérieures que pour le transport routier. La variation dans les coûts du matériel roulant, pouvant représenter une variation des coûts unitaires du matériel roulant ou de la quantité de matériel roulant ajouté chaque année, présente la plus faible différence des coûts actualisés pour le transport ferroviaire.

Conclusion de l'analyse de sensibilité de +/- 25 %

L'analyse de sensibilité de +/- 25 % étudie la variation d'un seul élément de coût à la fois, en gardant les autres éléments constants. Elle est donc utile pour comparer l'impact de la variation de +/- 25 % sur les différentes variables et pour déterminer les variables qui sont davantage impactées par cette variation. Contrairement au scénario où les coûts des voies et des opérations sont doublés pour le transport ferroviaire et où ils sont réduits de 32 % pour le transport routier, l'analyse de sensibilité de +/- 25 % n'implique pas de renversement des ordres de grandeur. C'est-à-dire que l'analyse de sensibilité de +/- 25 % n'engendre jamais de situation où la limite supérieure des coûts actualisés du transport ferroviaire dépasse la limite inférieure des coûts actualisés du transport routier.

Méthodologie de l'analyse de sensibilité des taux de croissance projetés

Afin de poursuivre l'analyse de sensibilité, il est intéressant de considérer une variation des taux de croissance projetés à l'horizon 2050 des tonnes-kilomètres et du matériel roulant. Cette analyse va permettre d'étudier une variation simultanée de tous les éléments de coûts. En effet, dans le cas où le scénario de base sous-estime les projections de tonne-kilomètre transportées, impliquant d'analyser un scénario où le taux de croissance des tonnes-kilomètres augmente de 25 %, il est intéressant de considérer que le taux de croissance du matériel roulant et la quantité de voies doivent également augmenter de 25 %, afin de pouvoir répondre à l'augmentation des tonnes-kilomètres projetées.

Dès lors, les variables du scénario de base du transport ferroviaire et routier étudiées dans le cadre de l'analyse de sensibilité des taux de croissance projetés sont :

- Voies, qui peuvent représenter une variation des coûts unitaires des voies, ou de la proportion des voies à doubler;

- Matériel roulant, qui représente une variation du taux de croissance du matériel roulant;
- Tonnes-kilomètres, qui représentent une variation du taux de croissance des tonnes-kilomètres.

Ces variables sont simultanément soumises à une analyse de sensibilité de +/- 25 %, c'est-à-dire que dans un premier temps, toutes les variables sont augmentées de 25 %, et sont ensuite toutes réduites de 25 %.

Résultats de l'analyse de sensibilité des taux de croissance projetés

Le Tableau 29 présente les résultats de l'analyse de sensibilité, soient les coûts actualisés par mode de transport pour une variation simultanée des variables étudiées. Les résultats sont présentés sous la forme des limites inférieures et supérieures des coûts actualisés et de leur différence.

Tableau 29. Résultats de l'analyse de sensibilité des taux de croissance projetés

Mode	Coûts actualisés		Différence (G\$)
	Limite inférieure (G\$)	Limite supérieure (G\$)	
Ferroviaire	38,95	78,32	39,37
Routier	82,01	173,06	91,05

Source : calculs de l'auteur

Le Tableau 29 montre que la variation simultanée apportée aux variables des voies, du matériel roulant et des tonnes-kilomètres implique une grande différence entre les limites supérieures et inférieures des coûts actualisés pour les deux modes. Bien que la limite supérieure des coûts actualisés du transport ferroviaire ne dépasse pas la limite inférieure des coûts actualisés du transport routier, il faut être prudent dans cette comparaison, car cela ne considère pas des tonnes-kilomètres transportées identiques, ne correspondant donc pas à des scénarios équivalents. Il est davantage pertinent de comparer les valeurs présentées au Tableau 29 aux valeurs du scénario de base, présenté au Tableau 22. La limite supérieure des coûts actualisés du transport ferroviaire dans le cas de l'analyse de sensibilité du Tableau 29 demeure inférieure aux coûts actualisés du transport routier du

scénario de base par un facteur de 1,62 (78,32 G\$ comparé à 127,14 G\$). La limite inférieure des coûts actualisés du transport routier dans le cas de l'analyse de sensibilité du Tableau 29 demeure supérieure aux coûts actualisés du transport ferroviaire du scénario de base par un facteur de 1,42 (82,01 G\$ comparé à 57,72 G\$).

Conclusion de l'analyse de sensibilité des taux de croissance projetés

L'analyse de sensibilité des taux de croissance projetés a permis d'étudier un cas où plusieurs éléments de coût varient simultanément dans la même direction. En comparaison au scénario de base, cette analyse de sensibilité n'a pas engendré de renversement des ordres de grandeur des coûts actualisés par mode, puisque les coûts actualisés du transport ferroviaire sont demeurés inférieurs aux coûts actualisés du transport routier. La Figure 8 illustre les résultats de l'analyse de sensibilité de +/- 25 %, incluant les taux de croissance projetés, à l'aide de graphiques de type tornade pour chaque mode de transport.

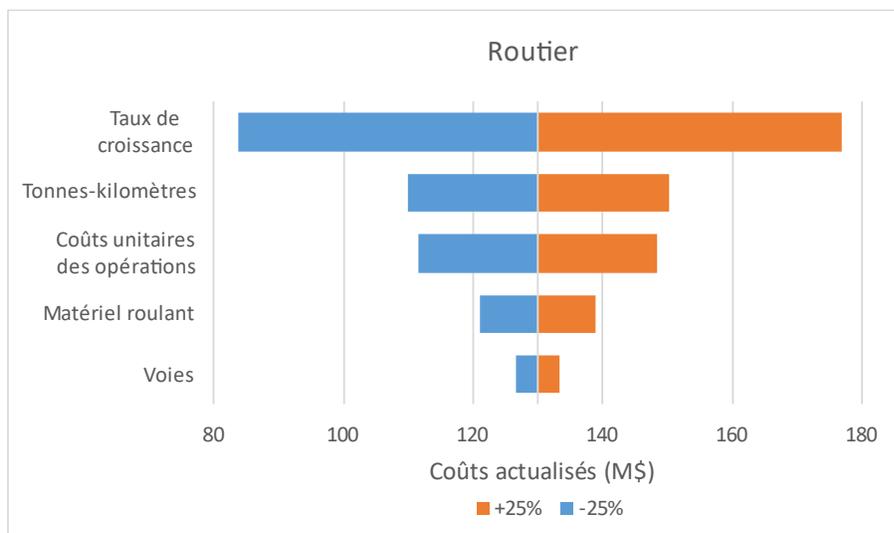
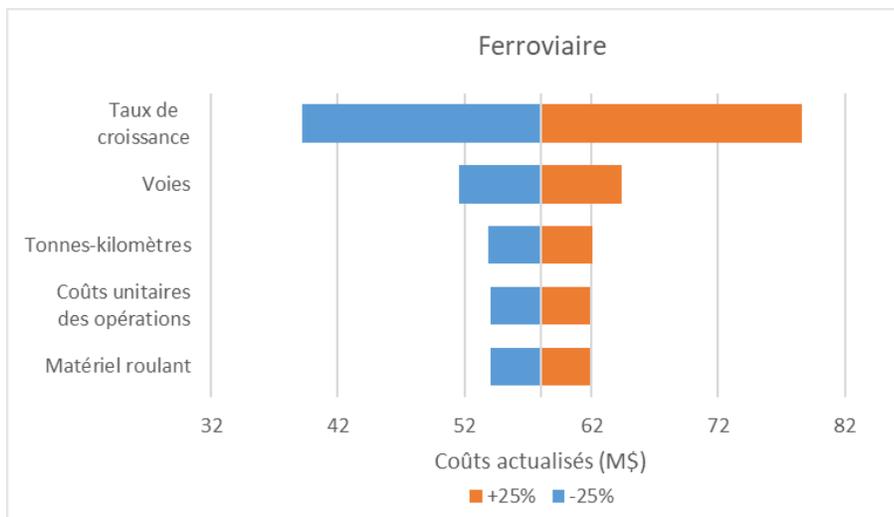


Figure 8. Graphiques en tornade de l'analyse de sensibilité +/- 25 %

La Figure 8 montre que l'analyse de la sensibilité de +/- 25 % des taux de croissance projetés a la plus grande variabilité sur les coûts actualisés pour les deux modes de transports. L'analyse de la sensibilité des variables liées aux voies de transport est l'élément impliquant la deuxième plus grande variabilité aux coûts actualisés dans le cas du transport ferroviaire. Cet élément peut être interprété comme une variation du coût unitaire des voies ferroviaires ou une variation ou du nombre de kilomètre de voies ferroviaires à doubler. Dans le cas du transport routier, l'analyse de la sensibilité des variables liées aux voies routières impliquent la plus faible variabilité des coûts actualisés. Pour le transport routier, c'est l'analyse de la sensibilité des tonnes-kilomètres qui

implique la deuxième plus grande variabilité aux coûts actualisés, suivie par l'analyse de la sensibilité des coûts unitaires du matériel roulant.

Méthodologie de l'analyse limite

Jusqu'à présent, seul le scénario avec les coûts d'investissement et d'opérations doublés pour le transport ferroviaire comparé au scénario avec les coûts d'investissement et d'opérations réduits de 32 % pour le transport routier a montré l'atteinte d'un renversement des ordres de grandeur des coûts actualisés entre les deux modes. Il est alors intéressant de déterminer le pourcentage limite des variations imposées à certaines variables qui engendre un inversement des ordres de grandeur des coûts actualisés entre les deux modes. Pour cela, la fonction solveur est utilisée sur Excel afin de déterminer le pourcentage de variation des éléments de coûts choisis qui engendrent des coûts actualisés égaux pour les deux modes de transport.

Afin de s'assurer de comparer des scénarios équivalents entre les deux modes, cette analyse va porter sur la variation des coûts unitaires et non sur la variation des quantités de voies à doubler, du matériel roulant à ajouter ou des tonnes-kilomètres transportées. Toutefois, comme présenté au Chapitre 3 à la Figure 6 et à la Figure 7, dans une certaine mesure, les variations imposées aux coûts unitaires peuvent également représenter une variation dans la quantité des infrastructures ajoutées ou des tonnes-kilomètres transportées, mais pas nécessairement d'une amplitude identique.

Les éléments de coûts qui vont être soumis à une analyse de sensibilité dans le cas de l'analyse limite sont :

- Coût unitaire de construction des voies, comprenant le coût unitaire de resurfacement des voies dans le cas du transport routier;
- Coût unitaire du matériel roulant;
- Coût unitaire des opérations.

Puisque le scénario de base et les analyses de sensibilité +/- 25 % et de taux projetés ont engendrés des coûts actualisés supérieurs pour le transport routier dans tous les cas étudiés, cette analyse étudie la situation où les variations sur les éléments de coûts sont identiques, mais de signe opposé pour les deux modes. Ainsi, le solveur considère simultanément une variation d'un certain pourcentage positif sur les éléments de coûts du transport ferroviaire, et une variation du même pourcentage, mais de signe négatif sur les

éléments de coûts du transport routier. Comme dans le cas de l'analyse de sensibilité +/- 25 % et de taux projetés, cela permet de comparer la limite supérieure des coûts actualisés du transport ferroviaire à la limite inférieure des coûts actualisés du transport routier.

Résultats de l'analyse limite

Le Tableau 30 présente les résultats de l'analyse limite, qui contient les éléments de coûts soumis à une variation, les coûts actualisés résultant de cette variation, et le pourcentage de variation des éléments de coûts choisis. Les coûts actualisés sont donc identiques pour les deux modes dans cette analyse, puisque l'objectif est de déterminer le pourcentage de variation qui mène à des coûts actualisés identiques.

Tableau 30. Résultats de l'analyse limite

Éléments de coût soumis à une variation				
Voies	Matériel roulant	Opérations	Coûts actualisés (G\$)	Variation des éléments de coûts
✓	✓	✓	79,77	39 %
	✓	✓	73,27	49 %
✓		✓	80,08	54 %
✓	✓		89,45	77 %
		✓	69,99	78 %

Source : calculs de l'auteur

Le scénario faisant varier les coûts unitaires des voies, du matériel roulant et des opérations implique la plus faible variation des éléments de coûts, qui sont tous augmentés de 39 % dans le cas du transport ferroviaire, et réduits de 39 % dans le cas du transport routier. Cela peut être interprété par le fait que dans le scénario de base, il faut que ces trois éléments de coûts soient à la fois sous-estimés de 39 % pour le transport ferroviaire et surestimés de 39 % pour le transport routier, pour que les coûts actualisés soient égaux. Cela mène à des coûts actualisés 38 % supérieurs au scénario de base pour le transport ferroviaire, et 37 % inférieurs pour le transport routier.

Le scénario faisant varier les coûts unitaires du matériel roulant et des opérations implique un pourcentage de variation de 49 % pour générer des coûts actualisés identiques pour les

deux modes. Cela peut être interprété par le fait que dans le scénario de base, il faut que ces trois éléments de coûts soient à la fois sous-estimés de 49 % pour le transport ferroviaire et surestimés de 49 % pour le transport routier, donc approximativement réduits de moitié, pour que les coûts actualisés soient égaux. Cela mène à des coûts actualisés 27 % supérieurs au scénario de base pour le transport ferroviaire, et 42 % inférieurs pour le transport routier.

Le scénario faisant varier les coûts unitaires des voies et des opérations fait varier les mêmes éléments de coûts que le scénario présenté précédemment avec coûts augmentés pour le transport ferroviaire. En doublant les coûts des voies et des opérations du transport ferroviaire et en réduisant de 32 % les coûts des voies et des opérations du transport routier, les coûts actualisés du transport ferroviaire sont égaux aux coûts actualisés du transport routier. Au Tableau 30, le pourcentage de variation des coûts unitaires des voies et des opérations obtenu est de 54 % pour générer des coûts actualisés identiques pour les deux modes. Cela peut être interprété par le fait que dans le scénario de base, il faut que ces trois éléments de coûts soient à la fois sous-estimés de 54 % pour le transport ferroviaire et surestimés de 54 % pour le transport routier, soient approximativement réduits de moitié, pour que les coûts actualisés soient égaux. Cela mène à des coûts actualisés 39 % supérieurs au scénario de base pour le transport ferroviaire, et 37 % inférieurs pour le transport routier. Les coûts actualisés sont similaires à ceux obtenus dans le scénario faisant varier les coûts unitaires des voies, du matériel roulant et des opérations, mais impliquent une plus grande variation (54 % comparé à 39 %) pour seulement deux éléments de coûts.

Le scénario faisant varier les coûts unitaires des voies et du matériel roulant implique un pourcentage de variation de 80 % pour générer des coûts actualisés identiques pour les deux modes. Cela peut être interprété par le fait que dans le scénario de base, il faut que ces trois éléments de coûts soient à la fois sous-estimés de 80 % pour le transport ferroviaire et surestimés de 80 % pour le transport routier, pour que les coûts actualisés soient égaux. Ce scénario mène à la fois à la plus grande augmentation des coûts actualisés du transport ferroviaire (55 % supérieurs au scénario de base), et à la plus faible réduction des coûts actualisés du transport routier (30 % inférieurs au scénario de base).

Le scénario faisant varier les coûts unitaires des opérations uniquement implique un pourcentage de variation de 78 % pour générer des coûts actualisés identiques pour les deux modes. Cela peut être interprété par le fait que dans le scénario de base, il faut que ces trois éléments de coûts soient à la fois sous-estimés de 78 % pour le transport ferroviaire et surestimés de 78 % pour le transport routier, pour que les coûts actualisés soient égaux. Ce scénario mène à la fois à la plus faible augmentation des coûts actualisés du transport ferroviaire (21 % supérieurs au scénario de base), et à la plus grande réduction des coûts actualisés du transport routier (45 % inférieurs au scénario de base). Ceci est notamment dû au fait que les coûts des opérations représentent une plus grande part des coûts actualisés totaux pour le transport routier que pour le transport ferroviaire, tel que présenté au Tableau 27.

Il faut noter que l'analyse limite n'inclut pas de scénario de variation des coûts unitaires des voies uniquement, ni de variation des coûts unitaires du matériel roulant uniquement. En effet, ces deux scénarios impliquent des variations des éléments de coûts de plus de 100 %, créant un scénario impossible pour le transport routier. Cela signifie que selon les hypothèses du scénario de base, il n'est pas possible d'obtenir des coûts actualisés totaux équivalents pour les deux modes en faisant varier uniquement les coûts unitaires des voies ou du matériel roulant du même pourcentage.

Conclusion de l'analyse limite

L'analyse limite permet d'explorer la magnitude des sous- et surestimations nécessaires pour changer les conclusions de ce mémoire. Les résultats de la variation des différents éléments de coûts testés s'échelonnent entre 39 % pour les coûts unitaires des voies, du matériel roulant et des opérations, et 78 % pour les coûts unitaires des opérations seulement. Comme mentionné précédemment, même si ces variations concernent des coûts unitaires, ils peuvent également représenter des changements à d'autres variables du même élément de coûts (par exemple, la variation des coûts unitaires du matériel roulant peut également représenter une variation à la quantité de matériel roulant en service).

Chapitre 5

Limites de l'étude

L'étude des coûts présentée dans ce mémoire est une étude générale qui vise à représenter des valeurs moyennes applicables au réseau de transport de marchandises à l'échelle du Canada. Ce mémoire développe une méthodologie afin de présenter des coûts comparables pour deux modes de transport ne fournissant pas un service complètement équivalent. Dès lors, l'objectif de ce mémoire est de présenter des coûts avec exactitude, en sachant que ceux-ci peuvent manquer de précision. Les coûts présentés se basent donc sur des hypothèses s'appuyant sur la littérature et sur des données existantes, dans le but premier de comparer l'ordre de grandeur des coûts actualisés totaux du transport ferroviaire et routier.

Estimation de la demande de transport actuelle et future

Étant donné l'indisponibilité des données, ce mémoire ne se base pas sur des données réelles de demande en transport actuelle et future, tant pour le transport ferroviaire et routier. Des données par tronçon sur l'utilisation actuelle et projetée de ces deux réseaux de transport à l'échelle canadienne auraient permis de déterminer avec précision la quantité de kilomètres de voies susceptibles d'atteindre leur capacité au cours de la période étudiée, et conséquemment la quantité de voies à doubler. Ce mémoire se base donc sur les tendances historiques de tonnes de marchandises transportées et sur les projections aux États-Unis pour estimer le nombre de kilomètres de voies susceptibles d'atteindre leur capacité. Par conséquent, les résultats présentés dans ce mémoire ne peuvent pas indiquer quels corridors ferroviaires et routiers doivent être doublés, même si les coûts de construction sont susceptibles de varier en fonction de la région et du relief. Cependant, le coût unitaire de construction des voies par kilomètre utilisé dans ce mémoire constitue une valeur moyenne qui reste constante. Une solution aurait été de considérer la proportion des voies ferroviaires et routières qui traversent chaque type de région et de relief et de faire varier les coûts unitaires selon ces proportions.

Tel que présenté à la Figure 6, le taux de croissance des tonnes transportées utilisé dans les scénarios constitue donc une hypothèse sur laquelle les coûts des voies et du matériel roulant s'appuient. Le taux de croissance utilisé est constant dans le temps, impliquant une quantité identique de voies à doubler et de matériel roulant à ajouter au cours de chaque année de la période étudiée. Il est toutefois évident que ceci ne constitue pas une représentation de la situation réelle d'augmentation du volume de marchandises, qui ne va probablement pas augmenter linéairement entre 2018 et 2050. Estimé de la même façon, le taux de croissance des tonnes-kilomètres transportées est également une hypothèse de conception majeure pour la comparaison des coûts totaux, influençant les coûts des opérations et de la pollution. Cependant, avec les données disponibles, il n'a pas été possible de formuler des hypothèses plus précises concernant les taux de croissance des tonnes, des tonnes-kilomètres, et du matériel roulant, et faire varier ces taux de croissance dans le temps aurait nécessité la formulation de davantage d'hypothèses, alors que la littérature à ce sujet est limitée. Dès lors, des taux de croissance constants, en débutant l'entièreté des coûts relatifs à l'augmentation de la capacité des réseaux de transport, ont été choisis afin de présenter des estimations de coûts prudentes. En effet, les coûts d'investissements dans les infrastructures sont considérés dès le début de la période. Si ces mêmes coûts étaient par exemple distribués entre 2030 et 2050, la valeur des coûts actualisés totaux diminuerait, car les coûts, qui sont actualisés au taux de 8 %, seraient concentrés sur les dernières années de la période étudiée. Ce sont donc plutôt les quantités totales d'infrastructures à construire et à acquérir qui doivent être examinées de manière critique, et non les taux de croissance sur la période étudiée.

Électrification des transports

Afin de délimiter l'étude et de comparer le transport ferroviaire et routier sur la base la plus équivalente possible, il a été choisi de considérer uniquement les locomotives et les camions à propulsion diesel. Il est cependant évident que le réseau de transport de marchandises du Canada est en évolution, et que des alternatives à la propulsion diesel sont en augmentation, bien qu'actuellement davantage applicable au transport routier qu'au transport ferroviaire. Notamment, ce mémoire ne considère pas la possibilité qu'une certaine proportion ou que l'entièreté du transport routier de marchandises soit effectuée

sans l'utilisation du carburant diesel à l'horizon 2050. Toutefois, il est probable que les investissements à venir dans le réseau de transport routier de marchandises concernent majoritairement les alternatives au transport à propulsion diesel, par exemple des camions électriques, étant donné les objectifs de décarbonation du gouvernement du Canada à l'horizon 2050. Les coûts associés aux infrastructures de transport seraient alors susceptibles d'être plus élevés que les coûts des investissements du transport routier présentés dans ce mémoire, puisqu'ils nécessiteraient les mêmes investissements au niveau des voies routières à doubler, additionnés à la construction d'un réseau de ravitaillement, par exemple des bornes de recharges. De plus, les coûts associés à l'acquisition des camions sont susceptibles de s'équivaloir puisque les coûts d'acquisition de camions électriques sont portés à être plus dispendieux que les camions à propulsion diesel jusqu'en 2030 environ, pour ensuite devenir moins dispendieux que ceux-ci entre 2030 et 2050 (Sharpe *et al.*, 2022). Concernant le transport ferroviaire, l'utilisation commerciale de locomotives électriques est commune en Europe, et un train passager à hydrogène est actuellement en démonstration au Québec (Train de Charlevoix, 2023). Il est donc probable que des locomotives n'utilisant pas le diesel comme carburant soient en service à l'horizon 2050. Cette situation implique des investissements identiques dans les voies ferroviaires, et des coûts d'acquisition des locomotives susceptibles d'être plus élevés. Ce sont toutefois les investissements supplémentaires pour la construction d'infrastructures de ravitaillement qui sont susceptibles d'engendrer des coûts élevés. Pour ces raisons, même si ce mémoire étudie uniquement des locomotives et camions à propulsion diesel, il est jugé que ce balisage de l'étude ne permet pas d'invalider les conclusions émises dans ce mémoire.

Autres éléments omis

Il faut également noter que certains coûts ont été omis dans les estimations, principalement pour des raisons d'indisponibilité des données. Notamment, les émissions de polluants atmosphériques autres que le CO₂ et les coûts associés, les coûts reliés au bruit, ainsi qu'aux accidents n'ont pas été considérés. De plus, les coûts reliés au temps de transport n'ont pas été considérés, alors que le transfert du transport de marchandises du routier vers le ferroviaire est susceptible d'impliquer une perte de rapidité. Finalement,

les coûts des opérations considérés pour les deux modes de transport constituent une addition de l'entièreté des coûts variables de chaque mode (contenant notamment les coûts de la main-d'œuvre, de l'entretien et du carburant), susceptibles de varier selon le tronçon et l'année étudiée.

Pistes de réflexion futures

Après avoir comparé le niveau d'investissement requis et les coûts associés à une augmentation de l'utilisation des réseaux de transport ferroviaires et routiers, il devient pertinent d'évaluer la faisabilité sociale et politique de ces investissements majeurs. Dans un objectif de réduction des émissions de GES du transport des marchandises, il est nécessaire de considérer les enjeux liés au transport accru de marchandises par train. Il faut notamment se questionner sur la provenance des fonds nécessaires aux coûts de mise en œuvre des investissements envisagés. Quelle proportion des coûts totaux les gouvernements et les compagnies ferroviaires sont-ils prêts à subventionner ? Suite à cela, d'où proviendraient les coûts non couverts par ces subventions potentielles ? Par conséquent, existe-t-il des enjeux d'acceptabilité auprès des expéditeurs, qui pourraient notamment faire face à des augmentations des tarifs ou à un changement de mode de transport ? Il faut également considérer les enjeux d'acceptabilité des citoyens, particulièrement ceux résidant à proximité des lignes ferroviaires. Existe-t-il des enjeux sécuritaires, ou liés à la pollution sonore si la fréquence de trains augmente sur les tronçons existants ? Ces éléments non négligeables devraient donc être adressés afin de compléter l'étude de la faisabilité des investissements dans le réseau de transport ferroviaire de marchandises.

Conclusion

Le transport de marchandises au Canada est effectué par les modes de transport ferroviaire, routier, maritime et aérien. De ces modes, les transports ferroviaire et routier offrent les services et les trajets les plus similaires. La comparaison des tonnes-kilomètres et de l'énergie consommée (ou des GES émis) par les deux modes a toutefois fait ressortir une différence majeure entre les deux modes. En 2019, alors que le transport ferroviaire transporte 1,6 fois plus de tonnes-kilomètres de marchandises que le transport routier lourd, le transport ferroviaire consomme 5,1 fois moins d'énergie (et émet 4,6 fois moins de GES). C'est cette différence dans les proportions qui a mené à la question de recherche de ce mémoire, qui vise à déterminer les investissements dans les infrastructures nécessaires pour subvenir à une demande en transport de marchandises qui utiliserait davantage le transport ferroviaire, et à estimer les coûts associés à ce changement dans les modes de transport utilisés, pour finalement les comparer aux investissements et coûts équivalents dans le cas du transport routier.

Afin d'aborder la question de recherche, il a été décidé de comparer un scénario où le transport de marchandises au Canada est uniquement effectué par transport ferroviaire, à un scénario où le transport de marchandises est uniquement effectué par transport routier. Pour comparer les deux modes de transport sur la base la plus équivalente possible, il a été décidé de comparer les situations hypothétiques où la totalité des projections des tonnes de marchandises transportées entre 2018 et 2050 était effectuée par un seul mode. Ceci permet d'étudier uniquement les infrastructures et les coûts relatifs aux tonnes supplémentaires à celles déjà transportées en 2018. De cette manière, il n'est pas nécessaire d'évaluer les coûts liés à l'utilisation des infrastructures de transport existantes, qui ne transportent pas le même volume de marchandises, mais plutôt de comparer les améliorations et agrandissements requis dans chaque réseau de transport existant pour transporter un volume identique de marchandises additionnelles. Bien que les actions de réduction des émissions de GES doivent persister au-delà de l'année 2050, cette cible a été choisie, car elle concorde avec les cibles gouvernementales de réduction des émissions

de GES et, car elle implique une période d'étude de 32 ans qui est similaire à la durée de vie utile des infrastructures ferroviaires.

La méthodologie utilisée pour comparer les deux modes de transport se base sur des hypothèses s'appuyant sur la littérature et sur les données disponibles. Les niveaux d'investissement requis dans les infrastructures existantes ainsi que le matériel roulant nécessaire pour subvenir à la demande projetée ont été estimés pour chaque mode, et les coûts associés ont été estimés. Pour le scénario concernant le transport ferroviaire, les investissements nécessaires ont été évalués à 25 200 kilomètres de voies à doubler, 9 501 locomotives et 52 188 wagons additionnels à l'horizon 2050. Pour le scénario concernant le transport routier, les investissements nécessaires ont été évalués à 6 934 kilomètres de voies à doubler et 419 034 camions additionnels à l'horizon 2050. Les projections de tonne-kilomètre transportées et les coûts des opérations et de la pollution associés ont été estimés pour chaque mode. Les estimations des coûts ont été distribuées linéairement, correspondant aux projections des tonnes et des tonnes-kilomètres, au travers des 32 années étudiées.

Ensuite, les coûts actualisés pour les deux modes de transport ont été calculés, en utilisant un taux d'actualisation réel de 8 %. La comparaison initiale des coûts actualisés des deux modes, soit le scénario de base, a mené à des coûts actualisés du transport ferroviaire 2,2 fois inférieurs aux coûts actualisés du transport routier, estimés respectivement à 57,72 G\$ et 127,14 G\$. Cela signifie que selon les hypothèses du scénario de base, transporter l'entièreté des tonnes de marchandises projetées entre 2018 et 2050 par train coûte 2,2 fois moins que si ce même volume de marchandises est transporté par camion, en plus de générer plus de huit fois moins d'émissions de GES.

Afin de considérer la possibilité de sous-estimation majeure des hypothèses reliées aux coûts des infrastructures et des opérations ferroviaires, un scénario où les coûts de construction des voies ferroviaires, des installations de transbordement et des opérations sont doublés a été étudié. Ce scénario a donné lieu à des coûts actualisés du transport ferroviaire 1,7 fois supérieurs aux coûts actualisés du transport ferroviaire du scénario de base. Ces coûts demeurent cependant inférieurs aux coûts actualisés du transport routier

du scénario de base par un facteur de 1,3. Il a ensuite été calculé que si ce scénario était accompagné d'une surestimation de plus de 32 % des mêmes éléments de coûts (voies et opérations) pour le transport routier, les coûts actualisés totaux du transport ferroviaire dans ce scénario dépassent les coûts actualisés du transport routier. Ces modifications aux hypothèses du scénario de base impliquent un inversement des ordres de grandeur, où les coûts actualisés du transport routier deviennent inférieurs aux coûts actualisés du transport ferroviaire. Étant donné les valeurs observées dans la littérature, il est toutefois jugé peu probable que ces modifications exactes aux hypothèses se déroulent simultanément.

Les hypothèses de conception du scénario de base ont été testées de différentes façons. D'abord, une analyse de sensibilité de +/- 25 % a été appliquée aux quatre variables qui avaient le plus d'influence sur les coûts totaux, soit les voies, le matériel roulant, les tonnes-kilomètres et le coût unitaire des opérations. Cette analyse a étudié la variation d'un seul élément de coût à la fois, en gardant les autres éléments constants, et n'a impliqué de renversement des ordres de grandeur des coûts actualisés totaux dans aucun cas. Une analyse limite a également été effectuée, afin de déterminer le pourcentage limite des variations imposées à certaines variables qui permettent d'engendrer un inversement des ordres de grandeur des coûts actualisés entre les deux modes. Les résultats de cette analyse ont notamment montré que dans le scénario de base, il faut que les coûts unitaires des voies, du matériel roulant et des opérations soient à la fois sous-estimés de 39 % pour le transport ferroviaire et surestimés de 39 % pour le transport routier, pour que les coûts actualisés soient égaux. Cela mène à des coûts actualisés 38 % supérieurs au scénario de base pour le transport ferroviaire, et 37 % inférieurs pour le transport routier.

Les analyses de sensibilité ont ainsi montré qu'un renversement des ordres de grandeur entre les coûts actualisés totaux du transport ferroviaire et routier devrait nécessiter respectivement des sous- et surestimations majeures aux hypothèses utilisées dans ce rapport. Dès lors, ce mémoire a montré que le transport des tonnes de marchandises projetées entre 2018 et 2050 comportait des coûts actualisés et une consommation énergétique plus faible s'il est effectué par transport ferroviaire que par transport routier. Ce mémoire souligne donc le potentiel d'une utilisation accrue du transport ferroviaire dans un contexte de décarbonation des transports, qui démontre une faible intensité

énergétique accompagnée de faibles coûts, lorsque comparée au transport routier. L'utilisation accrue d'une technologie disponible et fonctionnelle depuis le 19^e siècle telle que le transport ferroviaire peut donc contribuer à la décarbonation du secteur des transports au Canada, qui ne peut uniquement passer par la décarbonation du transport routier. En effet, toutes les technologies de décarbonation du transport routier ne sont pas encore prêtes, et le déploiement de réseaux d'approvisionnement parfois non existants est susceptible d'être long et coûteux. Le transport ferroviaire peut donc fournir une solution de transport de marchandises consommant moins d'énergie que le transport routier, et nécessitant de moindres coûts d'investissement.

Bibliographie

- Association des chemins de fer du Canada (2019). *Rapport de surveillance des émissions des locomotives*. Récupéré de <https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2022/01/Rapport-SEL-ACFC-2019.pdf>
- Association des chemins de fer du Canada (2020). *Tendances ferroviaires 2020*. Récupéré de <https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2021/03/Tendances-Ferroviaires-2020.pdf>
- Association des chemins de fer du Canada (2021). *Tendances ferroviaires 2021*. Récupéré de https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2021/12/RAC-TENDANCES-FERROVIAIRES_2021-WEB.pdf
- Association des transports du Canada (2021). *Comprendre le transport des marchandises au Canada : Tendances et pratiques exemplaires*. Récupéré de <https://www.tac-atc.ca/sites/default/files/site/doc/publications/2021/ptm-goodsmvmt-f.pdf>
- Association of American Railroads (2023). *Railroad 101*. Récupéré de <https://www.aar.org/wp-content/uploads/2020/08/AAR-Railroad-101-Freight-Railroads-Fact-Sheet.pdf>
- Atkins, Eric (2017). « CN to buy 200 locomotives from GE as freight volumes surge », *The Globe and Mail*,
- Baumgartner, J.P. (2001). *Prices and costs in the railway sector*. Récupéré de https://www.cupt.gov.pl/archiwalna/images/zakladki/analiza_koszt%C3%B3w_i_korzysci/J_P_Baumgartner_Prices_and_Costs_in_the_Railway_Sector_Ecole_Polytechnique_Federale_de_Lausanne_2001.pdf
- BNSF Railway (2022). *Virtual train tour*. <http://www.bnsf.com/about-bnsf/virtual-train-tour/>
- Bureau of Transportation Statistics *Average freight revenue per ton-mile*. <https://www.bts.gov/content/average-freight-revenue-ton-mile>
- Burningham, S. et N. Stankevich (2005). « Why road maintenance is important and how to get it done », *The World Bank - Transport Notes*.
- Cambridge Systematics (2007). *National rail freight infrastructure capacity and investment study*. Récupéré de <https://codot.gov/programs/transitandrail/assets/AARStudy.pdf>
- Caves, Douglas W. et Laurits R. Christensen (1980). « The relative efficiency of public and private firms in a competitive environment: The case of Canadian railroads », *Journal of Political Economy*, vol. 88, no 5, p. 958-976.
- Chapman, Lee (2007). « Transport and climate change: A review », *Journal of Transport Geography*, vol. 15, no 5, p. 354-367.
- CN (2019). *Histoire du CN*. <https://www.cn.ca/fr/a-propos-du-cn/histoire/>
- Compass International (2023). *The global construction newsletter q1 2023*. <https://compassinternational.net/order-magnitude-road-highway-costs/>
- Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière (2019). *Réseau routier national du Canada - rapport annuel 2017*. Récupéré de <https://www.comt.ca/Reports/NHS%20Annual%202017%20FR.pdf>

- CPCS (2013). *Étude multimodale du transport des marchandises au québec en appui aux plans territoriaux de mobilité durable*. Récupéré de http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1171101/01_Volume_1.pdf
- Craig, Anthony J., Edgar E. Blanco et Yossi Sheffi (2013). « Estimating the co2 intensity of intermodal freight transportation », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 22, p. 49-53.
- Crozet, Yves et Florian Chassagne (2013). « Rail access charges in france: Beyond the opposition between competition and financing », *Research in Transportation Economics*, vol. 39, no 1, p. 247-254.
- Environnement et Changement climatique Canada (2021). *Approche pancanadienne pour une tarification de la pollution par le carbone - rapport préliminaire 2020*. Récupéré de https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/eccc/En4-423-1-2021-fra.pdf
- Environnement et Changement climatique Canada (2023). *Rapport d'inventaire national 1990-2021 : Sources et puits de gaz à effet de serre au canada*. Récupéré de https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/En81-4-2021-1-fra.pdf
- Eom, Jiyong, Lee Schipper et Lou Thompson (2012). « We keep on truckin': Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 iea countries », *Energy Policy*, vol. 45, p. 327-341.
- Fan, Dana et Khamla Heminthavong (2022). *Le transport routier : Les poids lourds de l'économie canadienne*, Bibliothèque du Parlement. Récupéré de <https://bdp.parl.ca/staticfiles/PublicWebsite/Home/ResearchPublications/HillStudies/PDF/2022-04-F.pdf>
- Federal Railroad Administration (2023). *Rail network development*. <https://railroads.dot.gov/rail-network-development/freight-rail-overview>
- Florida Department of Transportation (2022). *Cost per mile models reports*. <https://www.fdot.gov/programmanagement/estimates/documents/costpermilemodelsreports>
- Forkenbrock, David J. (1999). « External costs of intercity truck freight transportation », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 33, no 7, p. 505-526.
- Forkenbrock, David J. (2001). « Comparison of external costs of rail and truck freight transportation », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 35, no 4, p. 321-337.
- Gouvernement du Canada (2021). *Mise à jour de l'approche pancanadienne pour une tarification de la pollution par le carbone 2023-2030*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/fonctionnement-tarification-pollution/tarification-pollution-carbone-modele-federal-information/modele-federal-2023-2030.html>
- Gouvernement du Canada (2022). *Plan de réduction des émissions pour 2030 – aperçu secteur par secteur*. <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/survol-plan-climatique/reduction-emissions-2030/aperçu-secteur.html#secteur6>

- Gouvernement du Québec - Ministère des Transports (2018). *Portrait statistique et économique : Le camionnage au Québec*. Récupéré de <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/statistiques/Documents/portrait-statistique.pdf>
- Government of Nova Scotia (2021). *Highway construction faq*. <https://novascotia.ca/tran/highways/faq.asp>
- Hanssen, Thor-Erik Sandberg, Terje Andreas Mathisen et Finn Jørgensen (2012). « Generalized transport costs in intermodal freight transport », *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 54, p. 189-200.
- Heinold, Arne et Frank Meisel (2018). « Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 65, p. 421-437.
- Hwang, Taesung et Yanfeng Ouyang (2014). « Freight shipment modal split and its environmental impacts: An exploratory study », *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 64, no 1, p. 2-12.
- Izadi, Amir, Mohammad Nabipour et Omid Titidezh (2019). « Cost models and cost factors of road freight transportation: A literature review and model structure », *Fuzzy Information and Engineering*, vol. 11, no 3, p. 257-278.
- Janic, Milan (2007). « Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, no 1, p. 33-44.
- Jenkins, G. et Y.-C. Kuo (2007). « The economic opportunity cost of capital for Canada - an empirical update ».
- Kaack, Lynn H., Parth Vaishnav, M. Granger Morgan, Inês L. Azevedo et Srijana Rai (2018). « Decarbonizing intraregional freight systems with a focus on modal shift », *Environmental Research Letters*, vol. 13, no 8, p. 083001.
- Kyte, Cheryl A., Michael A. Perfater, Stephen Haynes et Harry W. Lee (2004). « Developing and validating a tool to estimate highway construction project costs », *Transportation Research Record*, vol. 1885, no 1, p. 35-41.
- Larson, Paul D. (2013). « Deregulation of and mergers among American and Canadian railroads: A study of four decades », *Research in Transportation Business & Management*, vol. 6, p. 11-18.
- Lipscombe, Winter (2019). *Connecting our communities: The comparative costs of highway construction*, Northern Policy Institute. Récupéré de <https://www.northernpolicy.ca/upload/documents/publications/commentaries-new/commentary-lipscombe-coh-en-19.01.17.pdf>
- Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité, 2021. Récupéré de <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/c-19.3/TexteCompleet.html>
- Nguyen, Linda (2018). « Alberta plans to buy 7,000 rail cars to ease 'crisis' in oil price differentials », *Financial Post*,
- Office des transports du Canada (2017). *Au cœur des transports : L'histoire en mouvement*. Récupéré de https://otc-cta.gc.ca/sites/default/files/au_coeur_des_transports.pdf

- Padova, Allison (2005). *Federal commercialization in canada*, Library of Parliament. Récupéré de <https://publications.gc.ca/collections/Collection-R/LoPBdP/PRB-e/PRB0545-e.pdf>
- Palmer, Andrew, Philip Mortimer, Phil Greening, Maja Piecyk et Pratyush Dadhich (2018). « A cost and CO2 comparison of using trains and higher capacity trucks when uk fmcg companies collaborate », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 58, p. 94-107.
- Pinto, Julian Torres de Miranda, Oscar Mistage, Patrícia Bilotta et Eckard Helmers (2018). « Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation », *Environmental Development*, vol. 25, p. 100-110.
- Port de Vancouver *Gouvernance des administrations portuaires canadiennes*. <https://www.portvancouver.com/fr/a-propos/topics-of-interest/gouvernance-et-supervision-des-administrations-portuaires-canadiennes/>
- Ramani, Tara, Rohit Jaikumar, Haneen Khreis, Mathieu Rouleau et Nick Charman (2019). « Air quality and health impacts of freight modal shifts: Review and assessment », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2673, no 3, p. 153-164.
- Ressources naturelles Canada *Base de données complète sur la consommation d'énergie. Secteur des transports - canada. Tableaux sommaires*. https://oe.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/complet/evolution_tran_ca.cfm
- Ressources naturelles Canada *Tableau 3 : Consommation d'énergie secondaire du transport des marchandises par source d'énergie*. <https://oe.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=tran&juris=ca&rn=3&page=0>
- Ressources naturelles Canada *Tableau 6 : Émissions de ges du transport des marchandises par source d'énergie*. <https://oe.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=tran&juris=ca&rn=6&page=0>
- Ressources naturelles Canada *Tableau 14 : Consommation d'énergie secondaire et émissions de ges du transport routier des marchandises par source d'énergie*. <https://oe.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=tran&juris=ca&rn=14&page=0>
- Ressources naturelles Canada *Tableau 38 : Consommation d'énergie secondaire et émissions de ges des camions par source d'énergie – transport des marchandises*. <https://oe.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=tran&juris=ca&rn=38&page=0>
- Ressources naturelles Canada (2020). *Cahier d'information sur l'énergie 2020-2021*. Récupéré de https://ressources-naturelles.canada.ca/sites/nrcan/files/energy/energy_fact/cahier-information-%C3%A9nergie-2020-2021-Fran%C3%A7ais.pdf
- Sharpe, B. (2019). « Zero-emission tractor-trailers in canada ». <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ZETTractorTrailers%20Working%20Paper042019.pdf>

- Sharpe, B. et H. Basma (2022). « A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks ». <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/purchase-cost-ze-trucks-feb22-1.pdf>
- Statistique Canada *Tableau 23-10-0057-01 sommaire des statistiques sur le transport de marchandises et de voyageurs de l'industrie ferroviaire.*
- Statistique Canada *Tableau 23-10-0219-01 activités de l'industrie du camionnage.*
- Statistique Canada *Tableau 23-10-0292-01 statistiques financières sur le camionnage, selon la taille des transporteurs.*
- Tong, F., D. Wolfson, A. Jenn, C. D. Scown et M. Auffhammer (2021). « Energy consumption and charging load profiles from long-haul truck electrification in the united states », *Environmental Research Letters: Infrastructure and Sustainability*, vol. 1, no 2, p. 025007.
- Train de Charlevoix (2023). *Train à hydrogène.* <https://traindecharlevoix.com/train-a-hydrogene/>
- Transports Canada (2019). *Les transports au canada 2018.* <https://tc.canada.ca/fr/services-generaux/transparence/gestion-rapports-ministeriels/rapports-annuels-transports-canada/transports-canada-2018#annex-a>
- Transports Canada (2020a). *Les transports au canada 2019.* Récupéré de https://tc.canada.ca/fr/services-generaux/transparence/gestion-rapports-ministeriels/rapports-annuels-transports-canada/transports-canada-2019#toc_7
- Transports Canada (2020b). *Les transports au canada - un survol.* Récupéré de https://tc.canada.ca/sites/default/files/2021-07/les_transports_canada_2020_survol.pdf
- Transports Canada (2020c). *Liste des aéroports appartenant à transports canada.* <https://tc.canada.ca/fr/aviation/exploitation-aeroports-aerodromes/liste-aeroports-appartenant-transports-canada>
- Transports Canada (2021a). *Les transports au canada 2021.* Récupéré de <https://tc.canada.ca/sites/default/files/2022-06/transports-canada-2021.pdf>
- Transports Canada (2021b). *Les transports au canada - addenda statistique 2020.* Récupéré de https://tc.canada.ca/sites/default/files/2021-06/les_transports_au_canada_2020_addenda_statistique.pdf
- U.S. Department of Transportation (2022). *Freight analysis framework commodity flow forecast study (faf version 5): Final forecasting results* Récupéré de <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop22037/fhwahop22037.pdf>
- United States General Accounting Office (2003). *Comparison of states' highway construction costs.* Récupéré de <https://www.gao.gov/assets/gao-04-113r.pdf>
- Victoria Transport Policy Institute (2023). *Transportation cost and benefit analysis ii – roadway costs : 5.6 roadway facility costs.* Récupéré de <https://www.vtpi.org/tca/tca0506.pdf>
- Vidau, M., O. Bernard, S. Crouïgneau, Y. Putallaz, J. Lévêque et R. Jacquier (2012). « Financing railway infrastructure: How to invest and what maintenance policy? », *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 127.
- von Brown, Jeffrey Tyler (2011). *A planning methodology for railway construction cost estimation in north america*, Master of Science, Ames, Iowa, Iowa State University.

Wiegmans, Bart, Alex Champagne-Gelinas, Samuël Duchesne, Brian Slack et Patrick Witte (2018). « Rail and road freight transport network efficiency of canada, member states of the eu, and the USA », *Research in Transportation Business & Management*, vol. 28, p. 54-65.